

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МОДУЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО
КЕРУВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЧНИХ СИСТЕМАХ
ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ КУЛЬТУР У СІЛЬСЬКОМУ
ГОСПОДАРСТВІ

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A REMOTE CONTROL MODULE
FOR AIR CIRCULATION IN GREENHOUSE SYSTEMS TO IMPROVE
CROP YIELDS IN AGRICULTURE

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІМ-21

Михальчук Микола Анатолійович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Багнюк Наталія Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«_____» _____ грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т. ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Михальчуку Миколі Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Дослідження та розробка модуля дистанційного керування циркуляцією повітря в тепличних системах для покращення врожайності культур у сільському господарстві*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Багнюк Наталія Володимирівна*

затвержені наказом закладу вищої освіти від «17» червня 2025 року № 290/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 09.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи *Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування*

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

Вступ

Огляд досліджень та сучасних технологій обігріву теплиць та контролю параметрів мікроклімату

Огляд засобів та програмних методів керування циркуляцією повітря в тепличних системах на основі мікроконтролерів

Розробка автономної системи вентиляції теплиці на базі NODE-RED із живленням від сонячної енергії

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Огляд досліджень та сучасних технологій обігріву теплиць</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Огляд засобів та програмних методів керування в тепличних системах</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Розробка автономної системи вентиляції теплиці на базі NODE-RED</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		___%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст.викладач</i>		

7. Дата видачі завдання

18.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	До 01.08.2025 р.	
2.	<i>Огляд досліджень та сучасних технологій обігріву теплиць та контролю параметрів мікроклімату</i>	До 20.08.2025 р.	
3.	<i>Огляд засобів та програмних методів керування циркуляцією повітря в тепличних системах на основі мікроконтролерів</i>	До 25.09.2025 р.	
4.	<i>Розробка автономної системи вентиляції теплиці на базі NODE-RED із живленням від сонячної енергії</i>	До 20.10.2025 р.	
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	До 25.10.2025 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 27.10.2025 р.	
7.	<i>Формування додатків</i>	До 30.10.2025 р.	
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	До 05.11.2025 р.	
9.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	До 11.11.2025 р.	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	До 29.11.2025 р.	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 02.12.2025 р.	
12.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедрі</i>	До 09.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Михальчук М.А.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Багнюк Н.В.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Михальчук М. А. Дослідження та розробка модуля дистанційного керування циркуляцією повітря в тепличних системах для покращення врожайності культур у сільському господарстві. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

Перший розділ присвячено огляду предметної області, тут розглядаються методи автоматизованого керування циркуляцією повітря, основи керування параметрами мікроклімату в тепличних системах.

В другому розділі проведено огляд та оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання підігріву та параметрів мікроклімату в теплиці.

Третій розділ присвячено розробці та впровадженню автономної системи енергоощадного керування вентиляцією та обігрівом у теплиці на основі платформи Node-RED, з використанням сонячної енергії як основного джерела живлення.

Ключові слова: теплиця, сонячна панель, Node-RED, контролер, сенсор.

ANNOTATION

Mykhalchuk M. Research and development of a remote control module for air circulation in greenhouse systems to improve crop yields in agriculture. Manuscript.

Master's qualification work OP "Computer Engineering" specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used.

The first chapter is devoted to a review of the subject area, here are considered methods of automated control of air circulation, the basics of controlling microclimate parameters in greenhouse systems.

The second chapter reviews and optimal selection of methods for measuring and regulating heating and microclimate parameters in a greenhouse.

The third chapter is devoted to the development and implementation of an autonomous energy-saving control system for ventilation and heating in a greenhouse based on the Node-RED platform, using solar energy as the main power source.

Keywords: greenhouse, solar panel, Node-RED, controller, sensor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБІГРІВУ ТЕПЛИЦЬ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ	10
1.1 Методи автоматизованого керування циркуляцією повітря в тепличних системах.....	10
1.2 Технологічні основи реалізації керування параметрами в сучасних тепличних системах	12
1.3 Системи контролю параметрів мікроклімату в теплицях	20
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ЗАСОБІВ ТА ПРОГРАМНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЧНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ	23
2.1 Огляд та оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання підігріву та параметрів мікроклімату в теплиці	23
2.2 Методики вимірювання параметрів мікроклімату міні-теплиці	27
2.3 Методи прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці.....	30
2.4 Сучасні системи передачі та обміну даних.....	37
2.5 Архітектура системи контролю підігріву і параметрів мікроклімату теплиці	40
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТЕПЛИЦІ НА БАЗІ NODE-RED ІЗ ЖИВЛЕННЯМ ВІД СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	43
3.1 Принципи розробки установки та функціональні вимоги	43
3.2 Опис установки та блок-схема системи обігріву теплиці.....	46
3.3 Вибір технічних засобів та виконавчих механізмів	48
3.4 Обґрунтування вибору середовища програмування та розробка програмної частини установки	50
3.5 Налаштування Node-RED на мікрокомп'ютері Raspberry Pi	56
3.6 Програмний алгоритм роботи системи	62
3.7 Етапи конструювання установки	65

3.8 Науково-експериментальні дослідження	72
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
ДОДАТКИ	81

ВСТУП

Актуальність теми даної кваліфікаційної роботи обґрунтовується наступним: у сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв, глобальних кліматичних змін та потреби в сталому сільському господарстві, особливої актуальності набуває застосування енергоефективних і автономних технологій для керування агрооб'єктами. Теплиці потребують постійного контролю температурного режиму для підтримання оптимальних умов росту рослин. Водночас у багатьох регіонах обмежене або нестабільне енергопостачання.

Застосування сонячної енергії як джерела живлення, у поєднанні з IoT-технологіями та платформою Node-RED дає змогу реалізувати автономні системи з низьким енергоспоживанням, які здатні динамічно адаптуватися до змін кліматичних умов. Такий підхід не лише знижує витрати на енергію, а й сприяє поширенню інтелектуальних агросистем у малих господарствах, фермерських кооперативах і в умовах віддалених районів.

Метою роботи є розробити та впровадити автономну систему енергоощадного керування вентиляцією та обігрівом у теплиці на основі платформи Node-RED, з використанням сонячної енергії як основного джерела живлення. Система має враховувати кліматичні умови (температуру, освітленість) та стан енергоживлення, забезпечуючи автоматизовану реакцію на зміни мікроклімату з мінімальним споживанням енергії.

В контексті заявленої мети можна виділити наступні завдання проєкту:

– розробити структуру апаратної частини системи, яка включає сонячну панель (AX-50M Ахіота Energy), акумулятор та контролер заряду, вентилятор/обігрівач як виконавчі пристрої, сенсори температури та освітленості, контролер (ESP32, Raspberry Pi тощо) на базі технології Node-RED;

– інтегрувати програмну логіку керування в середовищі Node-RED, реалізувавши зчитування показників температури та освітленості, алгоритм автоматичного включення чи вимкнення вентиляції при перевищенні заданого

порогу температури (наприклад, 30° C), аналіз рівня освітленості як умовного індикатора інтенсивності генерації сонячної енергії;

– забезпечити автономне енергоживлення системи шляхом оптимізації споживання електроенергії відповідно до наявного заряду та умов освітлення;

– розробити графічний інтерфейс (dashboard) для моніторингу параметрів у Node-RED, що дозволяє користувачу в реальному часі спостерігати за температурою, станом вентиляції та живлення;

– виконати тестування системи в умовах реальної теплиці, оцінити стабільність роботи, енергоефективність та адаптивність до змін кліматичних і енергетичних умов, підготувати технічну документацію та методичні рекомендації щодо впровадження подібних систем в умовах малих агропідприємств або приватних господарств та зробити висновки.

Об'єктом дослідження є програмні засоби автоматичного керування мікрокліматом теплиці та технології Node-RED, що забезпечують візуальне програмування логіки управління на основі показників температури, рівня освітленості та стану енергоживлення.

Предметом дослідження є інтелектуальна система автоматичного керування мікрокліматом теплиці, зокрема вентиляцією та обігрівом, що функціонує автономно на основі сонячної енергії.

Апробація результатів (додаток Б). Результати роботи опубліковані в науковому журналі «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», м. Луцьк, 2025. № 60. С. 260-268 [1].

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБІГРІВУ ТЕПЛИЦЬ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ

1.1 Методи автоматизованого керування циркуляцією повітря в тепличних системах

Методи автоматизованого керування циркуляцією повітря в тепличних системах – це комплекс технічних, програмних і алгоритмічних рішень, спрямованих на підтримання оптимального мікроклімату для росту рослин (температури, вологості, концентрації CO₂, швидкості повітрообміну тощо). У сучасних умовах керування циркуляцією повітря здійснюється з використанням автоматизованих систем, що базуються на поєднанні сенсорних технологій, мікроконтролерів, програмних алгоритмів та елементів штучного інтелекту.

Теплиці чудово уловлюють сонячне світло, щоб зігріти рослини, але без належної вентиляції вони можуть стати надто гарячими навіть у прохолодні дні. Стратегічно розмістивши вентиляційні отвори, можна виводити надлишкове тепло, підтримуючи всередині потрібну температуру для рослин. Наприклад, весняного дня, коли на вулиці 15° C, теплиця без хорошої вентиляції може нагрітися до некомфортних 32° C до полудня. Ця екстремальна спека може викликати стрес у рослин, спричиняючи їх в'янення, уповільнення росту та порушення належного фотосинтезу. Вентиляція допомагає охолодити теплицю, щоб уникнути цих проблем. Навіть у прохолодну погоду вентиляція допомагає запобігти надмірній втраті тепла вночі, підтримуючи стабільну температуру протягом року. Автоматизовані системи вентиляції можуть самостійно регулювати температуру залежно від погоди, щоб у теплиці завжди була ідеальна температура.

Окрім контролю тепла, належна вентиляція контролює рівень вологості, що життєво важливо для здоров'я рослин. Надмірна вологість може призвести до грибкових захворювань і приваблювати шкідників, оскільки вони процвітають у вологому, нерухомому повітрі. Можна уникнути накопичення

затхлого, вологого повітря, використовуючи припливні та витяжні вентилятори для підтримки циркуляції повітря. Це особливо важливо, коли конденсат частіше утворюється після поливу рослин або після дощу. Встановлення вентиляційної системи, яка автоматично вмикається, коли підвищується вологість, може підтримувати свіжість повітря всередині теплиці та запобігати надлишку вологи. Підтримка оптимального рівня вологості створює менш сприятливе середовище для хвороб та шкідників.

Розміщення вентиляційних отворів на даху теплиці та бічних стінках є ключовим для підтримки правильної температури шляхом використання природного потоку повітря. Якщо не випускати гаряче повітря назовні, температура всередині може різко підвищитися, що ускладнить ріст рослин.

Оскільки гаряче повітря має тенденцію підніматися, воно може створювати теплі зони у верхній частині теплиці. Розміщення вентиляційних отворів на даху в найвищих точках дозволяє цьому гарячому повітрю виходити. Наявність вентиляційних отворів з боків, приблизно на середині стін, пропускає холодніше повітря ззовні, допомагаючи підтримувати стабільну температуру.

Таке поєднання дахових та бічних вентиляційних отворів створює стабільний потік повітря, ідеальний для росту рослин, підтримуючи температуру в оптимальному діапазоні від 10°C до 29°C , залежно від типу рослин, які там вирощуються.

У дуже спекотні дні потрібно розташувати теплицю так, щоб вентиляційні отвори на даху були спрямовані за напрямком вітру, щоб виштовхувати ще більше гарячого повітря. А в прохолоднішу пору року, таку як осінь і зима, можна налаштувати бічні вентиляційні отвори, щоб у теплиці не було надто холодно.

Система вентиляції теплиць (рис. 1.1) розроблена спеціально для вологих умов теплиці. Виготовлена з міцних матеріалів, таких як алюміній, нержавіюча сталь та ПВХ, вона розрахована на тривалий термін служби. Вона оснащена витяжним вентилятором зі змінною швидкістю на нержавіючій ПВХ засувці, що підтримує всередині оптимальний клімат для рослин.



Рисунок 1.1 – Система вентиляції [2]

1.2 Технологічні основи реалізації керування параметрами в сучасних тепличних системах

Мікроклімат теплиці є комплексним поєднанням параметрів, що визначають фізичний стан повітряного середовища: температура, вологість, концентрація вуглекислого газу, освітленість, швидкість руху повітря, рівень ґрунтової вологості та температура субстрату. Системи контролю мікроклімату призначені для безперервного моніторингу цих параметрів, їх реєстрації, аналізу та передавання даних у системи автоматичного регулювання. Під час розробки інтелектуальної системи управління сільськогосподарськими теплицями необхідно приділяти пильну увагу повноті системи та етичним питанням. Моніторинг параметрів навколишнього середовища теплиць у

режимі реального часу вимагає обробки та збору великих обсягів конфіденційних даних, що викликає занепокоєння щодо конфіденційності зацікавлених сторін у сільському господарстві, виробників тепличного обладнання та інших зацікавлених сторін. У свою чергу, дослідження охоплює безпечні механізми передачі та зберігання даних, які шифрують конфіденційну інформацію, щоб лише авторизовані користувачі могли отримати до неї доступ. Дослідження також охоплює прозору політику використання даних, яка встановлює права власності та використання, доповнену процедурами десенсібілізації даних для контролю можливих ризиків для конфіденційності.

Поява Інтернету речей та машинного навчання може спровокувати зміну парадигми в регулюванні сільського господарства, що потенційно може призвести до технологічної адаптації та проблем із зайнятістю серед фахівців. Цього вдається уникнути завдяки навчальним та допоміжним програмам, що забезпечуються дослідженнями, щоб забезпечити знання фахівців з сільського господарства про використання новітніх технологій. Крім того, лунають голоси за відкриті форуми для спілкування між практиками, дослідниками та урядами, щоб можна було обговорити вплив інтеграції технологій у традиційні моделі сільського господарства.

Після впровадження інтелектуальних технологій, довгострокова стійкість та обслуговування системи стали реальними проблемами. Для вирішення цієї проблеми система добре розроблена з урахуванням модульності та можливості оновлення, що забезпечує легке оновлення програмного та апаратного забезпечення. Крім того, розроблено продуманий план обслуговування та систему підтримки, щоб забезпечити безперервне використання системи в довгостроковій перспективі. Впровадження новітніх технологій може призвести до нерівномірного розподілу ресурсів у суспільстві, що обмежить доступ певних регіонів або сільськогосподарських виробників до переваг розумного сільського господарства. Прагнучи зберегти соціальну справедливість та доступність, у дослідженні розроблено політику та ініціативи для гарантування доступного та справедливого застосування новітніх

технологій усім спектром суспільства. Це передбачає надання технічної підтримки та освіти в сільській місцевості з метою подолання цифрової нерівності [3].

Шляхом ретельного вивчення внутрішніх параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість та освітлення, у поєднанні з розумним застосуванням алгоритмів машинного навчання, сприяння точного контролю цих параметрів у режимі реального часу, очікуваним результатом є адаптивна система, яка дозволить фермерам задовольняти різноманітні потреби сільськогосподарських культур, зменшувати втрати ресурсів та підвищувати ефективність виробництва.

Впровадження інтелектуальної системи управління сільськогосподарськими теплицями має на меті призвести до технологічних інновацій у сільськогосподарському виробництві, сприяючи переходу від традиційного до інтелектуального та точного землеробства. Крім того, завдяки скороченню використання енергії, води та добрив, система має стати ключовим елементом у підтримці сталого розвитку сільського господарства. Найголовніше, що зростання сільськогосподарського виробництва чисельно сприяє задоволенню зростаючого світового попиту на продукти харчування, а отже, і добробуту суспільства та сталому економічному розвитку.

Шлях майбутнього зростання залежить від впровадження нових технологій, прикладом чого є впровадження сенсорних технологій наступного покоління, таких як мультиспектральні датчики високої роздільної здатності. Очікується, що ці датчики пропонуватимуть більш повні дані про навколишнє середовище, а також впровадження передових технологій бездротового зв'язку для забезпечення швидкої та безпечної передачі даних. Однак таке впровадження може зіткнутися з проблемами сумісності обладнання та обробки даних. Передбачуване рішення полягає у застосуванні модульної системи з легкою заміною та оновленням датчиків, а також оптимізації алгоритмів обробки даних для можливості обробки великої кількості даних.

Ще одним потенційним напрямком для майбутніх досліджень є постійний розвиток алгоритмів машинного навчання. Це передбачає оптимізацію існуючих алгоритмів, включення методів глибокого навчання для покращення моделювання складних взаємозв'язків у тепличних середовищах та інтеграцію методів онлайн навчання для динамічного налаштування в різноманітних сільськогосподарських ландшафтах. Однак розробка алгоритмів глибокого навчання може вимагати більших обчислювальних ресурсів, а також потребувати енергоспоживання та апаратних рішень. Тим часом, проблемою, пов'язаною з технологією онлайн-навчання, є оновлення моделі в режимі реального часу без погіршення продуктивності системи, що створює потребу в алгоритмічній стабільності та підвищенні ефективності в режимі реального часу.

На майбутніх етапах розробки важливо буде визначити, наскільки гармонійно інтелектуальна система сільськогосподарського контролю теплиць впишеться в решту сільськогосподарської екосистеми. Це передбачає безперебійну сумісність із системами на рівні поля та ланцюга постачання, а також досягнення цілісної інтегрованої структури для сільськогосподарського інтелекту. Інтеграція різних систем неминуче пов'язана зі стандартизацією даних, тому зусилля, спрямовані на встановлення обов'язкових стандартів на галузевому рівні, забезпечать гармонійне створення систем змішаного середовища постачальників.

Критично важливим для досягнення майбутніх проривів є сприяння впровадженню фермерами технологій розумного сільського господарства. За допомогою формальних освітніх та навчальних ініціатив дослідження спрямоване на сприяння розбірливому розумінню серед фермерів з метою належного використання інтелектуальних систем управління теплицями. Визнаючи потенційний вплив географічних та культурних відмінностей на соціальне сприйняття, дослідження висвітлює регулярні навчальні програми, використання місцевих ресурсів, а також обізнаність і впевненість фермерів щодо нових технологій як критичні стратегії для вирішення цих проблем.

Завдяки колективній співпраці для їх подолання та продовженню стимулювання технологічного прогресу, інтелектуальні системи управління тепличним господарством готові відігравати дедалі більшу роль у просуванні сталого розвитку сільського господарства та загального суспільного прогресу.

В останні роки спостерігається величезне зростання застосування технологій Інтернету речей (IoT) та машинного навчання в сільському господарстві. Технологія IoT підтримує підключення сільськогосподарської техніки в режимі реального часу та збір великих обсягів даних про навколишнє середовище. Такі дані створюють багату інформаційну основу для роботи алгоритмів машинного навчання, що дозволяє інтелектуально керувати процесами сільськогосподарського виробництва за допомогою аналізу даних та навчання моделей.

У сільському господарстві алгоритми машинного навчання широко використовуються для прогнозування, оптимізації та прийняття рішень. Аналіз історії дозволяє створювати моделі, які можуть прогнозувати ріст сільськогосподарських культур за різних метеорологічних умов, що дозволяє точно контролювати умови росту. Машинне навчання також може динамічно змінювати умови в теплицях, використовуючи дані в режимі реального часу, відповідно до змін стадій росту сільськогосподарських культур для максимізації ефективності виробництва.

Вичерпний огляд сучасної літератури розкриває величезний потенціал застосування Інтернету речей та машинного навчання в сільському господарстві. Однак, для загального дослідження та впровадження інтелектуальної системи управління сільськогосподарськими теплицями в режимі реального часу все ще існує багато викликів та питань [4].

Методологія застосування сонячної панелі під час проектування автономних тепличних систем базується на послідовному аналізі енергетичних потреб, можливостей генерації електроенергії та інтеграції отриманої енергії в систему автоматизованого керування. Основна мета полягає у створенні стабільного, енергонезалежного джерела живлення, здатного забезпечити

безперебійну роботу датчиків, контролерів, виконавчих механізмів і комунікаційних модулів, які входять до складу сучасних кіберфізичних тепличних комплексів.

Першим етапом розробки системи є визначення енергетичного балансу. На цьому кроці виконується аналіз усіх споживачів електроенергії, які функціонують у складі теплиці, включаючи мікроконтролерну платформу, модулі зв'язку, сенсорні вузли, електроприводи вентиляції, системи обігріву та зрошення. Для кожного пристрою визначається номінальна потужність і середня тривалість роботи протягом доби. На основі цих даних розраховується сумарне добове енергоспоживання системи з урахуванням додаткових втрат, які виникають у процесі перетворення енергії, заряджання акумуляторів і передавання електроенергії по провідниках. Цей етап дозволяє сформуванню базову оцінку потреб теплиці в електроенергії, що є основою для вибору відповідних параметрів сонячної панелі та акумуляторної батареї.

Другим важливим напрямом є аналіз сонячного ресурсу, тобто потенціалу генерації електроенергії від сонячного випромінювання у конкретному регіоні. Використовуючи кліматичні дані, визначають середню кількість пікових сонячних годин за добу для різних місяців року. Важливо враховувати сезонні коливання інсоляції, адже у зимовий період вироблення енергії може знижуватися в декілька разів. Тому при проектуванні доцільно орієнтуватися на найменш сприятливі умови, щоб забезпечити надійність роботи системи навіть у похмуру погоду або в умовах короткого світлового дня. Орієнтація панелі на південь і вибір оптимального кута нахилу відносно горизонту підвищують ефективність її роботи та стабільність енергопостачання.

На основі отриманих даних визначається потужність сонячної панелі. Для цього використовується співвідношення між добовим енергоспоживанням, середньою тривалістю сонячного освітлення і загальним коефіцієнтом ефективності системи, який враховує втрати на перетворення та зберігання енергії. Наприклад, при використанні монокристалічного модуля типу АХ-50М

(рис. 1.2), номінальна потужність якого становить 50 Вт, можна оцінити, скільки таких панелей потрібно для покриття енергетичних потреб теплиці за добу. Якщо виявляється, що потужності однієї панелі недостатньо, застосовується комбінація декількох модулів, з'єднаних послідовно або паралельно залежно від вибраної системної напруги.



Рисунок 1.2 – Сонячна батарея типу АХ-50М [5]

Наступним кроком є вибір і розрахунок акумуляторної батареї, яка забезпечує накопичення електроенергії для живлення системи у нічний час або під час зниження рівня сонячної радіації. Ємність акумулятора визначається на основі необхідної кількості днів автономної роботи, системної напруги, глибини розряду та коефіцієнта ефективності. Для підвищення довговічності системи важливо не допускати глибокого розряду акумуляторів, тому в розрахунках зазвичай використовується лише частина їхньої номінальної ємності. Тип акумулятора обирається з урахуванням температурного діапазону роботи та циклічності процесів заряджання і розряджання. У тепличних умовах ефективно застосовуються літій-іонні або гелеві акумулятори, які мають тривалий термін служби та високу ефективність зберігання енергії.

Після вибору основних компонентів енергосистеми проводиться інтеграція електроживлення з системою автоматизованого керування теплицею. У даному випадку застосовується програмне середовище Node-RED, яке дозволяє організувати логіку розподілу електроенергії між споживачами відповідно до поточного стану системи. Використання датчиків напруги та струму, наприклад INA219 або INA226, дає змогу в режимі реального часу контролювати рівень заряду батареї, потужність генерації сонячної панелі та споживання енергії різними пристроями. Це відкриває можливість впровадження інтелектуальних стратегій енергоменеджменту, таких як пріоритизація навантажень, автоматичне вимкнення другорядних споживачів при низькому рівні заряду чи адаптивне керування вентиляторами та нагрівальними елементами для зменшення навантаження на систему.

Для підвищення ефективності роботи доцільно реалізувати функцію прогнозування енергетичного балансу на основі даних про освітленість, погодних умов та прогнозу сонячної активності. Це дозволяє системі проактивно планувати використання енергії, наприклад, обмежувати споживання під час тривалих періодів низької інсоляції або накопичувати додаткову енергію перед очікуваними похмурими днями. Усі отримані дані можуть зберігатися у базі даних або передаватися на хмарний сервер для подальшого аналізу, що сприяє підвищенню рівня автономності й аналітичних можливостей тепличної системи.

Завершальним етапом методології є тестування і калібрування системи. Після монтажу проводяться випробування під різними рівнями освітленості та навантаження, перевіряється стабільність напруги, реакція системи на зміну умов, а також робота програмних алгоритмів. Результати тестів використовуються для корекції параметрів панелі, акумулятора або логіки енергокерування. Після цього система вважається готовою до тривалої експлуатації, а отримані дані можуть бути використані для оптимізації майбутніх проєктів.

Таким чином, методологія застосування сонячної панелі у тепличних системах є комплексним підходом, який поєднує енергетичний аналіз, моделювання кліматичних умов і розробку програмно-апаратної інтеграції. Вона забезпечує надійність, автономність і енергоефективність функціонування теплиці, дозволяючи підтримувати стабільний мікроклімат без прив'язки до централізованого електропостачання та мінімізуючи вплив зовнішніх факторів на роботу кіберфізичної системи.

1.3 Системи контролю параметрів мікроклімату в теплицях

Системи контролю параметрів мікроклімату в теплицях є ключовим елементом сучасного рослинництва, оскільки забезпечують створення та підтримання стабільних умов, необхідних для нормального росту і розвитку рослин протягом усього вегетаційного періоду. Ефективне керування мікрокліматом дозволяє компенсувати вплив зовнішніх погодних коливань і забезпечити оптимальне поєднання таких факторів, як температура, вологість повітря, концентрація вуглекислого газу, рівень освітленості та циркуляція повітря. Завдяки цьому зростає продуктивність рослин, скорочується час дозрівання врожаю, а також зменшується ризик розвитку захворювань, пов'язаних із несприятливими умовами середовища.

Функціонування системи контролю мікроклімату базується на принципі зворотного зв'язку, за якого вимірювальні сенсори постійно фіксують значення основних параметрів середовища і передають їх до центрального контролера. Контролер аналізує отримані дані, порівнює їх із заданими еталонними значеннями та формує команди для виконавчих пристроїв, які здійснюють необхідні коригувальні дії. Наприклад, при перевищенні допустимого рівня температури автоматично відкриваються вентиляційні отвори або вмикаються вентилятори, а при зниженні температури – активується система обігріву. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільний тепловий баланс у приміщенні незалежно від зовнішніх погодних умов.

Контроль вологості є не менш важливим аспектом, адже надмірна сухість повітря призводить до уповільнення фотосинтезу і зневоднення рослин, тоді як надлишкова волога створює сприятливі умови для розвитку грибкових захворювань. Сучасні системи контролю вологості використовують зволожувачі, форсунок або туманоутворювальні установки, які регулюються автоматично залежно від показників гігрометрів. Водночас циркуляційні вентилятори сприяють рівномірному розподілу вологи по всьому об'єму теплиці, запобігаючи утворенню зон із надмірною конденсацією.

Особливу роль у керуванні мікрокліматом відіграє регулювання концентрації вуглекислого газу. CO₂ є основною сировиною для процесу фотосинтезу, тому його достатня кількість безпосередньо впливає на інтенсивність росту рослин. У багатьох теплицях встановлюють системи дозованої подачі CO₂, які активуються при зниженні його концентрації нижче заданого рівня. Таким чином створюються умови, наближені до природного середовища, навіть у повністю закритих тепличних комплексах.

Не менш важливою складовою системи контролю є регулювання освітленості. За допомогою фотосенсорів і світлодіодних установок відбувається компенсація нестачі природного освітлення в похмурі дні або в нічний час. Сучасні системи освітлення можуть працювати в автоматичному режимі, змінюючи інтенсивність світлового потоку залежно від фази розвитку рослин і біологічних потреб культури. Це дозволяє оптимізувати енергоспоживання та підвищити ефективність фотосинтетичних процесів [6].

Сучасні автоматизовані системи контролю мікроклімату тісно інтегруються з цифровими технологіями, зокрема з інтернетом речей (IoT) та хмарними сервісами. Кожен сенсор або виконавчий пристрій може бути підключений до локальної мережі, що дає змогу збирати дані в реальному часі, здійснювати їхній аналіз і передавати результати на центральний сервер чи мобільний додаток. Користувач отримує можливість віддалено стежити за станом теплиці, змінювати налаштування та отримувати попередження про

відхилення параметрів від норми. Такий підхід забезпечує високу точність керування та дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни середовища.

У розвинутих тепличних господарствах все частіше застосовуються інтелектуальні алгоритми керування, що базуються на штучному інтелекті та машинному навчанні. Вони аналізують великі обсяги даних, накопичених під час експлуатації системи, та визначають оптимальні режими роботи обладнання з урахуванням сезонних і добових коливань, типу вирощуваної культури та її поточного стану. Такий підхід дає змогу не лише стабілізувати мікроклімат, а й прогнозувати потреби рослин у ресурсах, оптимізувати використання енергії та води, а також запобігати можливим технічним збоям. Таким чином, системи контролю параметрів мікроклімату в теплицях є складними кіберфізичними комплексами, що поєднують сенсорні технології, автоматизоване керування, комп'ютерну обробку даних і алгоритмічну оптимізацію. Вони забезпечують точне регулювання умов вирощування рослин, сприяють підвищенню продуктивності сільськогосподарських підприємств і створюють основу для розвитку розумного землеробства, орієнтованого на ефективне використання природних та енергетичних ресурсів [7].

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД ЗАСОБІВ ТА ПРОГРАМНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЧНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

2.1 Огляд та оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання підігріву та параметрів мікроклімату в теплиці

Огляд і оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання підігріву й параметрів мікроклімату в теплиці є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасних автоматизованих систем керування агротехнічними процесами. Створення стабільного теплового режиму та підтримання оптимального поєднання температури, вологості, освітленості й газового складу повітря в тепличному просторі визначає ефективність росту рослин і рівень енергетичної раціональності системи. Саме тому питання вибору адекватних засобів вимірювання та методів регулювання має не лише технічне, а й економічне значення, оскільки дозволяє узгодити точність контролю з мінімальними витратами енергії та ресурсів.

Вимірювання параметрів мікроклімату здійснюється за допомогою комплексу спеціалізованих сенсорів, які забезпечують перетворення фізичних величин у сигнали, зручні для подальшої обробки контролером. Температурний режим у теплицях, як правило, визначається за допомогою терморезисторів або термопар, що характеризуються високою стабільністю показань у широкому діапазоні значень. Дані від температурних сенсорів передаються до системи керування, яка здійснює безперервний моніторинг і порівнює фактичну температуру з еталонною. Для оцінювання вологості застосовуються психрометричні або ємнісні датчики, які дозволяють визначати як абсолютну, так і відносну вологість повітря. Освітленість вимірюється фотодіодними або фотометричними сенсорами, а концентрація вуглекислого газу контролюється за допомогою інфрачервоних газоаналізаторів, що забезпечують точність визначення навіть при незначних відхиленнях рівня CO₂.

Усі ці вимірювальні пристрої інтегруються в єдину інформаційно-керувальну систему, яка на основі зібраних даних формує сигнали для регулювання роботи обладнання. Основним завданням при цьому є підтримання енергетичного балансу між надходженням і відведенням тепла, випаровуванням та конденсацією вологи, а також газообміном між внутрішнім і зовнішнім середовищем. Регулювання підігріву в теплицях здійснюється за допомогою водяних або повітряних систем обігріву, у яких циркулює теплоносієм певної температури. Найпоширенішим є водяне опалення, де тепло передається через мережу трубопроводів і радіаторів, розміщених уздовж гряд або під стелажми. Керування температурою теплоносія здійснюється автоматично через зміну потужності котла, швидкості циркуляції або відкриття регулюючих клапанів. У повітряних системах обігріву використовується контроль потоку нагрітого повітря, який розподіляється через вентилятори й канали, забезпечуючи рівномірність нагрівання всієї теплиці.

Для забезпечення стабільності мікроклімату широко використовуються різні підходи до регулювання, серед яких класичні алгоритми пропорційно-інтегрально-диференціального керування та сучасні методи адаптивного і предикативного регулювання. Використання PID-контролерів дозволяє швидко реагувати на відхилення температури або вологості, компенсуючи їх шляхом плавної зміни потужності нагрівальних або охолоджувальних пристроїв. Проте в умовах складної динаміки тепличних процесів, коли взаємодія між різними параметрами є нелінійною, ефективнішими виявляються адаптивні системи, які коригують свої налаштування залежно від поточних умов. У таких системах можлива інтеграція алгоритмів машинного навчання, що враховують історичні дані й дозволяють прогнозувати зміну параметрів середовища з урахуванням добових і сезонних коливань.

Особливу увагу приділяють точності вимірювання, оскільки навіть незначні похибки у визначенні температури або вологості можуть призвести до помітних змін у стані рослин. Тому важливо забезпечити регулярне калібрування сенсорів, контроль стабільності електронних вузлів і компенсацію

впливу зовнішніх факторів, таких як сонячне випромінювання або протяги. Сучасні сенсорні модулі часто оснащуються функціями самодіагностики, що дозволяє контролеру своєчасно виявляти збої у вимірювальній системі та переходити в безпечний режим роботи.

Оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання мікроклімату залежить від типу теплиці, вирощуваної культури та кліматичних умов регіону. У промислових теплицях доцільним є використання комплексних систем автоматизації з централізованим контролем, що об'єднує всі вимірювальні та регулюючі контури в єдину мережу. У менших господарствах можуть застосовуватися локальні системи з простішими алгоритмами керування, орієнтовані на підтримання основних параметрів у заданих межах.

Таким чином, вибір оптимальних методів вимірювання та регулювання підігріву й параметрів мікроклімату в теплиці базується на принципах точності, стабільності та адаптивності системи. Ефективна взаємодія сенсорів, контролерів і виконавчих пристроїв забезпечує необхідну узгодженість усіх елементів тепличного комплексу, створюючи умови для раціонального використання енергоресурсів і стабільного розвитку рослин у контрольованому середовищі [8].

Огляд методів вимірювання та регулювання підігріву та параметрів мікроклімату в теплиці є важливою складовою побудови ефективних систем керування тепличним середовищем, оскільки саме точність збору даних та адекватність реакції системи на їх зміну визначають продуктивність вирощуваних культур, енергоефективність та стабільність роботи обладнання. Основними параметрами, що підлягають контролю, є температура, вологість, освітленість та стан енергоживлення, які безпосередньо впливають на фотосинтез, інтенсивність росту та водний обмін рослин.

Серед методів вимірювання температури найбільш поширеними є цифрові датчики типу DHT22 та DS18B20. Датчик DHT22 забезпечує вимірювання температури та вологості з достатньою точністю та низьким енергоспоживанням, що робить його придатним для автономних систем.

DS18B20, у свою чергу, вирізняється високою точністю та можливістю роботи на довгих лініях зв'язку, що дає переваги при розміщенні сенсорів у віддалених точках теплиці. Для оцінювання освітленості застосовуються датчики типу BH1750 або фотодіодні LDR-елементи, що дозволяють визначити інтенсивність сонячного випромінювання та використовувати цю інформацію для оцінки потенційної генерації енергії сонячною панеллю.

Методи регулювання підігріву в теплицях ґрунтуються на автоматичному керуванні виконавчими пристроями відповідно до показників сенсорів. Найбільш розповсюдженим є температурне керування за пороговими значеннями, коли при зниженні температури нижче заданого рівня активується нагрівальний елемент, а при підвищенні – вимикається. Такий підхід забезпечує простоту реалізації та високу надійність, однак може призводити до частих циклів ввімкнення/вимкнення обладнання. Покращеним варіантом є застосування гістерезисного регулювання, при якому вмикання та вимикання відбувається із заданим діапазоном, що зменшує механічне навантаження на обладнання та стабілізує температурний режим.

Для систем вентиляції використовуються вентилятори постійного струму, зокрема корпусні моделі типу ATCool 9025 (рис. 2.1), керування якими здійснюється через реле або MOSFET-модулі. Вони забезпечують підтримання певного рівня циркуляції повітря, що сприяє вирівнюванню температури та вологості у просторі теплиці, запобігає перегріву та утворенню конденсату. Важливим аспектом регулювання є також урахування енергетичних умов автономної системи. Якщо рівень напруги акумулятора падає нижче критичного значення, система переходить у режим енергозбереження, вимикаючи навантаження для забезпечення стабільної роботи мікроконтролера та основних функцій моніторингу.

Оптимальний вибір методів вимірювання та регулювання визначається такими факторами як енергоспоживання, точність вимірювань, надійність та можливість інтеграції з програмною платформою. У розроблюваній системі використання датчиків DHT22 та BH1750 є доцільним, оскільки ці сенсори

забезпечують достатню точність та простоту інтеграції з Raspberry Pi і середовищем Node-RED.



Рисунок 2.1 – ATCool 9025 [9]

Застосування порогового алгоритму керування з елементами енергозбереження відповідає умовам автономного живлення від сонячної панелі, а використання MOSFET або реле гарантує безпечне керування виконавчими механізмами.

Таким чином, оптимальним є комбінований підхід, який поєднує точні цифрові методи вимірювання параметрів мікроклімату з енергоефективними алгоритмами регулювання підігріву і вентиляції. Така система здатна забезпечити стабільні умови для росту рослин, мінімізувати витрати енергії та забезпечити адаптивність роботи відповідно до кліматичних і енергетичних умов, що є особливо важливим для автономних тепличних комплексів [10].

2.2 Методики вимірювання параметрів мікроклімату міні-теплиці

Методики вимірювання параметрів мікроклімату в міні-теплиці ґрунтуються на застосуванні компактних і високочутливих сенсорних засобів, які дозволяють у режимі реального часу визначати основні характеристики

внутрішнього середовища, такі як температура, вологість повітря, рівень освітленості, концентрація вуглекислого газу та швидкість руху повітря. У порівнянні з великими промисловими тепличними комплексами, міні-теплиці мають обмежений об'єм повітря, тому навіть незначні коливання зовнішніх умов можуть істотно впливати на внутрішній мікроклімат. Це зумовлює необхідність застосування точних методів вимірювання, які забезпечують стабільний контроль параметрів і дають можливість автоматизованим системам керування оперативно реагувати на зміни середовища.

Вимірювання температури в міні-теплиці здійснюється за допомогою електронних термометричних сенсорів, які можуть бути побудовані на основі терморезисторів або термопар. Для невеликих об'ємів повітря доцільним є використання цифрових термодатчиків, що мають швидкий час реакції і мінімальну інерційність. Вимірювання проводиться у кількох точках теплиці, зокрема поблизу ґрунту, у середній частині та на рівні верхнього шару повітря, щоб зафіксувати можливі температурні градієнти. Дані про температуру подаються у вигляді цифрового сигналу на мікроконтролер, який забезпечує їхнє усереднення та подальший аналіз.

Контроль вологості повітря є однією з найважливіших складових мікрокліматичного моніторингу. Для цього використовуються ємнісні або резистивні гігрометри, які визначають зміну електричних характеристик під дією водяної пари. Сенсори розміщуються в центральній частині міні-теплиці, щоб уникнути впливу локальних конденсатів, які часто утворюються на стінках. Отримані дані дозволяють розрахувати як відносну, так і абсолютну вологість повітря, що дає змогу оцінити рівень насичення середовища водяною парою та визначити можливість появи конденсації.

Рівень освітленості визначається за допомогою фотодіодних або фотометричних сенсорів, які перетворюють інтенсивність світлового потоку у відповідний електричний сигнал. Вимірювання світла має особливе значення для міні-теплиць, де доступ природного сонячного випромінювання часто обмежений площею покриття або кутом падіння променів. Точність

вимірювання освітленості дає змогу регулювати штучне підсвічування і забезпечувати необхідний фотоперіод для росту рослин.

Оцінювання концентрації вуглекислого газу проводиться за допомогою мініатюрних інфрачервоних газоаналізаторів, які визначають поглинання випромінювання певної довжини хвилі молекулами CO₂. Такі сенсори можуть працювати у безперервному режимі, забезпечуючи стабільний контроль рівня газу, що є критично важливим для процесу фотосинтезу. В умовах міні-теплиці, де обмін повітря з навколишнім середовищем є обмеженим, навіть короткочасне зниження концентрації CO₂ може призвести до уповільнення росту рослин, тому вимірювання цього параметра повинно здійснюватися з високою частотою оновлення даних.

Вимірювання параметрів ґрунтового середовища також входить до складу мікрокліматичного моніторингу. За допомогою ґрунтових датчиків вологості визначається рівень води у зоні кореневої системи, що дозволяє оцінити ефективність зрошення. Температурні сенсори, розміщені у ґрунті, фіксують динаміку нагрівання та охолодження підстилкового шару, що є важливим показником стабільності мікроклімату. У деяких випадках здійснюється також контроль кислотності ґрунту, оскільки рН впливає на доступність поживних речовин і загальний фізіологічний стан рослин.

Сенсорні дані, отримані під час вимірювання, обробляються мікроконтролером або комп'ютерною системою, яка виконує фільтрацію шумів, усереднення та корекцію похибок. Застосування цифрових алгоритмів дозволяє компенсувати вплив зовнішніх факторів, таких як перепади напруги, коливання температури корпусу датчика чи ефект старіння сенсорів. Для підвищення точності вимірювань використовується калібрування сенсорів, яке здійснюється періодично або автоматично, залежно від конструкції системи.

Важливою характеристикою методики вимірювання є узгодженість часових інтервалів збору даних з фізичними процесами, що відбуваються у теплиці. Занадто рідкісна фіксація показників може призвести до втрати інформації про короткочасні коливання параметрів, тоді як надто часте

вимірювання створює надмірне навантаження на систему збору даних. Тому вибір оптимальної частоти зчитування є невід'ємною частиною методики контролю мікроклімату.

У сучасних міні-теплицях методики вимірювання поступово інтегруються у загальні системи автоматизованого керування, які поєднують моніторинг, аналіз і регулювання в єдиному інформаційному середовищі. Такий підхід дозволяє створювати динамічну модель мікроклімату, у якій усі параметри перебувають у взаємозалежності, а їхнє вимірювання стає основою для подальшої оптимізації процесів підтримання стабільного середовища. Таким чином, методики вимірювання параметрів мікроклімату в міні-теплиці забезпечують науково обґрунтований підхід до контролю умов вирощування рослин, поєднуючи точність сенсорних технологій із можливостями інтелектуальної обробки даних [11].

2.3 Методи прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці

Методи прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці спрямовані на передбачення майбутніх змін внутрішніх умов середовища з метою забезпечення стабільності ростових процесів і підвищення ефективності автоматизованого керування. Прогнозування ґрунтується на використанні математичних, статистичних і алгоритмічних підходів, що дозволяють оцінювати тенденції зміни температури, вологості, освітленості та інших характеристик середовища на основі поточних і історичних даних. Такий підхід є важливою складовою систем інтелектуального контролю, оскільки він дозволяє не лише реагувати на відхилення від норми, а й запобігати їм шляхом завчасного коригування параметрів системи підігріву, вентиляції або зволоження.

У міні-теплицях, де об'єм внутрішнього повітря є невеликим, а зміни умов можуть відбуватися надзвичайно швидко, застосування прогнозних моделей дає можливість стабілізувати середовище навіть за різких зовнішніх

коливань температури або вологості. Основою більшості методів прогнозування є моделювання фізичних процесів, що відбуваються всередині теплиці. Такі процеси описуються рівняннями теплового балансу, масообміну та вологообміну, у яких враховується взаємодія між температурою повітря, вологістю, швидкістю випаровування води, сонячною радіацією та роботою системи підігріву. Відомі параметри, отримані з вимірювальних сенсорів, підставляються у ці рівняння для визначення тенденцій розвитку мікроклімату в найближчий період часу.

Для підвищення точності прогнозування в умовах реальної експлуатації застосовуються методи статистичного аналізу, які враховують історичні ряди даних. На основі часових залежностей температури та вологості створюються моделі, що дозволяють виявити закономірності змін і прогнозувати їх на певний часовий горизонт. Такі підходи часто реалізуються у вигляді авторегресійних моделей або моделей ковзного середнього, які використовують попередні вимірювання для розрахунку майбутніх значень. Для короткострокових прогнозів у межах декількох годин ці методи є особливо ефективними, оскільки вони не потребують складних обчислень і здатні адаптуватися до мінливих умов середовища.

З розвитком інформаційних технологій значного поширення набули алгоритми прогнозування, побудовані на основі машинного навчання. Вони дозволяють аналізувати багатофакторні залежності між параметрами мікроклімату, які неможливо точно описати аналітичними формулами. Такі системи навчаються на великих обсягах даних, що включають вимірювання температури, вологості, освітленості, швидкості вітру за межами теплиці та інтенсивності сонячного випромінювання. На основі цих даних алгоритм формує внутрішню модель тепличного середовища, здатну передбачати, як змінюватимуться параметри в залежності від зовнішніх впливів. Для цього можуть використовуватися нейронні мережі або гібридні моделі, що поєднують фізичні рівняння з емпіричними залежностями.

Особливе значення у прогнозуванні мають моделі теплової інерційності, які враховують здатність конструкцій теплиці акумулювати тепло та поступово його віддавати. У невеликих теплицях цей фактор є особливо помітним, оскільки тонкі покривні матеріали швидко реагують на зміну зовнішньої температури. Врахування таких характеристик дозволяє більш точно оцінити час, необхідний для стабілізації температури після зміни інтенсивності опалення або вентиляції. Водночас важливо враховувати вплив випаровування з поверхні ґрунту чи рослин, що створює додаткову затримку у зміні вологості повітря, і цей ефект також включається у прогнозні алгоритми.

Для оцінювання точності прогнозу використовується порівняння обчислених значень параметрів із фактичними даними, отриманими під час наступних вимірювань. На основі аналізу похибки система коригує свої моделі, підвищуючи їхню відповідність реальним умовам. Такий процес може бути реалізований у вигляді адаптивного прогнозування, коли модель постійно оновлює свої коефіцієнти відповідно до поточного стану середовища.

Інтеграція прогнозних методів у загальну систему керування міні-теплицею дозволяє створити замкнений цикл регулювання, у якому поточні вимірювання використовуються не лише для корекції, а й для запобігання небажаним відхиленням. Наприклад, якщо модель передбачає зниження температури внаслідок нічного охолодження, система заздалегідь активує обігрів або зменшує інтенсивність вентиляції, забезпечуючи плавну зміну параметрів без різких коливань. Таким чином, прогнозування стає невід'ємною частиною інтелектуального керування мікрокліматом, поєднуючи вимірювальні технології, математичне моделювання та алгоритмічний аналіз у єдину систему, здатну забезпечувати стабільність умов вирощування рослин у динамічно змінному середовищі [12].

Методи прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці є важливим елементом побудови автономних систем керування, оскільки дозволяють не лише реагувати на зміну умов у реальному часі, але й передбачати їх розвиток, своєчасно коригуючи роботу системи підігріву, вентиляції та

енергозабезпечення. Для автономних установок, що працюють від сонячної енергії, прогнозування має особливе значення, адже від доступності енергії та температурних коливань залежить стабільність функціонування обладнання та збереження оптимального мікроклімату для рослин.

Найпростішим і найбільш поширеним підходом у прогнозуванні параметрів мікроклімату є аналіз історичних даних, які накопичуються у локальних або хмарних системах зберігання. На основі таких даних система може визначати типові добові коливання температури та освітленості, що особливо характерно для теплиць, де існує чітка залежність між інтенсивністю сонячного випромінювання та нагріванням внутрішнього простору. Наприклад, при фіксації кількох днів поспіль із подібним рівнем освітленості система може передбачити, що в години найбільшої сонячної активності температура перевищить порогові значення, і завчасно активувати вентиляцію або обмежити роботу підігріву.

Другим важливим методом є використання поточних показників освітленості як індикатора майбутнього теплового стану теплиці. У розроблюваній системі датчик освітленості виконує не лише функцію реєстрації світла, а й дозволяє прогнозувати можливість генерації енергії сонячною панеллю. Якщо рівень освітленості зранку досягає певного порогу, система передбачає достатній заряд акумулятора протягом дня і може активніше використовувати вентилятор чи нагрівальний елемент. У випадку недостатнього рівня освітленості або похмурої погоди система переходить у енергозберігаючий режим, обмежуючи роботу виконавчих пристроїв, що запобігає повному розрядженню акумулятора.

До прогнозних методів також належить застосування порогово-гістерезисного аналізу зміни температури. Якщо система фіксує стійке наближення температури до критичного значення із заданою швидкістю, вона може завчасно активувати вентиляцію, не чекаючи фактичного перегріву. Це дозволяє уникнути різких температурних коливань, що є шкідливими для рослин, та забезпечити більш плавне регулювання теплового режиму.

Перспективним напрямом є використання простих моделей трендового прогнозування, що базуються на ковзному середньому або екстраполяції попередніх значень. Такі математичні методи можуть бути реалізовані у середовищі Node-RED за допомогою функціональних блоків або додаткових модулів обробки даних. Це дозволяє системі передбачати майбутні зміни параметрів і автоматично коригувати алгоритми керування.

У більш розвинених реалізаціях можливе застосування зовнішніх джерел даних, зокрема інформації про прогноз погоди через веб-API. Інтеграція з такими сервісами дає змогу системі отримувати дані про майбутню температуру та сонячну активність, що підвищує точність прогнозування. Наприклад, якщо прогнозується зниження температури у нічний час, система може завчасно активувати підігрів або оптимізувати заряд акумулятора протягом дня.

Особливої уваги потребує прогнозування енергетичного балансу автономної системи. Оскільки живлення міні-теплиці залежить від сонячної панелі, важливим є передбачення рівня доступної енергії. На основі даних про напругу акумулятора та освітленість система може оцінювати залишкові енергетичні ресурси та приймати рішення щодо обмеження роботи вентиляції чи підігріву, забезпечуючи безперебійну роботу контролера та системи моніторингу.

Таким чином, методи прогнозування параметрів мікроклімату дозволяють підвищити ефективність роботи автоматизованої системи, забезпечити стабільні умови для вирощування рослин і оптимізувати використання енергоресурсів. Комбінування аналізу історичних даних, прогнозування на основі поточних показників і застосування зовнішніх джерел інформації створює передумови для побудови інтелектуальних тепличних систем, здатних адаптуватися до змін навколишнього середовища без потреби у постійному втручанні користувача [13].

Методи прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці відіграють важливу роль у забезпеченні стабільних умов вирощування рослин та

ефективної роботи автономних систем керування. Оскільки міні-теплиці часто працюють у змінних кліматичних умовах та мають обмежені енергетичні ресурси, здатність системи не лише реагувати на зміни, а й передбачати їх, дозволяє уникати різких коливань температури, запобігати перегріву або надмірному охолодженню, а також оптимізувати витрати енергії. Найпростішим та найбільш поширеним підходом до прогнозування є аналіз історичних даних, що накопичуються системою. Завдяки повторюваним добовим циклам температури та освітленості, система може визначати типові значення для певних годин доби й передбачати розвиток мікроклімату. Наприклад, якщо протягом кількох попередніх днів рівень освітленості зранку був подібним до поточного, система може прогнозувати підвищення температури ближче до полудня та заздалегідь активувати вентиляцію. Такий метод є простим у реалізації, не потребує додаткових ресурсів і забезпечує достатню точність у стабільних умовах, проте його ефективність знижується під час різких змін погоди.

Другим важливим прогнозним методом є аналіз трендів – ковзного середнього або лінійної екстраполяції. Якщо температура зростає певними темпами (наприклад, 2°C за 10 хвилин), система може передбачити, що через певний час буде досягнуто порогового значення, і увімкнути вентиляцію завчасно. Цей підхід зменшує кількість різких температурних коливань, дозволяючи нагрівальним та вентиляційним елементам працювати плавніше. Недоліком є чутливість до шумів та нестабільних даних датчика, через що інколи потрібні фільтри або додаткове згладжування.

У системах, що працюють на сонячній енергії, особливо важливе значення має використання показників освітленості як індикатора майбутнього стану мікроклімату та доступної енергії. Якщо зранку датчик освітленості, наприклад ВН1750, фіксує низькі значення, система передбачає слабке сонячне нагрівання теплиці та низький заряд акумулятора, тому обмежує роботу вентилятора або інших енергоспоживчих елементів. Цей метод є дуже ефективним для автономних систем, оскільки дозволяє підтримувати роботу

контролера та забезпечувати базовий моніторинг навіть при недостатній кількості сонячного світла.

До прогнозних методів також належить аналіз енергетичного балансу системи, що враховує поточний рівень заряду акумулятора, інтенсивність освітленості та швидкість розряду під час роботи виконавчих пристроїв. Прогнозування того, як зміниться напруга акумулятора протягом дня, дозволяє оптимізувати час роботи вентиляції та підігріву й уникати ситуацій, коли система може втратити живлення. Наприклад, якщо розрахунки показують, що при поточному рівні зарядки та низькій освітленості акумулятор до вечора розрядиться до критичних значень, система автоматично переходить у режим енергозбереження.

Більш вдосконаленими методами прогнозування є використання зовнішніх джерел даних, зокрема прогнозів погоди через веб-API. Така інформація дає системі змогу заздалегідь реагувати на очікуване похолодання, підвищення температури або зміну кількості сонячного світла. Наприклад, якщо прогноз погоди попереджає про зниження температури вночі, система може оптимізувати роботу підігріву або зменшити витрати енергії вдень, щоб зберегти заряд акумулятора. Однак цей метод вимагає доступу до Інтернету, що не завжди можливо в автономних тепличних комплексах.

Найточнішими є методи прогнозування, що ґрунтуються на машинному навчанні. Вони дозволяють моделювати складні залежності між різними параметрами мікроклімату та енергетичними характеристиками. Навіть прості моделі машинного навчання, такі як лінійна регресія або дерева рішень, здатні суттєво підвищити точність прогнозування температури або вологості. Такі моделі можна реалізувати на Raspberry Pi у зв'язці з Node-RED і Python. Однак вони потребують значного обсягу історичних даних, ретельної підготовки та більших обчислювальних ресурсів, тому їх застосування є доцільним лише в системах, де пріоритетом є висока точність.

Отже, кожен із методів прогнозування має свої переваги та недоліки. Аналіз історичних даних і використання освітленості як прогнозного

індикатора є простими, енергоефективними та оптимально підходять для автономних міні-теплиць. Методи трендового аналізу забезпечують більш плавне керування, тоді як прогнозування енергетичного балансу гарантує стабільну роботу системи навіть за умов обмеженої енергії. Використання зовнішніх API та машинного навчання забезпечує найвищу точність, проте вимагає додаткових ресурсів і не завжди може бути застосоване в автономних умовах. Найкращим рішенням є комбінування кількох методів, що дозволяє побудувати надійну та гнучку систему прогнозування параметрів мікроклімату міні-теплиці [14].

2.4 Сучасні системи передачі та обміну даних

Збір та зберігання даних про параметри мікроклімату теплиці є невід'ємною складовою сучасних систем автоматизованого керування. Ці дані формуються на основі вимірювань температури, вологості, освітленості, концентрації CO₂, швидкості циркуляції повітря та стану ґрунтового середовища, і вони необхідні для аналізу, прогнозування та регулювання мікроклімату. Сучасні технології зберігання забезпечують не лише надійність, але й можливість масштабування та інтеграції з аналітичними і прогностичними системами.

На практиці використовуються декілька підходів до зберігання даних. Традиційні локальні бази даних дозволяють зберігати вимірювання безпосередньо на контролерах або комп'ютерах, підключених до сенсорної мережі. При цьому дані організуються у вигляді таблиць або часових рядів, що забезпечує зручність аналізу та швидкий доступ до історичної інформації. Сучасні системи дедалі частіше застосовують розподілені бази даних і хмарні сервіси, що дозволяє зберігати великі обсяги даних, отриманих від численних сенсорів, а також забезпечує доступ до них із будь-якого пристрою через інтернет. Використання хмарних платформ дозволяє реалізувати інтеграцію з

системами штучного інтелекту, аналітичними алгоритмами та програмними моделями прогнозування мікроклімату.

Зберігання даних у хмарі або на локальних серверах передбачає застосування стандартів і протоколів, що забезпечують цілісність і безпеку інформації. Дані, що надходять від сенсорів у вигляді цифрових сигналів, спочатку обробляються контролером, після чого передаються через мережу до сховища. На етапі передачі застосовуються методи шифрування та аутентифікації, що запобігає несанкціонованому доступу та підробці інформації. Додатково система зберігання може здійснювати архівування та резервне копіювання, що підвищує стійкість до відмов і втрати даних.

Архітектура системи контролю підігріву та параметрів мікроклімату теплиці (рис. 2.2) зазвичай будується за модульним принципом і включає кілька рівнів функціонування. На нижньому рівні розташовуються сенсорні модулі, які здійснюють безперервний збір даних про температуру, вологість, освітленість, газовий склад повітря та стан ґрунту. Ці сенсорні вузли можуть бути підключені безпосередньо до локального контролера або об'єднані у мережу з використанням дротових або бездротових каналів зв'язку.



Рисунок 2.2 – Система вентиляції [15]

Середній рівень архітектури включає центральний контролер або мікрокомп'ютер, який обробляє дані, формує сигнали управління для виконавчих пристроїв і реалізує алгоритми регулювання. Тут застосовуються класичні PID-алгоритми, адаптивне регулювання та прогнозні моделі, що дозволяють забезпечувати стабільний мікроклімат. Контролер виконує аналіз показників, порівнює їх із заданими еталонними значеннями та генерує команди для систем підігріву, вентиляції, зволоження та освітлення.

Верхній рівень системи відповідає за архівування, візуалізацію та інтеграцію з зовнішніми сервісами. Дані з центрального контролера передаються у базу даних, де вони зберігаються у вигляді часових рядів і дозволяють проводити історичний аналіз, будувати графіки та моделі прогнозування. Користувач отримує доступ до інформації через інтерфейс у вигляді веб-додатку або мобільного програмного забезпечення, що дозволяє віддалено контролювати стан теплиці, змінювати параметри та отримувати повідомлення про відхилення від нормальних значень.

Взаємодія між усіма рівнями архітектури здійснюється через стандартизовані протоколи передачі даних. Локальні сенсори можуть використовувати цифрові шини або бездротові стандарти, такі як Zigbee, LoRaWAN чи Wi-Fi, тоді як передача даних до хмарного сховища здійснюється через інтернет із застосуванням TCP/IP та захищених каналів. Така архітектура забезпечує безперервний збір, обробку та зберігання даних, створюючи основу для ефективного автоматизованого керування підігрівом і параметрами мікроклімату.

Таким чином, сучасні технології зберігання даних у поєднанні з модульною архітектурою системи контролю забезпечують точність, надійність і гнучкість управління умовами вирощування рослин у теплиці. Вони дозволяють організувати безперервний моніторинг, аналіз і прогнозування, інтегруючи сенсорні технології, обчислювальні алгоритми та хмарні сервіси в єдину інформаційно-керувальну систему [16].

2.5 Архітектура системи контролю підігріву і параметрів мікроклімату теплиці

Технології зберігання даних про параметри мікроклімату теплиці відіграють важливу роль у побудові сучасних тепличних систем, оскільки їх ефективне функціонування базується не лише на вимірюванні параметрів середовища, а й на можливості накопичення, аналізу та використання історичних даних для оптимізації режимів роботи. Збереження інформації про температуру, вологість, освітленість і стан енергоживлення дає змогу прогнозувати теплові процеси в теплиці, коригувати режими вентиляції та підігріву, підвищувати енергоефективність системи та забезпечувати стабільні умови для вирощування рослин.

У автономних тепличних комплексах, особливо тих, що працюють на основі сонячної енергії, найбільш поширеним є комбінований підхід до зберігання даних. Короткострокові показники зберігаються локально на мікрокомп'ютері Raspberry Pi, що дозволяє системі працювати незалежно від наявності підключення до мережі Інтернет. Для цього використовуються прості та енергоощадні формати, такі як CSV або JSON, або вбудована база даних SQLite, яка забезпечує швидкий доступ і низьке навантаження на обладнання. Водночас локальне зберігання має певні обмеження, зокрема ризик втрати інформації у разі збоїв живлення та обмежений обсяг пам'яті, що стимулює використання додаткових механізмів резервування.

Для довготривалого накопичення даних застосовуються часові бази даних, зокрема InfluxDB, які оптимізовані для роботи з часовими рядами та забезпечують високу швидкість запису та доступу. Їх інтеграція з аналітичними інструментами, такими як Grafana, дозволяє виконувати глибоку аналітику й оцінювати динаміку змін мікроклімату з метою прогнозування та оптимізації роботи системи. У випадку наявності підключення до мережі Інтернет система може передавати агреговані дані у хмарні сервіси, наприклад Google Sheets,

Firebase або ThingSpeak, що забезпечує доступ до інформації з будь-якого місця, можливість резервного копіювання та віддалений моніторинг.

Архітектура системи контролю підігріву та параметрів мікроклімату теплиці базується на поєднанні апаратної та програмної складових, які забезпечують автономну роботу й адаптивність до енергетичних умов. Основним обчислювальним вузлом виступає Raspberry Pi, який отримує дані від датчиків температури, вологості та освітленості, виконує їх обробку та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів, таких як вентилятор і нагрівальний елемент. Виконання логіки керування реалізується у середовищі Node-RED, що дозволяє створювати та редагувати алгоритми у вигляді потокових схем і забезпечує зручний веб-інтерфейс для моніторингу стану системи.

Живлення системи здійснюється від сонячної панелі через контролер заряду та акумулятор, що забезпечує енергонезалежність і можливість роботи в умовах віддалених територій. Контролер заряду відстежує рівень напруги і запобігає надмірному розряду батареї, переводячи систему в режим енергозбереження у разі зниження живлення до критичного рівня. Виконавчі пристрої підключаються через реле або MOSFET, що гарантує безпечне керування навантаженням.

Node-RED виступає ключовою програмною платформою, адже забезпечує збирання та обробку даних, автоматичне керування підігрівом та вентиляцією, зберігання показників, а також надає користувачу доступ до панелі керування, де відображаються поточні параметри мікроклімату, графіки змін та стан обладнання. Завдяки візуальному програмуванню система може бути легко розширена, наприклад шляхом додавання функцій поливу, контролю рівня CO₂ або інтеграції зі службами сповіщення, такими як Telegram.

Таким чином, поєднання автономного живлення, інтелектуальної обробки даних і ефективних технологій їх збереження забезпечує надійну та енергоощадну роботу тепличної системи. Використання локальних і хмарних

механізмів зберігання інформації створює умови для гнучкого управління мікрокліматом, підвищення продуктивності та розширення функціональності без суттєвих змін у структурі системи. Архітектура, заснована на Raspberry Pi та Node-RED, є масштабованою та придатною для впровадження як у малих приватних теплицях, так і у більш складних аграрних комплексах[17].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТЕПЛИЦІ НА БАЗІ NODE-RED ІЗ ЖИВЛЕННЯМ ВІД СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1 Принципи розробки установки та функціональні вимоги

В даному розділі розробимо концепцію установки системи обігріву та вентиляції теплиці на базі Node-RED, яка працює автономно від сонячної енергії, із врахуванням кліматичних та енергетичних умов. Метою проєкту є забезпечити енергоощадне керування вентиляцією в теплиці за допомогою платформи Node-RED з урахуванням: температурних умов; рівня освітленості (як індикатору генерації сонячної енергії); стану живлення від сонячної панелі.

Принцип роботи установки базується на температурному регулюванні. Якщо температура в теплиці більша заданого порогу (наприклад, 30° C) – вмикається вентилятор. Якщо температура менша або рівна цього порогу – вентилятор вимикається.

Датчик освітленості оцінює наявність сонячного світла. Якщо рівень освітленості нижчий за критичний поріг (наприклад, < 200 лк), вважається, що сонячна генерація закінчена, і вентилятор не запускається або вимикається для економії енергії.

Контроль живлення виконується з урахуванням наступного – контролер заряду відслідковує рівень заряду акумулятора та забезпечує безпечне живлення Raspberry Pi та вентилятора.

Якщо напруга падає нижче критичного значення – вимикається навантаження і система переходить у енергозбереження. Архітектуру та компоненти даної установки опишемо наступним чином: обчислювальна платформа базується на технології Raspberry Pi (модель 3/4) із встановленим програмним забезпеченням Node-RED, автозавантаження Node-RED здійснюється при запуску системи.

Використовувані виконавчі пристрої:

– 5 В або 12 В вентилятор, керований через MOSFET/реле;

– ввімкнення/вимкнення – через GPIO Raspberry Pi.

Система живлення:

- сонячна панель (12-18 В), контролер заряду MPPT або PWM;
- акумулятор Li-ion або AGM 12 В;
- перетворювач 5 В (step-down buck) для живлення Raspberry Pi.

Логіка та структура потоків (flows) на базі технології Node-RED описується наступною схемою (рис. 3.1):

```
[DHT22 TEMP] → [function: if TEMP > THRESHOLD] → [check LIGHT level] → [GPIO OUT: Fan ON/OFF]
[BH1750]      → [function: if LIGHT > 200 lx → allow fan]
[INA219]     → [function: if voltage < 11.5V → disable fan]
```

Рисунок 3.1 – Логіка та структура потоків

Основні блоки логіки включають температурний контроль, перевірку світла, перевірку напруги живлення, інтерфейсний вивід з наступними особливостями:

- температурний контроль – switch node визначає, чи перевищує температура заданий поріг;
- перевірка світла: якщо світла недостатньо – «ніч», вентилятор не вмикається;
- перевірка напруги живлення;
- захист системи: якщо живлення критичне – вимикає вентиляцію.

Інтерфейс (dashboard):

- вивід температури, освітленості, статусу вентилятора, рівня напруги;
- кнопка «ручного режиму» для діагностики.

Node-RED Dashboard (інтерфейс) здійснює вивід графіків температури, освітленості, напруги, індикаторів стану (вентилятор увімкнено чи вимкнено), джерела живлення, кнопок управління (ручне керування чи автомат, перезапуск).

Електронна схема блоку управління на базі Raspberry Pi показана на рисунку 3.2.

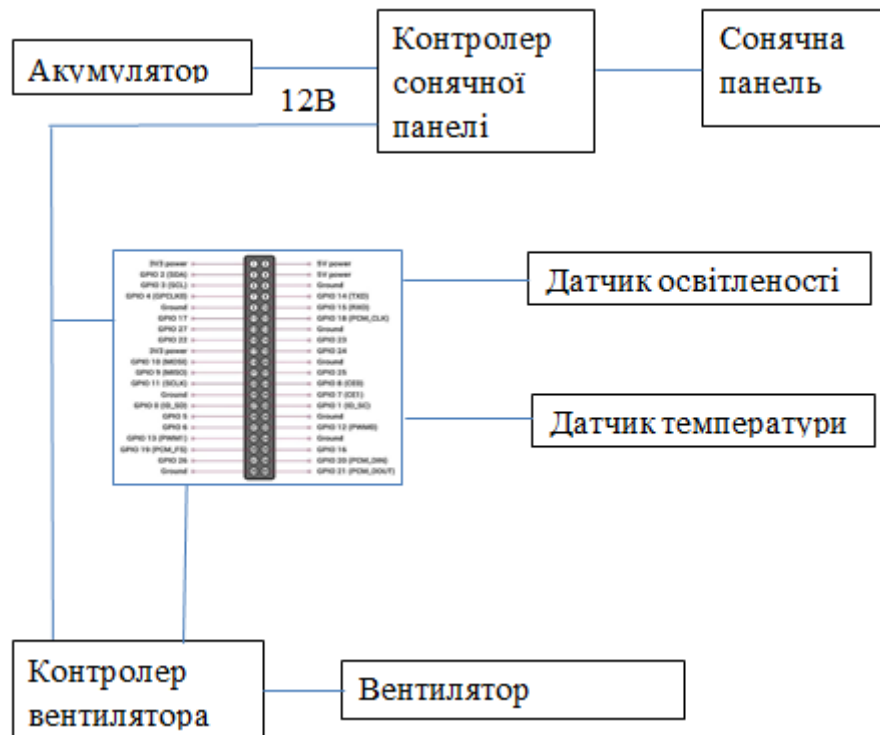


Рисунок 3.2 – Електронна схема блоку управління

Переваги такої архітектури системи є наступні:

- енергонезалежність – установка працює автономно без зовнішньої електромережі;
- економія ресурсу батареї – вентилятор працює лише в сприятливих умовах;
- простота масштабування – можна додати інші функції – зрошення, вентиляцію, сигналізацію;
- висока адаптивність – змінювати пороги можна прямо з веб-інтерфейсу.

Можливе розширення стосується логування в базу даних (InfluxDB або Google Sheets), сповіщення у Telegram про критичні умови (перегрів, низька напруга), віддаленого моніторингу через VPN або облачні сервіси.

3.2 Опис установки та блок-схема системи обігріву теплиці

Система обігріву теплиці побудована на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi, який здійснює збір, обробку та аналіз температурних даних від сенсорів, та, відповідно до заданих порогів, керує увімкненням/вимкненням нагрівального елемента. Взаємодія між компонентами реалізується за допомогою протоколів GPIO, а логіка управління – у середовищі Node-RED або Python-скриптами.

Принцип роботи установки базується на наступному: при температурі навколишнього середовища вище певного заданого значення включається вентилятор, при пониженні – відключається (рис. 3.3).

Живлення Raspberry Pi – автономне, від сонячної панелі чи акумулятора контролюється контролером. Датчик освітленості також аналізує, чи достатньо енергії видають сонячні панелі. Якщо сонячний день закінчився – вентилятор відключається.



Рисунок 3.3 – Блок-схема обігріву теплиці

Основні блоки системи (рис. 3.4) – це:

– джерело живлення на базі сонячної панелі, що живить Raspberry Pi, датчики та виконавчі пристрої, це адаптер 5 В для Raspberry Pi та окреме джерело (12 В або 220 В) для нагрівача;

– Raspberry Pi, що включає центральний обчислювальний блок та обробляє дані від датчиків температури та приймає рішення про увімкнення обігріву;

– температурний датчик (наприклад, DHT22 або DS18B20), що встановлений у теплиці для постійного моніторингу температури повітря. Підключається до GPIO-порту Raspberry Pi;

– блок керування реле, що приймає сигнал від Raspberry Pi, вмикає або вимикає нагрівальний елемент (обігрівач, ТЕН, ІЧ-обігрівач тощо), ізолює високовольтну частину від Raspberry Pi;

– нагрівач, що зв'язаний з джерелом тепла в теплиці та керується реле на основі сигналу з Raspberry Pi;

– інтерфейс користувача на базі Node-RED Dashboard. Відображає температуру, стан системи обігріву, дозволяє вручну керувати нагрівачем, задавати пороги;

– логіка контролю на базі Node-RED, що аналізує показники з датчиків, вмикає реле, якщо температура нижча за заданий поріг, вимикає реле, якщо температура вища або рівна верхньому порогу;

– система оснащена мережевим мобільним сповіщенням – за допомогою Telegram-бота.

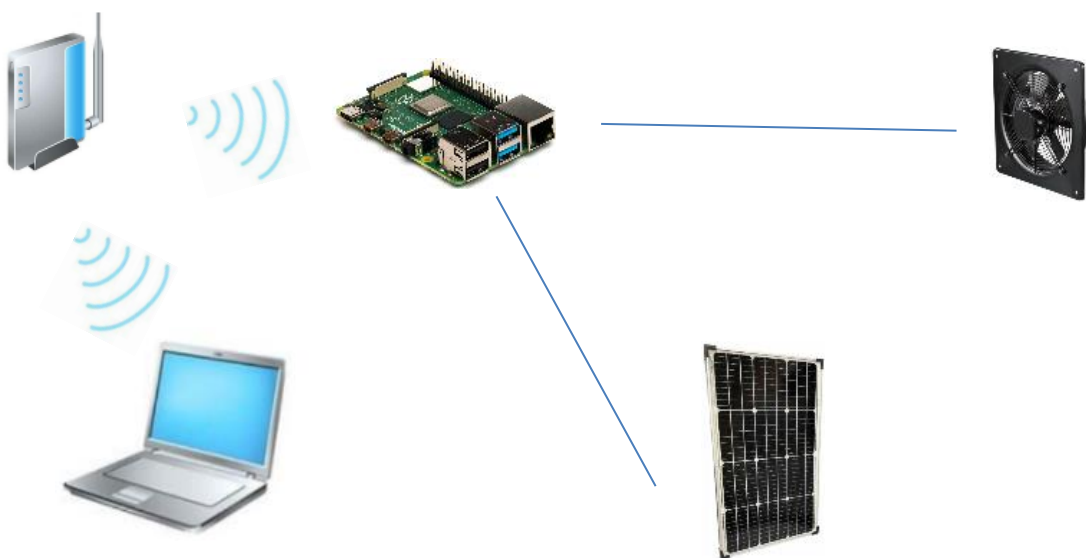


Рисунок 3.4 – Блок-схема управління

3.3 Вибір технічних засобів та виконавчих механізмів

3.3.1 Вентилятор ATCool 9025 корпусного типу

Для здійснення охолодження та вентиляції електронних пристроїв в установці важливу роль відіграють малогабаритні корпусні вентилятори постійного струму. Одним із таких пристроїв є вентилятор ATCool 9025, який застосовується для забезпечення стабільного теплообміну в умовах обмеженого простору, зокрема в корпусах мікрокомп'ютерів, блоках живлення та розподільчих щитах.

ATCool 9025 є вентилятором з осьовим потоком повітря, побудованим на основі втулкової конструкції (тип підшипника – втулка). Живлення вентилятора здійснюється від джерела постійного струму з номінальною напругою 12 В, при цьому споживаний струм становить 0,1 А, що відповідає потужності 1,2 Вт.

Основні технічні характеристики:

- швидкість обертання – 2200 об/хв;
- продуктивність повітряного потоку – 65,58 м³/год;
- статичний тиск потоку – 1,78 мм Н₂О;
- рівень шуму – 29,6 дБ;
- розміри корпусу – 92 × 92 × 25 мм;
- тип роз'єму підключення – 3-pin;
- матеріал корпусу – пластмаса.

Даний вентилятор для розроблюваної установки вибрано завдяки оптимальному співвідношенню габаритів, рівня шуму та повітряної продуктивності, вентилятор ATCool 9025 є ефективним рішенням для використання у вбудованих автоматизованих системах контролю температури. Його застосування дозволяє підтримувати належні теплові умови функціонування чутливої електроніки, зокрема в конструкціях теплиць, лабораторного обладнання або мікросерверів на базі Raspberry Pi.

3.3.2 Датчик температури та вологості DHT22

В даній установці використовується для автоматизованого моніторингу мікрокліматичних параметрів сенсори температури та вологості з високою точністю та стабільністю. Одним із найбільш поширених і надійних рішень є датчик DHT22 (AM2302) виробництва компанії AOSONG. Він використовується в широкому спектрі прикладних задач, зокрема в аграрних, екологічних та метеорологічних системах, а також у проєктах з використанням мікроконтролерів та одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi.

DHT22 є цифровим датчиком, що забезпечує високу точність вимірювання температури та вологості, має заводське калібрування та ультранизьке енергоспоживання, що робить його придатним для автономних систем і проєктів з живленням від акумуляторів або енергоощадних джерел.

До основних характеристик датчика належать:

- тип: AM2302 (цифровий);
- діапазон вимірювання температури: від -40 до $+80^{\circ}\text{C}$;
- діапазон вимірювання вологості: від 0 % до 100 % RH;
- точність вимірювання температури: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- точність вимірювання вологості: $\pm 2\%$ RH;
- роздільна здатність (точність передачі даних): $0,1^{\circ}\text{C}$;
- напруга живлення: від 3,6 до 6 В;
- кількість виводів: 4;
- не потребує зовнішніх компонентів (обов'язки);
- здатний працювати з довгими з'єднувальними проводами без втрати точності.

Завдяки поєднанню високої точності, простоти інтеграції та надійної роботи в широкому діапазоні температур, DHT22 є придатним для використання в системах автоматичного клімат-контролю, зокрема в теплицях, розумних будинках або мобільних екологічних станціях. Його застосування у поєднанні з обчислювальними платформами дозволяє реалізовувати точне й енергоефективне керування вентиляцією, обігрівом або зрошенням.

3.3.3 Сонячна батарея 50 Вт моно, АХ-50М АХІОМА energy

У даному проєкті використано монокристалічну сонячну панель АХ-50М (рис. 3.5) виробництва Ахіома Energy, призначену для автономного живлення невеликих електроспоживачів. Основні технічні характеристики її наступні:

- номінальна потужність: 50 Вт;
- напруга на холостому ході (V_{oc}): 22,3 В;
- напруга на робочій точці (V_{mp}): 18,0 В;
- струм при максимальній потужності (I_{mp}): 2,78 А;
- ККД: >17 %;
- розміри: 670 × 540 × 30 мм;
- тип осередків: монокристал кремнію.



Рисунок 3.5 – Сонячна батарея 50 Вт моно [18]

Панель застосовується в даній установці і можна стабільно забезпечувати енергією мікроконтролери, датчики та виконавчі пристрої в умовах відсутності централізованого електропостачання.

3.4 Обґрунтування вибору середовища програмування та розробка програмної частини установки

3.4.1 Застосування технології Node-Red

Особливості використання технології Node-RED для розроблюваної установки обігріву та контролю клімату в теплиці: автоматизація цих

процесів є ключовим чинником підвищення ефективності теплиці, зменшення енерговитрат та забезпечення стабільної якості продукції. Одним із перспективних інструментів для реалізації розроблюваної системи обігріву та моніторингу клімату є технологія Node-RED – візуальне середовище розробки, що базується на платформі Node.js і дозволяє створювати потоки обробки даних у вигляді графічних блок-схем.

Node-RED забезпечує гнучкий механізм інтеграції з різними датчиками (температури, вологості, освітленості, вуглекислого газу тощо), контролерами, а також виконавчими пристроями – обігрівачами, вентиляторами, насосами для зрошення. Завдяки підтримці протоколів MQTT, Modbus, HTTP та ін., платформа може взаємодіяти з широким спектром пристроїв Інтернету речей (IoT), що забезпечує централізоване управління мікрокліматом у теплиці.

Ключовими функціональними можливостями Node-RED у даній установці є:

- реалізація алгоритмів керування на основі умовних логічних блоків – наприклад, автоматичне вмикання обігрівача при зниженні температури нижче заданого порогу;

- графічне відображення параметрів середовища в реальному часі з використанням дашбордів (Node-RED Dashboard), що дозволяє оперативно реагувати на зміни;

- запис і аналіз історичних даних, що сприяє оптимізації режимів опалення та вентиляції;

- можливість віддаленого керування через веб-інтерфейс або мобільні пристрої.

Ефективність використання Node-RED у тепличних умовах підтверджена численними дослідженнями та експериментальними впровадженнями. За умови правильної калібровки датчиків і налаштування сценаріїв обігріву, така система дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання (до 20-30 %) без погіршення умов росту рослин.

Таким чином, застосування Node-RED у розроблюваній установці є доцільним і перспективним напрямом розвитку цифрового сільського господарства. Відкритість платформи, її сумісність з апаратними компонентами різного рівня складності, а також низький поріг входження роблять її доступною як для промислових агрокомплексів, так і для невеликих фермерських господарств.

Node-RED є однією з найбільш адаптивних платформ для створення систем керування мікрокліматом у теплицях, це середовище розробки з відкритим вихідним кодом, що дає змогу проєктувати логіку обробки даних у вигляді блокових схем. Node-RED дозволяє об'єднувати численні датчики, виконавчі пристрої та хмарні сервіси через інтерфейс потокового програмування. Це значно полегшує створення адаптивних систем керування теплицею навіть для користувачів без глибоких знань у галузі програмування.

3.4.2 Принципи розробки програмної частини установки

Розроблювана система обігріву та контролю клімату має такі основні складові:

- датчики – DHT22 для вимірювання температури та вологості повітря;
- BH1750 – для вимірювання освітленості;
- контролери: ESP32 або Raspberry Pi – збір та передача даних до Node-RED;
- виконавчі пристрої: реле для керування обігрівачем, вентилятор з ШІМ-регулюванням, зволожувач/насос;
- протоколи зв'язку: MQTT (Mosquitto-брокер), HTTP/WebSocket;
- інтерфейс – Node-RED Dashboard для моніторингу та керування.

Сценарій інтеграції у середовище Node-RED базується на моніторингу параметрів. Потік починається з вузла `mqtt in`, який приймає дані з датчиків (температура, вологість, ін.). Отримані значення надходять до вузлів `function`, де здійснюється логічна обробка (наприклад: «якщо температура < 18° С – активувати обігрів»). Дані паралельно передаються до `ui_gauge` та `ui_chart`

для візуалізації на дашборді.

Автоматичне керування обігрівом реалізується через вузол switch, який аналізує вхідні температурні значення. Якщо температура нижча за встановлений поріг – сигнал передається до вузла mqtt out, який активує реле обігрівача. Після стабілізації температури вузол delay дозволяє уникнути частого перемикання пристрою.

Віддалене керування та інтерфейс реалізується через Node-RED Dashboard, у якому користувач має змогу:

- переглядати поточні показники;
- вручну вмикати чи вимикати обігрів або вентиляцію;
- змінювати порогові значення для автоматичного режиму;
- переглядати графіки зміни кліматичних параметрів у часі.

Схематичне зображення потоку в Node-RED (рис. 3.6):



Рисунок 3.6 – Схематичне зображення потоку

Цей потік реалізує просту систему, яка автоматично вмикає обігрів при падінні температури нижче 18° С, а також виводить дані на дашборд.

Має місце також інтеграція з хмарними сервісами. Node-RED дозволяє інтегрувати систему з платформами для зберігання та аналізу даних, такими як:

- InfluxDB + Grafana – для довгострокового збереження кліматичних даних і побудови глибокої аналітики;
- Google Sheets API – автоматичне логування показників;

– Telegram Bot API – надсилання сповіщень у разі аварійного відхилення температури або вологості.

3.4.3 Переваги застосування Node-RED в установці обігріву та керування кліматом теплиці

Перевагами застосування Node-RED є висока адаптивність до потреб користувача, простота налаштування та масштабування, візуальна наочність процесів автоматизації, легке поєднання з мікроконтролерами, базами даних, хмарними сервісами. Адже, Node-RED – це потужний інструмент для розробки інтелектуальних систем контролю клімату в теплицях, який поєднує гнучкість програмного забезпечення з доступністю апаратної частини. Завдяки можливості візуального програмування, глибокої інтеграції з IoT-пристроями та широкому спектру підтримуваних протоколів, платформа надає агровиробникам ефективний інструмент для створення енергоощадного та адаптивного рішення.

Також застосування Node-RED має низку технологічних, економічних та функціональних переваг. Завдяки своїй відкритій архітектурі та модульному підходу, ця платформа забезпечує просте, ефективне й масштабоване вирішення задач моніторингу та керування мікрокліматом, адже візуальне програмування має низький поріг входження. При цьому однією з головних переваг Node-RED є інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, який дозволяє створювати складні логічні алгоритми керування без необхідності писати великі обсяги коду. Користувач «будує» логіку системи за допомогою блоків (вузлів) і з'єднань між ними. Це особливо корисно це для аграріїв, які не мають глибокої технічної освіти, у навчальних закладах при викладанні основ автоматизації, для швидкого прототипування систем.

Крім того, опишемо також наступні переваги.

– гнучка інтеграція з обладнанням та протоколами. Node-RED підтримує широкий спектр апаратних пристроїв і стандартів зв'язку, а саме – мікроконтролери ESP8266, ESP32, Arduino, Raspberry Pi; промислові

контролери: Siemens, Schneider (через Modbus, OPC-UA); протоколи обміну: MQTT, HTTP, TCP/IP, WebSocket, LoRaWAN, Zigbee, системи збору даних GPS, датчики DHT22, DS18B20, SHT31, BME280 тощо.

Це дозволяє використовувати як недорогі DIY-компоненти, так і промислове обладнання, легко інтегрувати існуючу інфраструктуру теплиці в єдину систему управління, створювати модульні рішення, які легко оновлюються або розширюються:

– підтримка інтелектуального керування. Node-RED дозволяє реалізовувати адаптивні або інтелектуальні системи керування. Наприклад, автоматичне навчання оптимальних режимів обігріву на основі історичних даних, динамічне регулювання системи обігріву залежно від погодних умов (через API прогнозу погоди), мультифакторне прийняття рішень: температура + вологість + рівень освітлення = режим роботи обігрівача. При цьому можна також інтегрувати інструменти машинного навчання (ML), наприклад, через зв'язки з Python, TensorFlow або Jupyter Notebook, що робить Node-RED придатним для створення прогнозних або самонавчальних систем;

– вбудовані засоби візуалізації. Node-RED має вбудований модуль Dashboard, що дозволяє створити веб-інтерфейс для: перегляду температури, вологості, освітленості в реальному часі, зміни порогових значень керування обігрівачем або вентиляцією, перегляду графіків зміни параметрів за день, тиждень чи місяць, дистанційного керування пристроями через кнопки або перемикачі.

Такі функції дозволяють фермеру або оператору оперативно приймати рішення, дистанційно стежити за теплицею з будь-якого пристрою, швидко виявляти та реагувати на аварійні ситуації;

– масштабованість і повторне використання компонентів. Система, побудована в Node-RED, легко масштабується до нових теплиць, секторів, ділянок, до нових типів датчиків або виконавчих пристроїв, до інших функцій (наприклад, полив, живлення, CO₂-додавання). Можна зберігати і

використовувати типові блоки (flows) повторно, що зменшує час розробки нових проєктів, сприяє уніфікації та стандартизації підходів;

– хмарні сервіси, сповіщення та API. Node-RED можна інтегрувати з багатьма зовнішніми платформами: Telegram, Slack, Email – для сповіщень, Google Sheets, InfluxDB, Firebase – для зберігання даних, IFTTT, Home Assistant, OpenWeatherMap API – для зв'язку з іншими системами. Це забезпечує створення розумного агро-екосередовища, де теплиця не є ізольованою системою, а частиною взаємопов'язаного комплексу;

– відкритий код та активна спільнота. Node-RED має велику міжнародну спільноту, яка постійно розробляє нові вузли, ділиться схемами потоків, документацією, прикладами коду. Завдяки цьому можна знайти готові рішення, легко адаптувати проєкт до власних умов, спростити навчання та обмін досвідом. Платформа є повністю безкоштовною, що робить її привабливою для малого та середнього бізнесу, фермерських господарств, а також для використання у навчальному процесі.

Отже, Node-RED є потужним, доступним і гнучким інструментом для побудови інтелектуальних систем автоматизації клімату в теплицях, а тому це є обгрунтованим вибором для нашого проєкту. Його основні переваги – візуальне програмування, інтеграція з IoT-пристроями, адаптивне керування, масштабованість, підтримка хмарних сервісів та активна спільнота – роблять цю платформу надзвичайно привабливою для впровадження в аграрний сектор.

3.5 Налаштування Node-RED на мікрокомп'ютері Raspberry Pi

3.5.1 Процес інсталяції та особливості розробки програми в середовищі

Node-RED – це потужне середовище розробки з відкритим кодом, створене для графічного програмування потік-орієнтованих систем. Воно дозволяє легко інтегрувати апаратні пристрої, API та онлайн-сервіси за допомогою інтуїтивного інтерфейсу. Завдяки своїй простоті та гнучкості

Node-RED широко застосовується в проєктах Інтернету речей (IoT), автоматизації, моніторингу та керування. Raspberry Pi як енергоефективна, портативна та доступна обчислювальна платформа, є оптимальним середовищем для розгортання Node-RED.

Розглянемо процес інсталяції та первинного налаштування Node-RED на мікрокомп'ютері Raspberry Pi. Для реалізації процесу налаштування використовується мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B з операційною системою Raspberry Pi OS (на базі Debian Linux). Базові вимоги включають підключення до інтернету, наявність microSD-карти об'ємом не менше 16 ГБ та встановлений пакет менеджер `pnpm`.

Інсталяція Node-RED на Raspberry Pi може бути виконана за допомогою офіційного скрипта, що автоматизує процес установки: `bash <(curl -sL https://raw.githubusercontent.com/node-red/linux-installers/master/deb/update-nodejs-and-nodered)`. Цей скрипт встановлює Node.js, Node-RED, необхідні залежності та налаштовує автозапуск сервісу при старті системи. Після завершення установки рекомендовано виконати перезавантаження системи. Після інсталяції Node-RED запускається як системна служба. Перевірити її статус можна за допомогою команди: `systemctl status nodered.service`. Інтерфейс користувача доступний через веб-браузер за адресою: `http://<IP-адреса Raspberry Pi>:1880`.

У середовищі можна створювати потоки (flows) з використанням готових блоків (nodes), що представляють собою окремі функціональні одиниці (наприклад, обробка даних, надсилання повідомлень, робота з MQTT тощо).

Для забезпечення базового рівня безпеки рекомендується:

- увімкнути аутентифікацію користувача в `settings.js`;
- змінити стандартний порт доступу;
- обмежити доступ до інтерфейсу через брандмауер або VPN.

Отже, інтеграція Node-RED із Raspberry Pi забезпечує ефективно, масштабоване та енергоефективне рішення для розробки IoT-додатків. Простота налаштування, велика спільнота користувачів та підтримка великої

кількості протоколів роблять цю комбінацію привабливою як для навчальних, так і для промислових проєктів.

Зокрема, керування датчиком температури й вологості DHT22 здійснюється наступним чином: датчик DHT22 підключається до одного з GPIO-портів Raspberry Pi. Для зчитування даних з цього датчика використовується бібліотека `node-dht-sensor`, яка має підтримку в `Node.js`. Підключення проводиться таким чином:

- VCC в 3,3 V;
- DATA в GPIO4 (пін 7);
- GND в GND.

У терміналі необхідно встановити бібліотеку для роботи з DHT-сенсорами: `npm install node-dht-sensor`. Також у Node-RED через Palette Manager додається модуль `node-red-contrib-dht-sensor`.

Створення потоку в Node-RED виконується наступним способом:

- блок `rpi-dht22` – налаштовується на відповідний GPIO-порт (наприклад, GPIO4) та інтервал зчитування (наприклад, кожні 5 секунд);
- блок `debug` або `ui-gauge` (з `dashboard`-пакету) – використовується для виводу температури й вологості у вигляді цифрових значень або графіків;
- блок `switch` – дозволяє реалізувати логіку керування, наприклад, увімкнення вентилятора при перевищенні температури певного порогу.

Приклад логіки:

- якщо температура $> 30^{\circ}\text{C}$, надсилається сигнал увімкнення на реле;
- якщо температура $< 28^{\circ}\text{C}$ – вимкнення.

Програмний код має наступний вигляд, поданий в лістингу 3.1:

Лістинг 3.1 – Реалізація комунікації

```
{
  "id": "temp-sensor",
  "type": "rpi-dht22",
  "z": "flow-id",
  "name": "DHT22 Sensor",
  "topic": "sensor",
  "dht": 22,
```

```

"pintype": "0",
"pin": 4,
"x": 100,
"y": 100,
"wires": [["debug-node", "gauge-temp", "gauge-hum"]]
},

```

кінець лістингу 3.1

Для візуалізації даних використовується модуль `node-red-dashboard`. Додатково створюються елементи керування, наприклад:

- `ui_gauge` – відображення температури та вологості в реальному часі;
- `ui_switch` – ручне керування реле (наприклад, для вентилятора або зволожувача).

У зв'язку з потенційною відкритістю мережевого інтерфейсу Node-RED (рис. 3.7), доцільно:

- увімкнути аутентифікацію користувача в файлі `settings.js`;
- встановити HTTPS або реалізувати проксі-сервер з шифруванням;
- обмежити мережевий доступ через брандмауер (`ufw`).

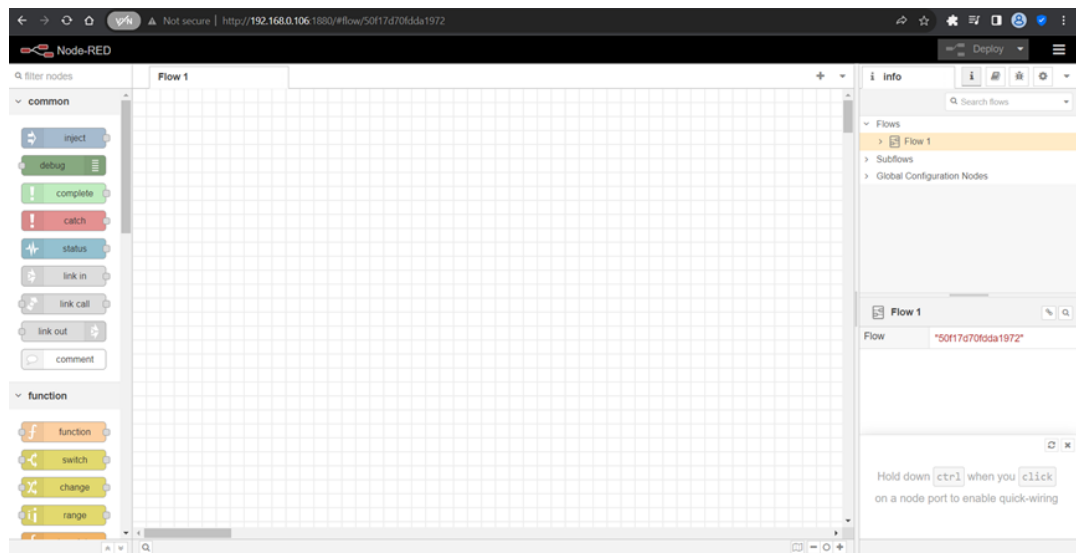


Рисунок 3.7 – Візуальний редактор Node-RED

Отже, Node-RED у поєднанні з Raspberry Pi дозволяє швидко розгорнути адаптивну систему збору та обробки даних з датчиків у середовищі Інтернету

речей. Використання графічного підходу до програмування полегшує розробку навіть для користувачів без глибоких знань у галузі програмування. У наведеному прикладі продемонстровано типову реалізацію системи моніторингу кліматичних показників із можливістю автоматичного або ручного керування зовнішніми пристроями.

3.5.2 Застосування Raspberry Pi OS для програмування датчиків в установці

З розвитком технологій Інтернету речей (IoT) та вбудованих систем зростає потреба у доступних, гнучких і надійних платформах для взаємодії з фізичними сенсорами. Raspberry Pi – це одна з найпоширеніших одноплатних платформ, що поєднує низьку вартість, високу функціональність та підтримку великої кількості периферійних пристроїв. Операційна система Raspberry Pi OS, офіційно підтримувана спільнотою Raspberry Pi Foundation, забезпечує стабільне середовище для розробки програмного забезпечення з доступом до GPIO-інтерфейсів та широкого спектру драйверів для датчиків.

Raspberry Pi OS базується на Debian Linux та оптимізована під апаратне забезпечення Raspberry Pi. Вона підтримує широкий спектр інструментів розробки, зокрема:

- мови програмування: Python, C/C++, JavaScript (Node.js);
- бібліотеки доступу до GPIO: RPi.GPIO, gpiozero, wiringPi (заархівовано), pigpio;
- пакети для роботи з I2C, SPI та UART-протоколами;
- системні інструменти для роботи з системним таймером, плануванням задач, мережевими підключеннями.

Завдяки цьому Raspberry Pi OS виступає повноцінним інструментом розробника для програмування взаємодії з фізичними сенсорами.

Програмування датчиків у Raspberry Pi OS відбувається наступним чином. Датчики є ключовим компонентом у розроблюваній системі як системі моніторингу, автоматизації, керування тепличним середовищем.

Програмування датчиків у Raspberry Pi OS передбачає:

- фізичне підключення до GPIO-портів;
- встановлення бібліотек для конкретного типу датчика;
- розробку скриптів на Python або JavaScript;
- запуск циклічного зчитування та обробки даних.

Підключення температурного датчика DHT22 здійснюється таким способом. Для програмного зчитування даних з DHT22 використовується Python-бібліотека Adafruit_DHT: `sudo apt-get install python3-pip; pip3 install Adafruit_DHT`.

Простий скрипт зчитування температури й вологості на мові Python подано в лістингу 3.2.

Лістинг 3.2 – Реалізація комунікації

```
import Adafruit_DHT
sensor = Adafruit_DHT.DHT22
pin = 4 # GPIO4
humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(sensor, pin)
if humidity is not None and temperature is not None:
    print(f"Температура = {temperature:.1f}° C, Вологість =
{humidity:.1f}%")
else:
    print("Не вдалося зчитати дані з датчика.")` `` }
```

кінець лістингу 3.2

Взаємодія з іншими інтерфейсами на базі наступного – Raspberry Pi OS забезпечує повну підтримку цифрових шин таких як:

- I2C – для датчиків тиску, компасів, гіроскопів (наприклад, BMP280, MPU6050);
- SPI – для швидкодіючих аналогових перетворювачів або дисплеїв;
- UART – для зв'язку з GPS-модулями, GSM-модемами.

Увімкнення відповідних інтерфейсів виконується через `raspi-config`. Виконується також інтеграція з Node-RED. Однією з переваг Raspberry Pi OS є її сумісність із Node-RED – середовищем візуального програмування. Це дозволяє поєднувати класичне скриптове програмування з графічним

налаштуванням логіки реагування на сигнали датчиків, розширюючи можливості системи без ускладнення коду. Наприклад, можна створити Python-скрипт, що зчитує дані з датчика, і публікує їх через MQTT. Node-RED, у свою чергу, приймає повідомлення та виконує подальшу обробку або відображення на інформаційній панелі.

Використання Raspberry Pi OS має такі переваги як сумісність із широким спектром сенсорів завдяки відкритій архітектурі Linux, гнучкість у виборі мов програмування та інструментів, широка підтримка спільноти, що забезпечує швидкий доступ до прикладів і технічної документації, можливість інтеграції з хмарними сервісами та платформами IoT (наприклад, ThingSpeak, AWS IoT, Blynk).

Отже, у даному проекті Raspberry Pi OS виступає як ефективне середовище для програмування датчиків у рамках IoT-систем та проектів автоматизації. Поєднання гнучкості операційної системи Linux з можливостями апаратної платформи Raspberry Pi дозволяє розробляти як прості прототипи, так і масштабовані розподілені системи збору даних. Інтеграція з середовищем Node-RED додатково підсилює ці можливості завдяки візуальній розробці логіки реагування та взаємодії пристроїв.

3.6 Програмний алгоритм роботи системи

Розробимо програмний алгоритм роботи системи обігріву чи вентиляції теплиці на базі Node-RED, а також блок-схему логіки роботи (рис. 3.8). Цей алгоритм враховує:

- температуру повітря;
- рівень освітленості;
- стан напруги живлення;
- можливість аварійного або ручного керування.

Алгоритм роботи системи (покроково):

- 1) початок. Запуск Raspberry Pi, автозавантаження Node-RED;

2) ініціалізація датчиків:

– DHT22 або BME280 – температура, вологість;

– BH1750 або LDR – освітленість;

– INA219 або аналог – напруга живлення;

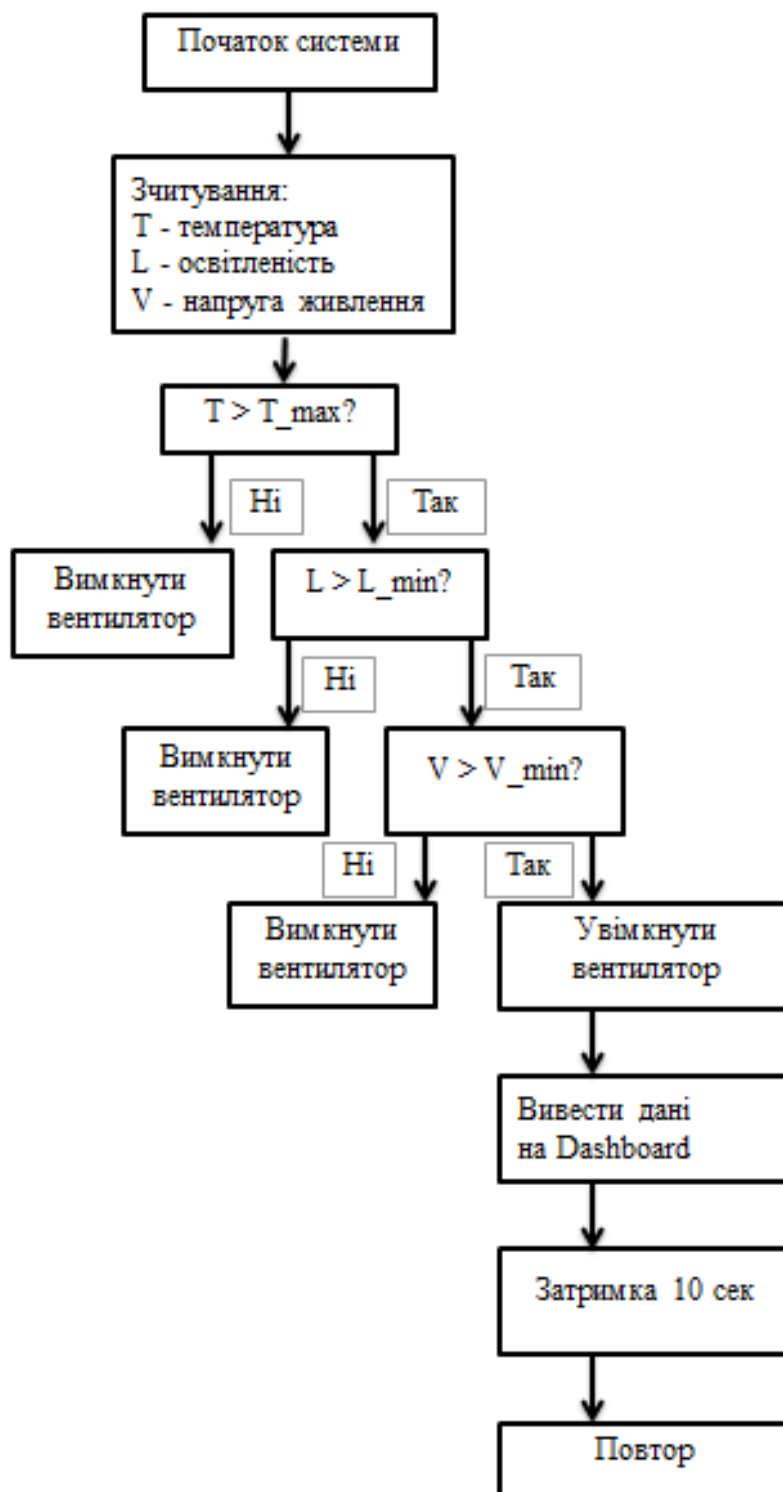


Рисунок 3.8 – Блок-схема логічного функціоналу програми

3) зчитування даних:

- зчитати температуру T (в $^{\circ}\text{C}$);
- зчитати освітленість L (в lx);
- зчитати напругу живлення V (в V);

4) умови запуску вентилятора. Якщо одночасно виконуються всі умови: $T > T_{\text{max}}$ (наприклад, 30°C), $L > L_{\text{min}}$ (наприклад, 200 лк), $V > V_{\text{min}}$ (наприклад, 11,5 V), то вентилятор увімкнено (GPIO HIGH);

5) умови вимкнення вентилятора. Якщо виконується хоча б одна з умов: $T \leq T_{\text{max}}$, $L \leq L_{\text{min}}$, $V \leq V_{\text{min}}$, то вентилятор вимкнено (GPIO LOW);

6) режим енергозбереження. Якщо $V \leq V_{\text{critical}}$ (наприклад, 11 V): вимкнути всі навантаження, встановити статус: «енергозбереження», надіслати повідомлення/сповіщення (опційно);

7) візуалізація на дашборді. Вивести:

- температуру, освітленість, напругу;
- стан вентилятора;
- індикатори живлення та порогів;
- статус (автомат, економія, ручний);

8) повторення циклу: затримка $\sim 5-10$ секунд (залежно від потужності системи);

9) перейти до кроку 2.

Додаткові особливості логіки визначаються наступним чином:

- ручний режим (через Node-RED Dashboard);
- користувач може примусово вмикати або вимикати вентилятор незалежно від умов;
- автоматичний режим активується за замовчуванням;
- сповіщення (опційно);
- надсилання повідомлень у Telegram при вході в енергозбереження.

Створимо блок-схему, скориставшись цим кодом у Python (потрібно встановити бібліотеку graphviz). Python-код для генерації блок-схеми є наступним (рис. 3.9-3.10):

```

import graphviz

dot = graphviz.Digraph(format='png')
dot.attr(rankdir='TB', size='10')

# Вузли
dot.node("start", "Початок системи", shape="ellipse", style="filled", fillcolor="lightgrey")
dot.node("read", "Зчитування даних:\nT = температура\nL = освітленість\nV = напруга", shape="box",
dot.node("check_temp", "T > T_max?", shape="diamond", style="filled", fillcolor="lightyellow")
dot.node("check_light", "L > L_min?", shape="diamond", style="filled", fillcolor="lightyellow")
dot.node("check_voltage", "V > V_min?", shape="diamond", style="filled", fillcolor="lightyellow")
dot.node("fan_on", "Увімкнути вентилятор", shape="box", style="filled", fillcolor="lightgreen")
dot.node("fan_off", "Вимкнути вентилятор", shape="box", style="filled", fillcolor="lightcoral")
dot.node("dashboard", "Вивід на Dashboard\n(T, L, V, статус вентилятора)", shape="box", style="rou
dot.node("delay", "Затримка 10 секунд", shape="box", style="filled", fillcolor="white")
dot.node("repeat", "Повернення до зчитування", shape="ellipse", style="filled", fillcolor="lightgr

```

Рисунок 3.9 – Python-код для генерації блок-схеми

```

# Зв'язки
dot.edge("start", "read")
dot.edge("read", "check_temp")
dot.edge("check_temp", "fan_off", label="Hi")
dot.edge("check_temp", "check_light", label="Так")
dot.edge("check_light", "fan_off", label="Hi")
dot.edge("check_light", "check_voltage", label="Так")
dot.edge("check_voltage", "fan_off", label="Hi")
dot.edge("check_voltage", "fan_on", label="Так")
dot.edge("fan_on", "dashboard")
dot.edge("fan_off", "dashboard")
dot.edge("dashboard", "delay")
dot.edge("delay", "repeat")
dot.edge("repeat", "read")

# Зберегти як PNG
dot.render("greenhouse_fan_control_flowchart", cleanup=True)

```

Рисунок 3.10 – Python-код для генерації блок-схеми

3.7 Етапи конструювання установки

Процес створення керованої установки регулювання мікроклімату теплиці складався з послідовних етапів, що включають розробку функціональних елементів, виконавчих модулів, інтеграцію електронних

модулів, створення плат, а також налагодження системи управління в цілому. Кожен з етапів формується на техніко-інженерних розрахунках, вимогах до безпечної експлуатації та стабільності роботи системи.

Проектування автономної смарт-системи керування мікрокліматом теплиці, живлення якої базується на використанні сонячної енергії, передбачає послідовне виконання низки інженерних і програмно-апаратних етапів. Структурна схема системи (рис. 3.11) визначає основні апаратні компоненти, їхню взаємодію та функціональні зв'язки, що забезпечують моніторинг параметрів середовища та керування вентиляцією у режимі реального часу.

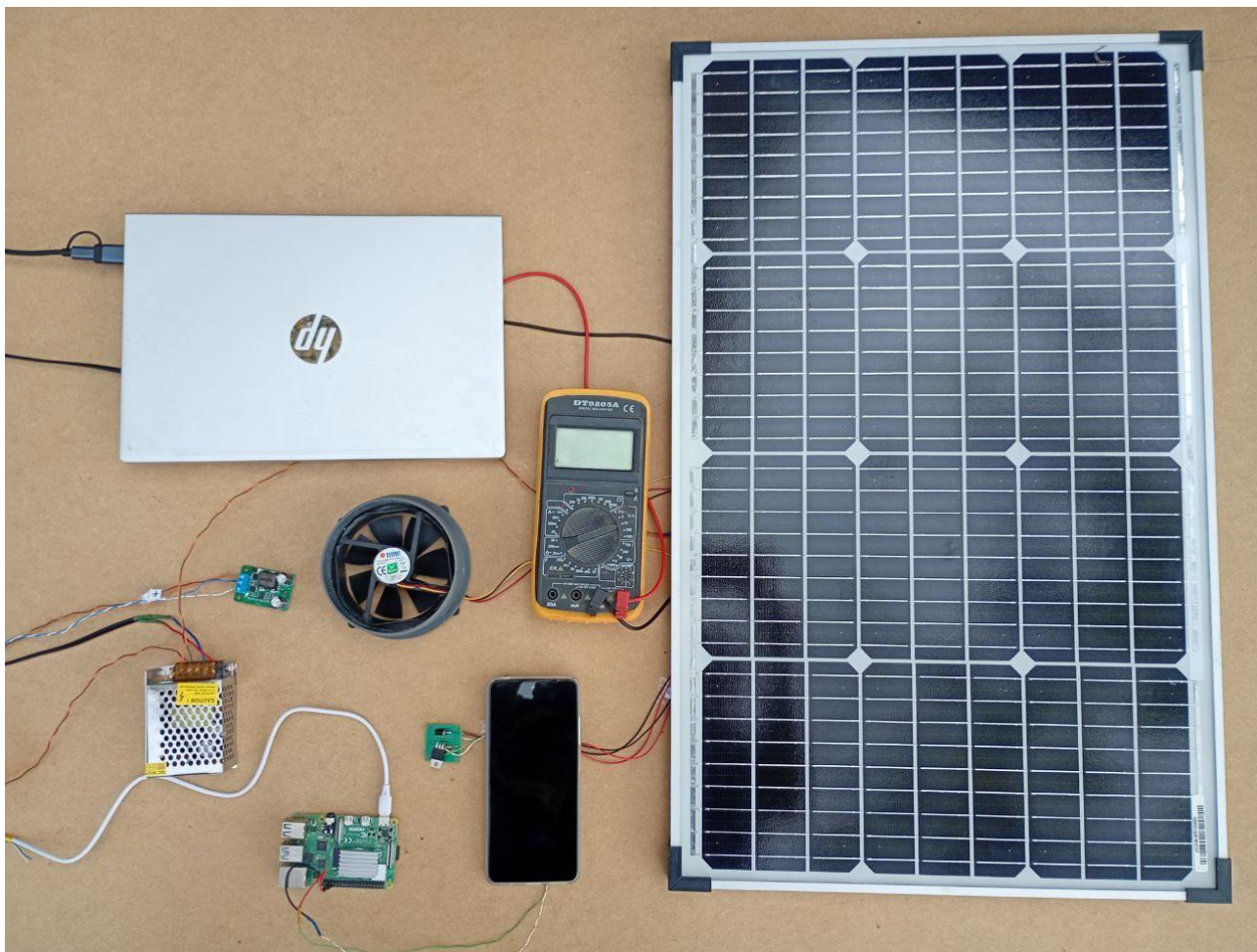


Рисунок 3.11 – Проектування установки з сонячною панеллю

1) формування енергетичної підсистеми (рис. 3.12-3.13). На початковому етапі виконується підбір та інтеграція джерела електроживлення – сонячної панелі та акумулятора. Сонячна панель через контролер заряду забезпечує

стабільне живлення акумулятора й усієї системи на рівні 12 В. Контролер заряду виконує функції стабілізації напруги, захисту від перезаряду та оптимізації енергоспоживання. Така конфігурація дозволяє досягти повної автономності системи та мінімізувати залежність від традиційних джерел живлення (рис. 3.14);

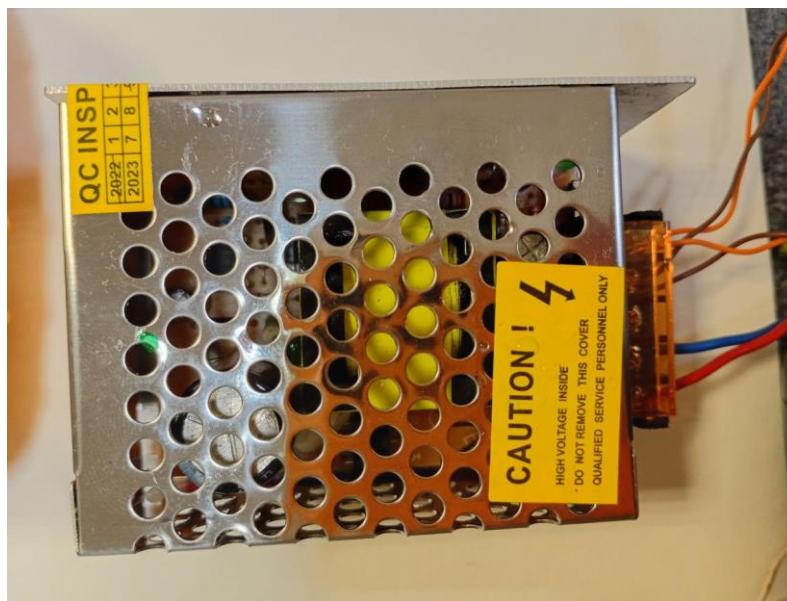


Рисунок 3.12 – Блок живлення

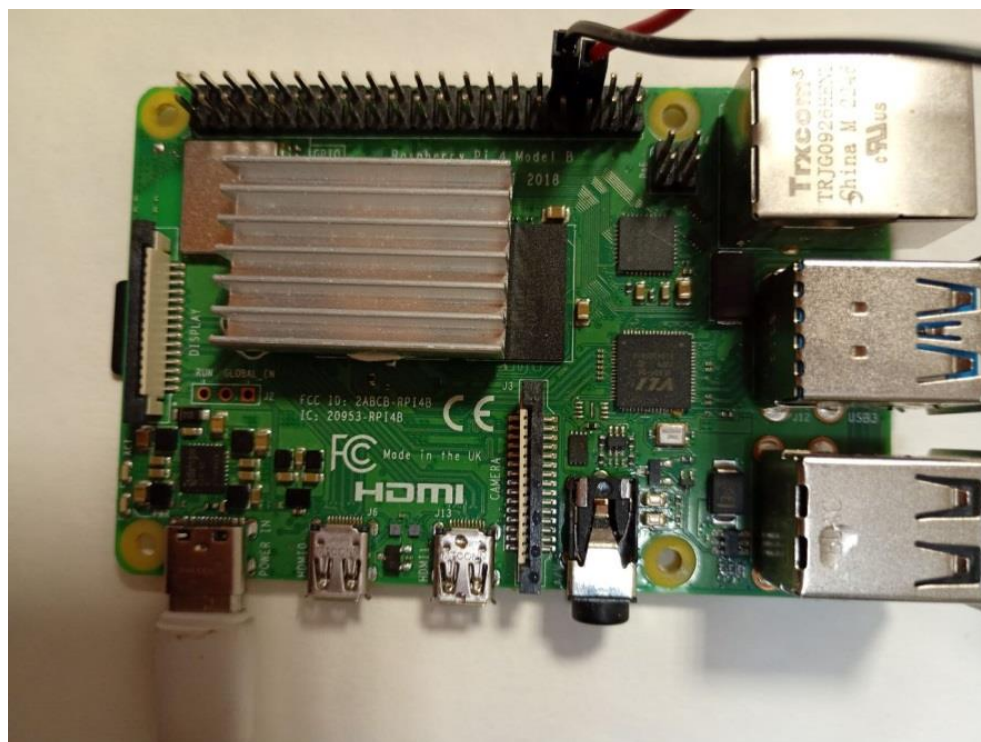


Рисунок 3.13 – Мікрокомпютер Raspberry Pi

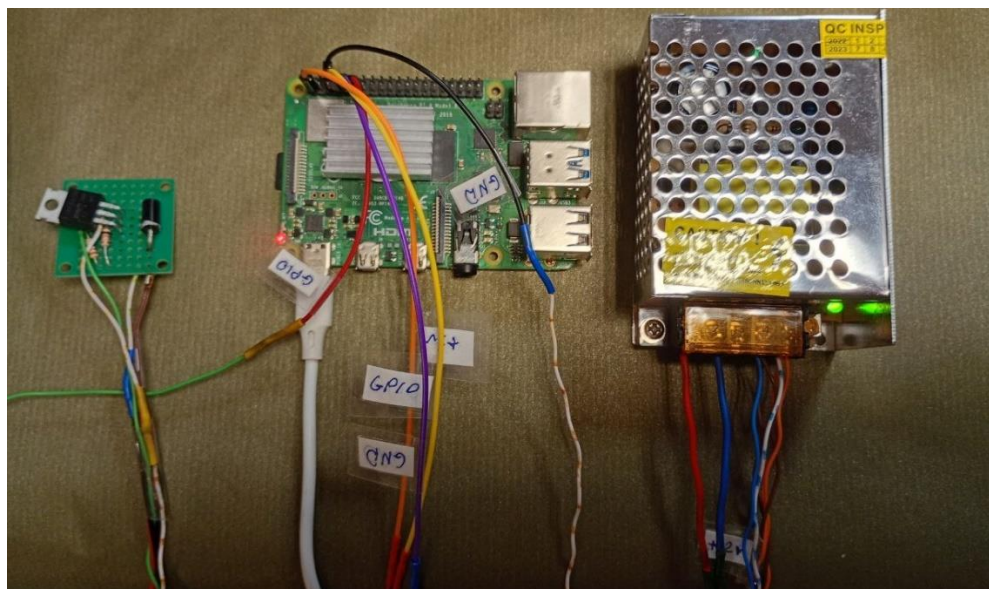


Рисунок 3.14 – Система елементів керування

2) проєктування вимірювальної підсистеми. Центральним елементом керування виступає мікроконтролер Raspberry Pi, до якого підключаються датчики вимірювання стану середовища (рис. 3.15):

– датчик освітленості – для контролю інтенсивності сонячного випромінювання;

– датчик температури – для визначення теплових характеристик внутрішнього мікроклімату.

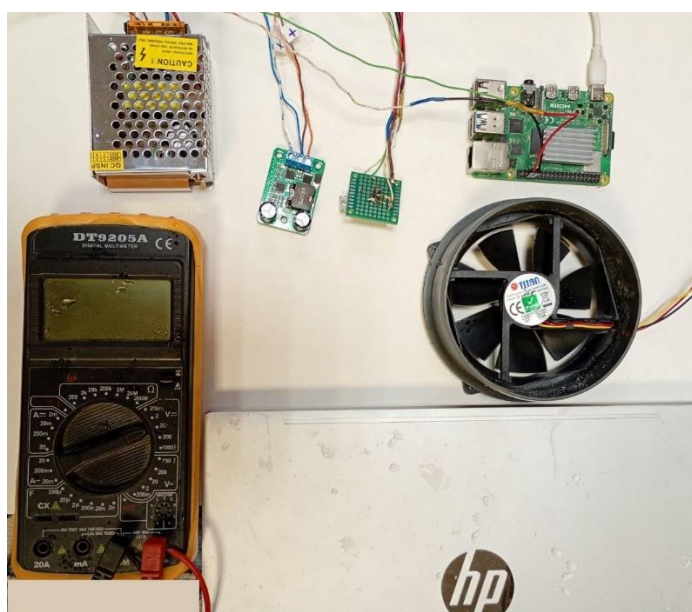


Рисунок 3.15 – Система управління, вимірювання та виконавчий елемент

Під час проєктування здійснюється вибір типів датчиків з урахуванням їх точності, енергоспоживання та сумісності з інтерфейсами GPIO центрального контролера. Забезпечується налаштування їх електричних параметрів та створення єдиної системи вимірювання, що формує достовірні дані для подальшої обробки;

3) розробка виконавчої підсистеми. На основі даних сенсорів система формує керувальні сигнали для впливу на мікроклімат теплиці. Виконавчим елементом є вентилятор, що відповідає за охолодження внутрішнього простору. Між мікроконтролером і вентилятором інтегрується контролер вентилятора, який забезпечує:

- перетворення цифрових сигналів у керувальні імпульси;
- регулювання швидкості обертання вентилятора;
- захист електричної схеми від перевантаження.

Таким чином створюється адаптивна система вентиляції, яка реагує на зміну температури в теплиці;

4) інтеграція апаратних модулів у єдину систему керування. З урахуванням схеми виконується розподіл логічних зв'язків між компонентами: мікроконтролер отримує живлення від акумулятора, сприймає дані з датчиків та віддає керувальні команди до виконавчого модуля. На цьому етапі здійснюється проєктування та оптимізація електричних з'єднань, вибір перерізу кабелів, розміщення блоків та забезпечення електробезпеки;

5) розробка алгоритмів керування. Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує логіку автоматичного контролю мікроклімату: зчитування даних сенсорів, фільтрація шумів, порівняння отриманих значень із заданими порогамі, активація вентилятора при перевищенні допустимих норм температури. Додатково можуть реалізовуватись функції ведення журналу даних або передавання інформації у хмарні сервіси (рис. 3.16-3.17).

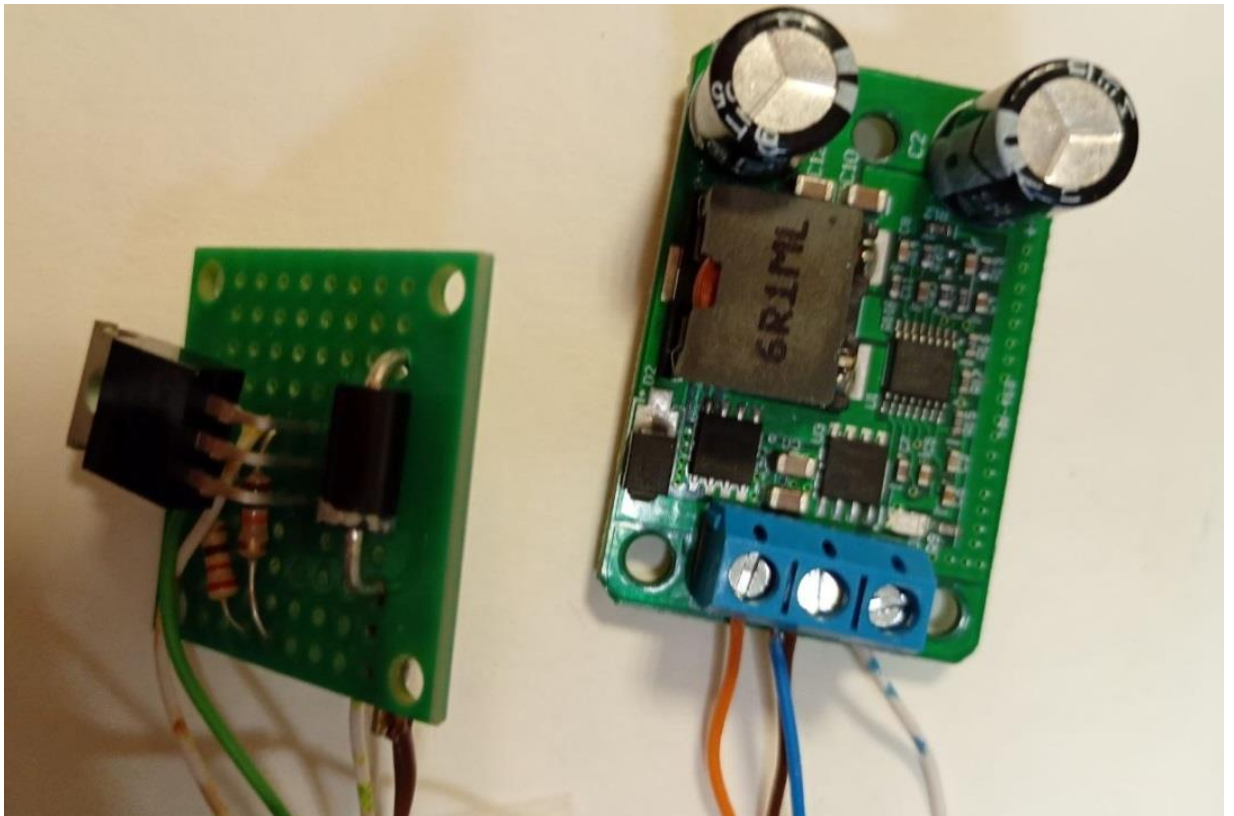


Рисунок 3.16 – Пристрої керування та блок живлення

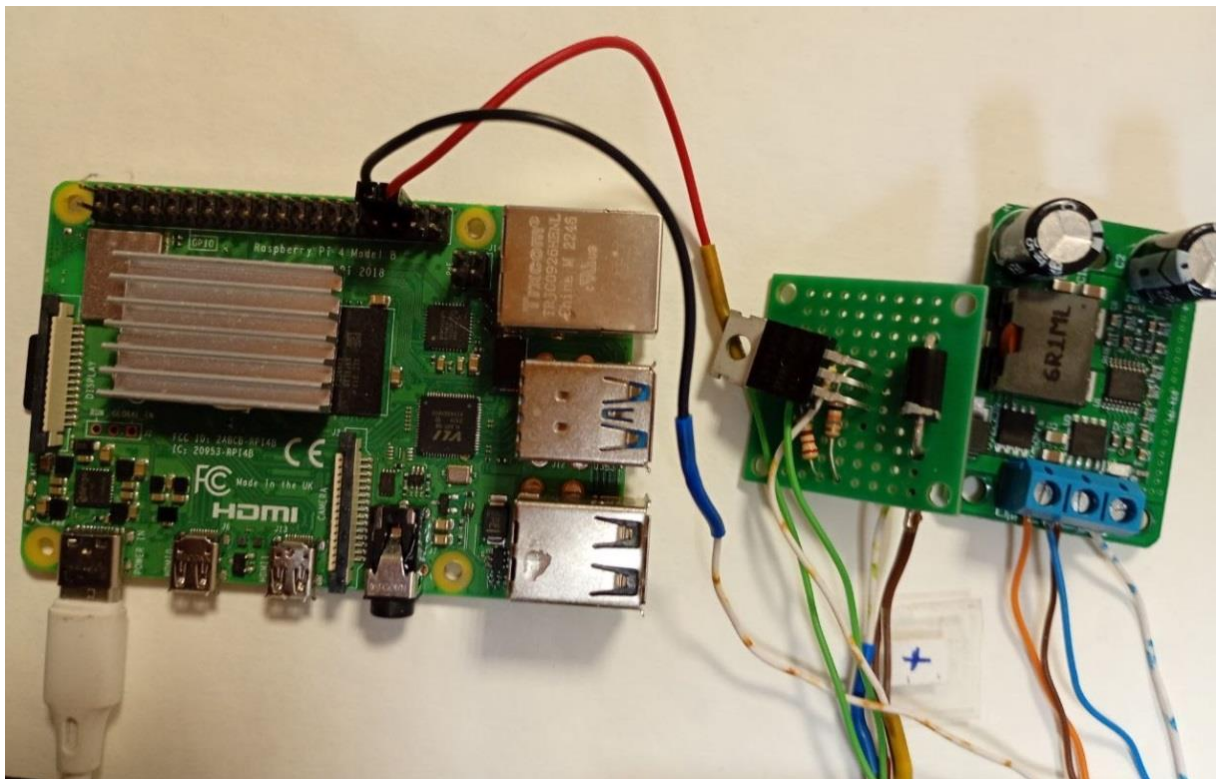


Рисунок 3.17 – Модуль керування

Система керування та передачі даних зображена на рисунку 3.18.

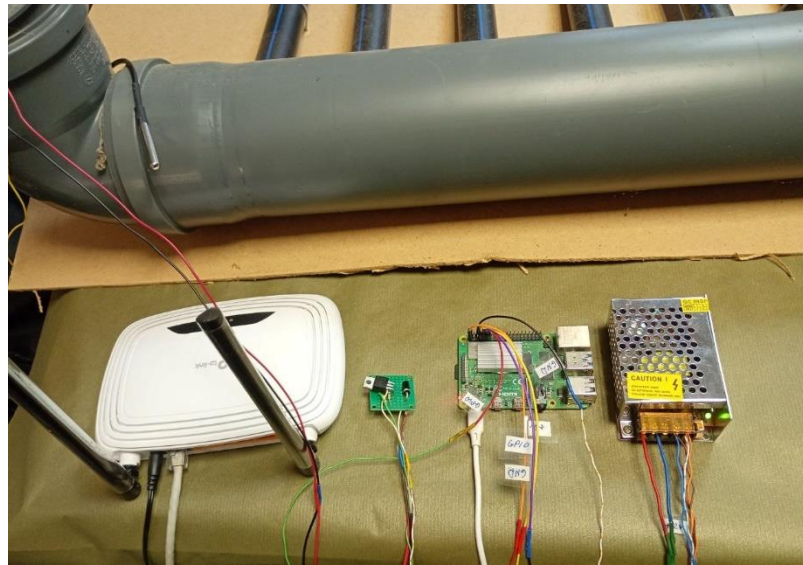


Рисунок 3.18 – Система керування та передачі даних

б) тестування та оптимізація. Фінальний етап передбачає лабораторні та натурні випробування системи, аналіз роботи системи програмного управління (рис. 3.19). Аналізується стабільність роботи від сонячного живлення, точність вимірювачів, швидкість реакції системи на зміну умов мікроклімату, а також загальна ефективність вентиляційної підсистеми. На основі результатів випробувань (рис. 3.20) відбувається оптимізація прошивки, калібрування датчиків та вдосконалення роботи контролера вентиляції.



Рисунок 3.19 – Загальний вигляд установки

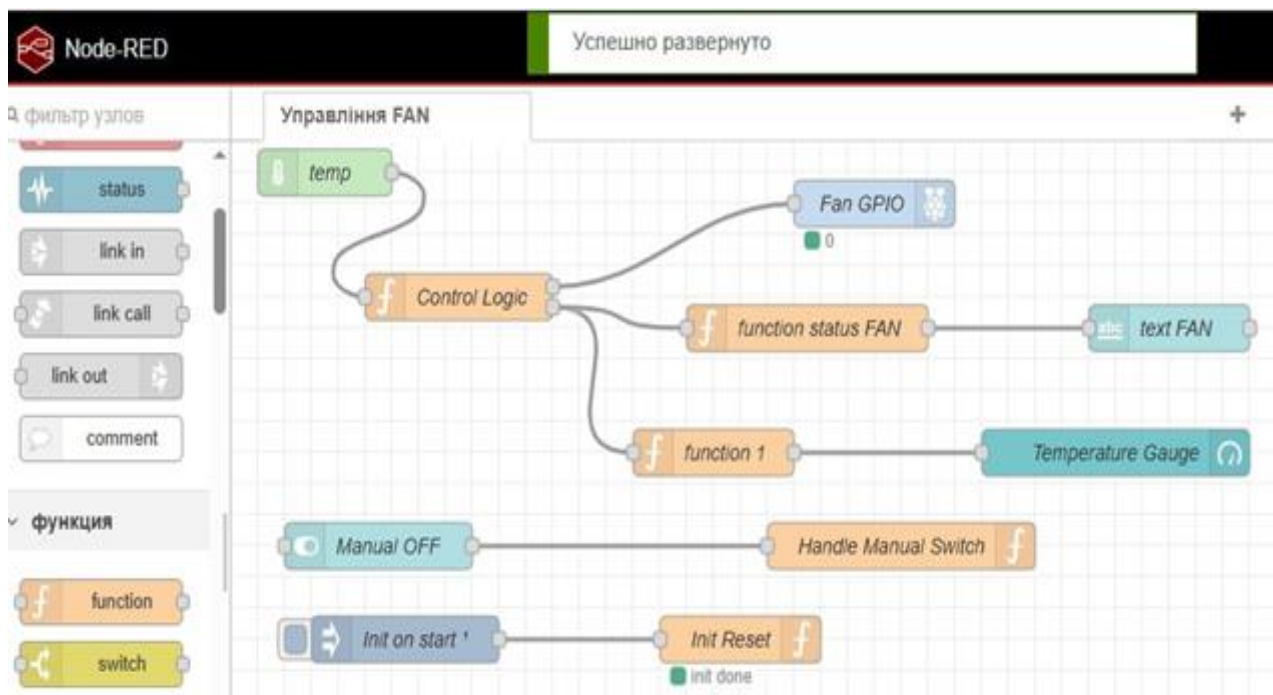


Рисунок 3.20 – Програмне управління установкою

Такий підхід до проєктування дозволяє створити енергоефективну, автономну й адаптивну смарт-систему регулювання мікроклімату теплиці, здатну забезпечувати стабільні умови для росту рослин навіть за нестандартних зовнішніх погодних коливань з мінімальними експлуатаційними витратами.

3.8 Науково-експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження спрямовані на кількісну оцінку впливу розробленої смарт-установки вентиляції на тепловий режим теплиці та її потенційну здатність підвищувати продуктивність ранньовесняних культур. Робота виконувалася з застосуванням реальних погодних умов ранньої весни та відповідною динамікою температурних показників у 2025 році.

Об'єктом дослідження виступила стандартна побутова плівкова теплиця площею до 12 м², обладнана датчиками температури та модулем автоматичного керування вентилятором (рис. 3.21). Метою є встановити, чи може періодична примусова циркуляція повітря, реалізована через смарт-контролер, покращити внутрішній температурний режим у ранньовесняний період, коли зовнішнє

теплове надходження є недостатнім, а нерівномірність прогріву повітря в теплиці спричиняє теплові втрати.



Рисунок 3.21 – Програмна система управління вентилятором

Для оцінки ефективності установки змодельовано дві паралельні конфігурації:

- контрольна теплиця – без роботи вентилятора;
- дослідна теплиця – з вентилятором, який автоматично вмикався при падінні температури нижче встановленого порога.

Дослідження проводилось впродовж 14 днів, що відповідає типовому періоду ранньої весни з денними коливаннями температури від незначних плюсових значень до нічних заморозків. Щоденно фіксували середньодобову зовнішню температуру, середню температуру всередині теплиці для обох режимів, а також оцінювали умовний приріст урожайності культури – як індикатор агрономічної ефективності.

Температурні ряди (рис. 3.22) отримані за допомогою генерації даних, що містили природну стохастичність, характерну для весняних погодних умов.

Подальше моделювання даних дозволило відтворити варіативність добових умов і виявити відмінності між двома режимами керування мікрокліматом.

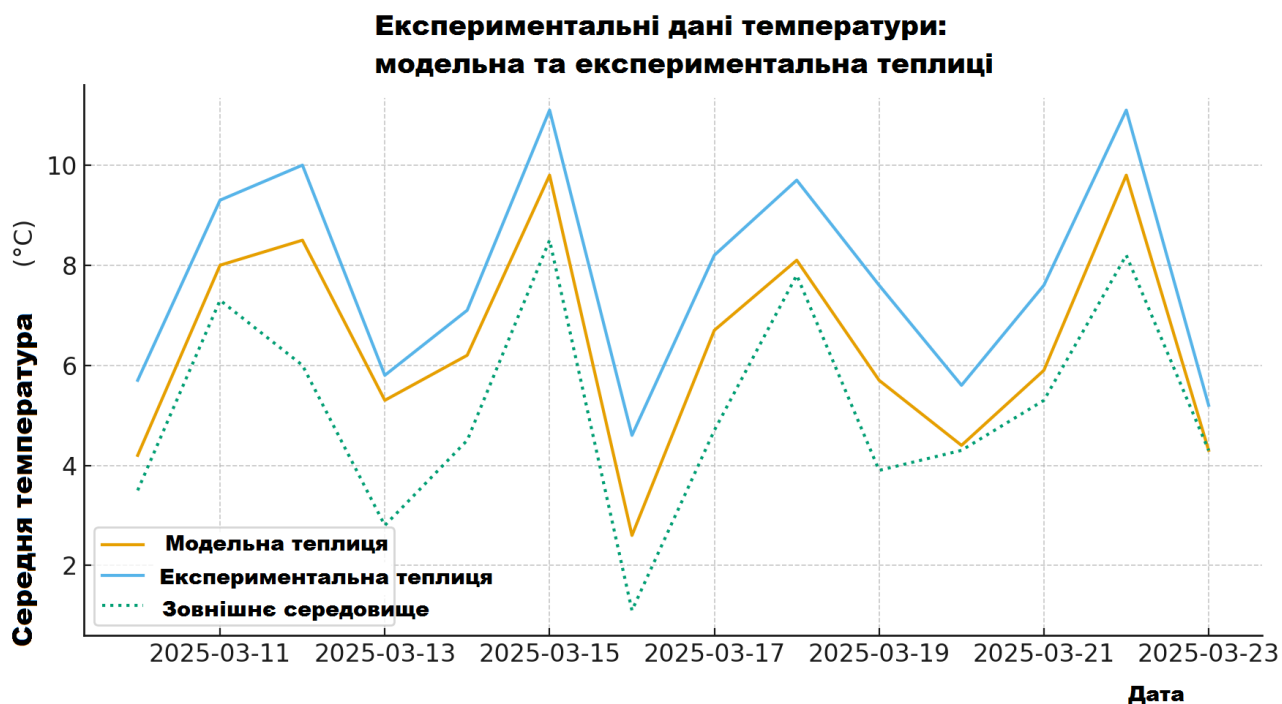


Рисунок 3.22 – Експериментальні дані та аналіз

Аналіз отриманих даних показав, що включення вентилятора позитивно вплинуло на тепловий режим теплиці. Середньодобова температура в дослідній теплиці була в середньому на 1,3-1,4°C вищою, ніж у контрольній. Хоча така різниця може здатися незначною, вона є критично важливою у ранньовесняний період, коли рослини знаходяться поблизу температурного мінімуму росту.

Примусова циркуляція повітря сприяла вирівнюванню температурних градієнтів, запобігала накопиченню холодних зон та ефективніше утримувала денне тепло у нижніх шарах повітря, де розташована листкова маса молодих рослин. Це забезпечило стабільніший тепловий режим і зменшило різкі коливання мікроклімату, які негативно впливають на фотосинтетичну активність зелених культур.

Розрахункова модель урожайності показала, що накопичувальний приріст біомаси в дослідній теплиці був майже на 48 % вищим, ніж у контрольній. Це

демонструє, що навіть відносно невелике підвищення середньодобової температури має значний ефект на швидкість росту молоді зелені, оскільки культура чутливо реагує на перевищення базового рівня температури (приблизно 5° C).

Отримані результати свідчать, що смарт-установка вентиляції виконує не лише функцію охолодження в теплий період, а й може бути використана як засіб оптимізації температурного поля у холодну пору року. Механізм підвищення ефективності ґрунтується на покращенні перемішування повітря та зменшенні теплових втрат, що особливо важливо у невеликих теплицях з локальними перепадами температури.

Підвищення середньодобової температури навіть на 1-2° C у ранньовесняний період здатне змістити дату збору першого врожаю на 7-10 днів раніше, що підвищує рентабельність тепличного господарства та забезпечує більш стабільну поставку продукції.

Моделльні експериментальні дослідження дозволили зробити науково обґрунтовані висновки про те, що смарт-вентиляційна установка здатна підвищити середньодобову температуру в теплиці приблизно на 1,3-1,4° C у ранньовесняний період. При цьому покращення теплового режиму веде до суттєвого зростання умовної урожайності ранньої зелені – на рівні близько 48 %. Вентилятор відіграє роль регулятора теплових потоків, забезпечуючи більш однорідний температурний профіль усередині теплиці, навіть невеликі зміни мікроклімату мають значний агрономічний ефект і можуть бути ключовими для ранніх культур. Подальші дослідження повинні включати польові експерименти з більшим часовим охопленням, реплікацією та багатопараметричним моніторингом середовища.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи можна зробити відповідні висновки: розроблено енергоощадну систему обігріву та вентиляції теплиці, яка функціонує автономно на базі сонячного живлення, використовуючи монокристалічну сонячну панель. Це дозволяє забезпечити безперебійну роботу у віддалених умовах без підключення до централізованої енергомережі.

Застосування платформи Node-RED для логіки керування дозволило реалізувати гнучку систему автоматизації, яка реагує на зміну температури та освітленості в реальному часі, забезпечуючи адаптивне керування мікрокліматом теплиці. Температурне регулювання вентиляції реалізоване згідно з визначеним алгоритмом: при перевищенні температурою порогового значення (30°C) вентилятор автоматично активується, при зниженні температури до або нижче порогу – вимикається. Такий підхід забезпечує оптимальні умови вирощування рослин і мінімізує втрати енергії. Рівень освітленості використовується як індикатор фотогенерації, що дозволяє оцінювати поточну здатність системи до автономної роботи. Це створює передумови для майбутньої реалізації більш складної логіки пріоритезації навантажень залежно від доступної енергії.

Експериментальна перевірка прототипу показала, що система здатна ефективно підтримувати потрібний мікроклімат у теплиці при мінімальному споживанні енергії, забезпечуючи стабільну роботу протягом світлового дня та з урахуванням поточного стану акумуляторного живлення. Інтеграція сенсорів (температури, освітленості) з Node-RED дозволяє легко масштабувати систему для інших потреб теплиці, таких як обігрів, зрошення або контроль вологості, без необхідності суттєвого втручання у фізичну конфігурацію пристроїв.

Запропонована система є прикладом сталого аграрного рішення, яке поєднує сучасні IoT-технології, альтернативну енергетику та енергоефективне

управління, що має перспективу для застосування в умовах обмежених енергоресурсів, зокрема в малих фермерських господарствах.

Модельні експериментальні дослідження дозволили зробити науково обґрунтовані висновки про те, що смарт-вентиляційна установка здатна підвищити середньодобову температуру в теплиці приблизно на 1,3-1,4 °С у ранньовесняний період. При цьому покращення теплового режиму веде до суттєвого зростання умовної урожайності ранньої зелені – на рівні близько 48 %. Вентилятор відіграє роль регулятора теплових потоків, забезпечуючи більш однорідний температурний профіль усередині теплиці, навіть невеликі зміни мікроклімату мають значний агрономічний ефект і можуть бути ключовими для ранніх культур. Подальші дослідження повинні включати польові експерименти з більшим часовим охопленням, реплікацією та багатопараметричним моніторингом середовища.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Багнюк Н. В., Бортник К. Я., С. Лавренчук С. В., М. Михальчук М. А. Енергоефективна автономна система вентиляції теплиць з дистанційним інтелектуальним керуванням. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Луцьк, 2025. № 60. С. 260-268.
2. Greenhouse Vent Positioning Tips for Better Airflow. Charley's Greenhouse. URL: <https://charleysgreenhouses.com/news/greenhouse-vent-positioning-strategies-tips-and-applications/> (дата звернення: 05.08.2025).
3. Enhancing greenhouse management with interpretable AI: A natural language interface for advanced and optimization-based control. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525002746> (дата звернення: 05.08.2025).
4. Intelligent Agricultural Greenhouse Control System Based on Internet of Things and Machine Learning. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3747227.3747273> (дата звернення: 10.08.2025)
5. Сонячна батарея 50Вт моно, AX-50M AXIOMA energy. Ахіома Energy – офіційний інтернет-магазин виробника. URL: https://ua.axioma.energy/soniachna-batareia-monokrystalichna-axioma-energy-ax-50m50vt/?srsltid=AfmBOoqmyi2GuTUCe03KK2DonEOxs3TP4vYzOHig6NcNJw_de7S7_odf (дата звернення: 15.08.2025).
6. Greenhouse microclimate control. URL: https://www.researchgate.net/publication/348110336_Greenhouse_microclimatm_control (дата звернення: 15.08.2025)
7. Mechatronic greenhouse microclimate temperature control system. URL: <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/298506> (дата звернення: 20.08.2025)
8. Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. URL: https://www.researchgate.net/publication/335687907_Review_on_greenhouse_micro

nge-methods-exploring-the-strengths-and-limitations-of-leading-protocols/(дата звернення: 25.11.2025)

17. Enhancing resilience in specialty crop production in a changing climate through smart systems adoption. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525001303> (дата звернення: 25.11.2025).

18. Сонячна батарея 50Вт моно, АХ-50М АХІОМА energy. Ахіома Energy – офіційний інтернет-магазин виробника. URL: <https://ua.axioma.energy/soniachna-batareia-monokrystalichna-axioma-energy-ax-50m50vt/?srsltid=AfmBOorKqmY6LKCkQaOPqjDGKwaquQ7V474FW0Qkd6wn-iST0opMx> (дата звернення: 25.11.2025).