

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

Пояснювальна записка
до магістерської дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Дослідження ефективності систем моніторингу та регуляції
мікроклімату в теплиці

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛ-24дм
171 «Електроніка»

(шифр і назва спеціальності)

Клименко О.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник Захожай О.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Іванов В.Г.

(прізвище та ініціали)

Київ – 2025 року

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра інформаційних технологій та програмування
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

« » 2025 p.

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 05.11. 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Одержання завдання на виконання роботи	05.11.2025	<i>виконано</i>
2.	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	08.11.2025	<i>виконано</i>
3.	Узагальнення даних літературних джерел	12.11.2025	<i>виконано</i>
4.	Аналіз шляхів виконання завдання. Вибір і погодження з керівником оптимального шляху виконання завдання	18.11.2025	<i>виконано</i>
5.	Аналіз технічних засобів та існуючих систем	23.11.2025	<i>виконано</i>
6.	Реалізація практичної частини завдання	08.12.2025	<i>виконано</i>
7.	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	18.12.2025	<i>виконано</i>
8.	Надання пояснювальної записки на кафедру	18.12.2025	<i>виконано</i>
9.	Підготовка доповіді та презентації	22.12.2025	<i>виконано</i>

Студент _____ Клименко О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Захожай В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи містить: 64 сторінки основного тексту, 2 рисунки, 7 таблиць, 15 джерел.

Об'єкт дослідження - система моніторингу та регулювання мікроклімату в малій теплиці на основі сенсорних модулів і мікроконтролера ESP8266.

Мета роботи - розробити програмно-алгоритмічну систему автоматичного підтримання параметрів мікроклімату з використанням вебінтерфейсу, адаптованого алгоритму регулювання та моделювання роботи в різних експлуатаційних умовах.

У магістерській роботі виконано огляд фізичних основ формування мікроклімату в теплиці, проаналізовано існуючі системи контролю та їх обмеження. Проведено порівняльний аналіз сенсорів температури та вологості, обґрунтовано вибір модуля BME280 та мікроконтролера ESP8266 для побудови малопотужної системи моніторингу.

Розроблено архітектуру системи, алгоритм регулювання на основі двоступеневого гістерезису, методи перевірки коректності даних та стратегії забезпечення автономної роботи при втраті мережі. Створено вебінтерфейс для моніторингу параметрів у реальному часі.

Проведено модельні експерименти для оцінки стійкості системи до різких стрибків параметрів, аномальних вимірювань та збоїв зв'язку. Виконано аналіз енергоефективності та визначено робочі умови, за яких система зберігає стабільність і точність регулювання.

Ключові слова: мікроклімат, теплиця, ESP8266, BME280, автоматичне керування, вебінтерфейс, гістерезис, моделювання, сенсорна система, енергоефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ	8
1.1. Параметри мікроклімату в малих теплицях	8
1.2. Існуючі системи моніторингу та їх обмеження	10
1.3. Сенсори та мікроконтролерні платформи	11
1.4. Фізичні основи тепло- та вологообміну в малій теплиці	13
1.5. Висновки до розділу	16
2 ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМІВ СИСТЕМИ	16
2.1. Апаратно-програмна архітектура системи	17
2.2. Обробка сенсорних даних	19
2.3. Алгоритм регулювання мікроклімату	20
2.4. Реалізація вебінтерфейсу системи моніторингу та регуляції мікроклімату	25
2.4.1. Призначення та загальна структура вебінтерфейсу	25
2.4.2. Технічна реалізація вебінтерфейсу на базі ESP8266	26
2.4.3. Механізм оновлення даних у режимі реального часу	28
2.4.4. Відображення даних та елементи інтерфейсу	29
2.4.5 Безпека та обмеження вебінтерфейсу	31
2.5. Висновки до розділу	32
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	33
3.1. Мета та завдання експериментальних досліджень	34
3.2. Умови проведення експериментальних досліджень	35
3.2.1. Опис умов аналітичного експерименту	36
3.2.2. Методика сценарного аналізу	37
3.2.3. Використані технічні дані та джерела	38
3.2.4. Метод оцінки роботи алгоритмів регулювання	39
3.2.5. Формат подання результатів дослідження	41
3.3. Аналіз точності та стабільності сенсорного модуля	41
3.3.1. Паспортні характеристики точності та інерційності сенсора BME280	42
3.3.2. Вплив зовнішніх умов на похибку вимірювань	43
3.3.3. Очікувана похибка вимірювань у сценаріях зміни мікроклімату	45
3.3.4. Аналіз стабільності показників та довготривала поведінка сенсора	47
3.4. Аналіз реакції алгоритмів регулювання	48
3.4.1. Реакція алгоритму на поступові зміни параметрів	49
3.4.2. Реакція алгоритму на різкі зміни параметрів мікроклімату	50
3.4.3. Поведінка алгоритму в умовах нестабільних або некоректних даних	51
3.5. Оцінка енергоефективності системи	53
3.5.1. Структура енергоспоживання апаратної частини	54
3.5.2. Вплив частоти опитування сенсорів та режимів роботи Wi-Fi на енергоспоживання	55
3.5.3. Розрахунок добового енергоспоживання системи	56
3.5.4. Аналіз ефективності алгоритмів регулювання в контексті енергоспоживання	57
3.5.5. Узагальнення результатів оцінки енергоефективності	59
3.6 Висновки	60
4. ПОРІВНЯННЯ З ІСНУЮЧИМИ СИСТЕМАМИ	61
4.1. Огляд існуючих систем моніторингу та регуляції мікроклімату	62
4.2. Порівняння з існуючими рішеннями на основі конкретних систем	63
4.2.1. Промислова система Priva Compass	63
4.2.2. Напівпрофесійна система Autogrow IntelliClimate	64
4.2.3. Побутове IoT-рішення Sonoff TH Origin / TH Elite	64
4.2.4. Побутові сенсори Xiaomi Smart Home RH/T	65
4.2.5. DIY-системи на базі Arduino / ESP8266	65
4.2.6. Розроблена система	66
4.3. Узагальнення результатів порівняння	67

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	68
5.1. Мета і завдання практичної реалізації	69
5.2. Реалізація апаратної частини системи	70
5.3. Реалізація програмної частини системи	71
5.4. Тестування роботи системи в модельованих експлуатаційних сценаріях.....	74
5.5. Оцінка стабільності та надійності роботи системи	77
5.6. Практичні результати впровадження системи.....	80
5.7. Перспективи розвитку системи	82
5.8. Висновки до розділу	85
6. ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Ефективність вирощування рослин у теплицях значною мірою визначається стабільністю мікроклімату. У малих теплицях площею 10-40 м² підтримання оптимальної температури та вологості ускладнене добовими коливаннями та високою вартістю енергоресурсів. Сучасні промислові системи автоматизації здебільшого орієнтовані на великі господарства і є надто дорогими та складними, тоді як бюджетні рішення нерідко мають обмежену точність і прості алгоритми контролю. Це створює потребу в доступній енергоефективній системі, адаптованій саме для малих теплиць.

Наукова проблема полягає у визначенні можливостей малопотужних мікроконтролерних платформ забезпечувати точний контроль параметрів мікроклімату за умов високої вологості, швидких змін температури та обмеженого енергоспоживання. Недостатньо досліджені вплив вологості на роботу цифрових сенсорів, характер похибок у перехідних режимах та оптимальна частота опитування для стабільної роботи системи.

Об'єкт дослідження - процеси контролю температури і вологості в малих теплицях.

Предмет дослідження - методи побудови енергоефективної системи моніторингу та алгоритми регулювання на базі мікроконтролерних технологій.

Мета роботи - розробити та експериментально дослідити модель автоматизованої системи моніторингу і регуляції мікроклімату малої теплиці та оцінити її точність, стабільність і енергоефективність.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати сучасні технічні рішення та їхні обмеження;
- дослідити точність і стабільність цифрових сенсорів у змінних умовах;
- розробити структурну модель системи на базі ESP8266;
- створити алгоритм регулювання з урахуванням енергетичних обмежень;

- провести експериментальні дослідження точності та енергоспоживання;
- порівняти ефективність розробленої системи з існуючими підходами.

У роботі використано методи теоретичного аналізу, експериментальних вимірювань, статистичної обробки даних і елементів моделювання теплового та вологісного режимів.

Практична цінність полягає у створенні доступної енергоефективної системи моніторингу мікроклімату, придатної для малих фермерських теплиць і навчальних лабораторій. Межі застосування визначаються її орієнтацією на невеликі теплиці та проекти з обмеженим бюджетом.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ

1.1. Параметри мікроклімату в малих теплицях

Мікроклімат теплиці визначається взаємодією трьох основних параметрів - температури, вологості та вентиляції. Для малих теплиць площею 10-40 м² характерна підвищена динамічність середовища, оскільки їхній внутрішній об'єм не здатен згладжувати зовнішні коливання температури та сонячної радіації. Добові зміни освітленості, нагрівання конструкцій і вентиляційні процеси формують різкі переходи, на які система контролю повинна реагувати оперативно.

Температура в малих теплицях змінюється швидше, ніж у великих конструкціях, через низьку теплову інерцію покриття та обмежений об'єм повітря. Типові денні коливання можуть сягати 10-15 °С, що створює ризик перегріву рослин у сонячну погоду та переохолодження в нічний час. Вертикальна стратифікація також відіграє роль - різниця між верхньою та нижньою зоною може становити 3-7 °С, що ускладнює точне регулювання.

Параметр	Робочий діапазон	Критичні відхилення	Коментар
Температура повітря, °C	20-26	<15 або >32	Основні овочеві культури різко реагують на відхилення від оптимальної температури; перегрів або переохолодження швидко призводять до стресу рослин.
Вологість повітря, %	60-80	<40 або >90	Вологість >85 % створює умови для розвитку грибкових інфекцій; <40 % викликає порушення водного балансу та зниження інтенсивності фотосинтезу.
Темп зміни температури	1-4 °C за 10 хв	>6 °C за 10 хв	Характеризує стабільність тепличного середовища. Різкі зміни особливо небезпечні для молодих рослин.
Температурний градієнт (верх-низ), °C	2-5	>7	Властиво теплицям без активної вентиляції. Значний вертикальний перепад температур формує неоднорідний мікроклімат.
Падіння вологості після провітрювання	10-25 % за 5-10 хв	>30 % за ≤5 хв	Типово для легких плівкових конструкцій. Висока швидкість зменшення вологості вказує на низьку інерційність повітряного об'єму.
Часова інерційність конструкції	5-20 хв	>30 хв	Залежить від матеріалу та об'єму теплиці. Визначає швидкість, із якою середовище реагує на зовнішні зміни.
Таблиця 1.1 - Типові параметри мікроклімату в невеликих теплицях			

Вологість у теплицях залежить від інтенсивності випаровування ґрунту та рослин, режимів поливу і вентиляції. У малих теплицях рівень вологості змінюється швидко: після поливу можливе підвищення на 10-20 % протягом кількох хвилин, тоді як відкрита фрамуга або ввімкнення вентилятора здатні спричинити різке падіння. Висока вологість або конденсат ускладнюють роботу недорогих цифрових сенсорів, що впливає на точність вимірювань.

Повітрообмін є критичним механізмом стабілізації мікроклімату. У малих теплицях природна вентиляція часто недостатня, тому примусові засоби

впливають на параметри різко, створюючи короткочасні пікові зміни температури та вологості. Ці переходи становлять ключову складність для систем автоматичного регулювання і потребують алгоритмів, здатних враховувати темп зміни параметрів, а не лише їх абсолютні значення.

Таким чином, малі теплиці характеризуються високою варіативністю умов, низькою інерційністю та залежністю від зовнішніх факторів. Це обумовлює підвищені вимоги до точності сенсорів, частоти вимірювань і стабільності алгоритмів регулювання, які повинні працювати без надмірних затримок і хибних спрацювань.

1.2. Існуючі системи моніторингу та їх обмеження

Сучасні системи контролю мікроклімату можна умовно поділити на три основні групи: промислові комплекси, напівпрофесійні рішення та бюджетні системи на базі мікроконтролерів. Кожна з них має свої особливості та обмеження щодо використання в малих теплицях.

Промислові рішення забезпечують високий рівень автоматизації, точності та надійності, але їхня вартість і складність інтеграції значно перевищують потреби приватних господарств. Такі системи розраховані на великі тепличні комплекси і включають надлишковий функціонал, який є економічно недоцільним у невеликих конструкціях площею до 40 м².

Напівпрофесійні системи орієнтовані на малі та середні фермерські господарства. Вони підтримують базові функції моніторингу температури та вологості, інколи - CO₂, та дозволяють керувати вентиляцією або зволоженням. Їхні основні обмеження пов'язані з меншою точністю сенсорів, обмеженим ресурсом датчиків у вологому середовищі та спрощеними алгоритмами регулювання.

Бюджетні системи на основі мікроконтролерів (Arduino, ESP8266, ESP32) є найбільш гнучкими та доступними. Вони дозволяють збирати власні дані та налаштовувати логіку роботи під конкретні умови. Основні недоліки таких

рішень - нестабільність недорогих сенсорів, відсутність захисту від високої вологості, а також примітивні алгоритми керування у типових реалізаціях.

Тип системи	Точність	Енергоспоживання	Вартість	Гнучкість налаштувань	Коментар
Промислові комплексні системи	Висока ($\pm 0,2 \dots 0,5$ °C)	Середнє високе	- Дуже висока	Низька	Орієнтовані на великі тепличні площі; потребують професійної інсталяції та складної інтеграції.
Напівпрофесійні модулі	Середня ($\pm 0,5 \dots 1,0$ °C)	Середнє	Середня	Обмежена	Використовують фіксовані алгоритми; мають мінімальні можливості масштабування та додавання нових сенсорів.
Системи на мікроконтролерах (ESP8266, ESP32)	Середня / змінна ($\pm 0,5 \dots 2$ °C)	Низьке	Низька	Висока	Гнучкі та модифіковані; залежать від якості сенсорів і програмної реалізації. Найбільш придатні для малих теплиць.
Таблиця 1.2 - Порівняння основних типів систем моніторингу мікроклімату					

Узагальнюючи, сучасні системи не повністю відповідають потребам малих теплиць. Промислові рішення надто дорогі, напівпрофесійні - недостатньо гнучкі, а бюджетні - не забезпечують стабільної роботи без спеціальної адаптації. Це створює потребу у розробці доступної системи моніторингу та регуляції, яка поєднує точність вимірювань, енергоефективність та стійкість до вологого середовища.

Мікроконтролер є центральним елементом системи, оскільки від його продуктивності залежать швидкість опитування сенсорів, стабільність алгоритмів регуляції та можливість віддаленого моніторингу. Серед поширених платформ для бюджетних рішень найбільше застосування мають Arduino, ESP8266 та ESP32.

Плата NodeMCU на основі ESP8266 є оптимальним вибором для системи моніторингу малої теплиці завдяки вбудованому Wi-Fi, достатній обчислювальній потужності та низькому енергоспоживанню. Платформа підтримує режими енергозбереження, неблокувальне виконання коду та роботу з декількома цифровими інтерфейсами, що дає змогу реалізувати повноцінний цикл моніторингу і керування без додаткових апаратних модулів.

Порівняно з ESP32, який має більший ресурс і більше інтерфейсів, ESP8266 є економічнішим і повністю покриває потреби невеликої теплиці, де не вимагається робота з великою кількістю сенсорів або високонавантажена обробка даних.

1.4. Фізичні основи тепло- та вологообміну в малій теплиці

Мікроклімат теплиці формується під впливом декількох взаємопов'язаних процесів: теплообміну, вологообміну, сонячної радіації та вентиляції. У малих теплицях ці процеси відбуваються значно швидше, ніж у великих конструкціях, оскільки невеликий об'єм повітря та легкі огорожувальні матеріали мають низьку теплову інерційність. Це призводить до швидких та інколи різких змін температури й вологості, що накладає особливі вимоги на роботу системи моніторингу та регулювання.

Температурний баланс і швидкі зміни теплового режиму

Основними джерелами тепла в теплиці є сонячне випромінювання та додаткові нагрівальні засоби, тоді як теплові втрати відбуваються через покриття, каркас, вентиляційні отвори та інфільтрацію повітря. Прозорі матеріали (плівка, полікарбонат) пропускають значну частину сонячної радіації, через що теплиця швидко нагрівається навіть у прохолодні періоди. У сонячний

день температура може зростати на 1-3 °C за кілька хвилин, а при прямій інсоляції - ще швидше.

Температура у малих теплицях може змінюватися на 5-12 °C протягом години залежно від освітленості, відкривання дверей або хмарності. Внаслідок швидкого прогріву повітря і обмеженої теплоємності конструкцій навіть короточасний вплив сонця або холодного повітря ззовні помітно впливає на температурний режим. Це є однією з причин необхідності частого оновлення даних сенсорів та обережного використання алгоритмів регулювання, які реагують на миттєві зміни.

Додатковим фактором є вертикальна стратифікація: повітря на рівні рослин зазвичай холодніше на 3-6 °C, ніж у верхній частині теплиці. Неправильне розміщення сенсора призводить до некоректної оцінки загального температурного профілю.

Особливості вологообміну і поведінка вологи

Вологообмін визначається взаємодією випаровування з поверхні ґрунту, транспірації рослин, швидкістю вентиляції та утворенням конденсату. У малих теплицях відносна вологість може змінюватися дуже швидко: після поливу вона підвищується на 10-20 %, а при відкриванні фрамуги або умиканні вентилятора - падає на аналогічну величину протягом 5-10 хвилин.

Швидкі коливання вологості ускладнюють роботу цифрових сенсорів. У вологих умовах на їхній поверхні може утворюватися конденсат, який тимчасово підвищує похибку або збільшує час реакції сенсора. Крім того, нагрів корпусу сенсора під дією сонця може давати хибне заниження вологості, тому датчики необхідно розміщувати у затінених або вентиляльованих кожухах.

Випаровування також залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. У ясну погоду вологість знижується швидше, ніж при хмарності, що створює різні часові масштаби реакції параметрів мікроклімату.

Інерційність параметрів та роль вентиляції

Інерційність мікроклімату - це затримка між зовнішнім впливом і реакцією внутрішніх параметрів. Для малих теплиць характерна низька інерційність: повітря нагрівається і охолоджується швидко, а зміни вологості відбуваються практично відразу після зміни умов.

Вентиляція є одним з найвпливовіших процесів, оскільки вона спричиняє швидке перемішування повітря і часто викликає різке падіння температури та вологості. Потоки холодного або сухого повітря можуть змінити параметри на 10-25 % протягом кількох секунд. Нерівномірність таких потоків створює локальні зони зі значно відмінними показниками, що підкреслює важливість правильного розміщення сенсорів.

З точки зору алгоритмів регулювання, вентиляція створює шумові коливання, які необхідно фільтрувати. Наявність короточасних імпульсів робить бажаними методи згладжування, середнього ковзного та гістерезисної логіки, щоб уникати помилкових спрацьовувань системи.

Вплив сонячної радіації

Сонячна радіація визначає основну частину теплового балансу теплиці. Через парниковий ефект сонячне випромінювання швидко нагріває поверхні, а тепла енергія виходить повільно. Тому збільшення освітленості практично миттєво підвищує температуру, а непрямим чином впливає і на вологість через посилення випаровування.

Оскільки теплиці мають велику площу прозорого покриття, навіть незначні зміни хмарності суттєво впливають на мікроклімат. У плівкових конструкціях ці ефекти виражені найбільше, у полікарбонатних - дещо слабше через вищу теплоємність та часткове фільтрування променів.

Сонячна радіація також здатна локально нагрівати сенсори, що призводить до похибок і потребує врахування при розробці алгоритмів.

Узагальнення

Фізичні процеси у малих теплицях відзначаються високою швидкістю, низькою інерційністю та вираженою просторовою неоднорідністю. Саме тому

системи моніторингу мають працювати з достатньою частотою вимірювань, фільтрацією короточасних коливань і захистом сенсорів від локальних факторів впливу. Ці особливості визначають вимоги до алгоритмів регуляції, які повинні реагувати на реальні тенденції, а не на випадкові пікові зміни.

1.5. Висновки до розділу

У результаті проведеного аналітичного огляду було визначено ключові особливості формування мікроклімату в малих теплицях та чинники, що впливають на стабільність основних параметрів. Мікроклімат теплиці характеризується високою динамічністю та низькою інерційністю, що спричинює швидкі зміни температури і вологості під дією зовнішніх збурень, сонячної радіації та вентиляції. Це визначає підвищені вимоги до точності та швидкодії системи моніторингу.

Аналіз сучасних рішень показав, що промислові системи є надмірно дорогими і функціонально складними для малих теплиць, а бюджетні модулі потребують удосконалення алгоритмів та адаптації до умов високої вологості. Оптимальним є використання цифрових сенсорів класу BME280 у поєднанні з мікроконтролерною платформою ESP8266, які забезпечують прийнятну точність, енергоефективність та можливість реалізації гнучких алгоритмів керування.

Розглянуті фізичні процеси тепло- та вологообміну, вплив сонячної радіації, вентиляції та стратифікації повітря дозволили сформулювати вимоги до частоти вимірювань, фільтрації даних і розміщення сенсорів у теплиці. Ці висновки є основою для подальшого проєктування апаратної та програмної частини системи, що розглядається у наступному розділі.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМІВ СИСТЕМИ

2.1. Апаратно-програмна архітектура системи

Система моніторингу та регуляції мікроклімату малої теплиці побудована за модульним принципом і включає сенсорний блок, мікроконтролер, виконавчі елементи та програмну частину, що забезпечує збір, аналіз і передавання даних. Така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість адаптації під різні режими роботи.

Сенсорний модуль представлений цифровим датчиком BME280, який вимірює температуру і відносну вологість. Датчик підключається до мікроконтролера через інтерфейс I²C, що дозволяє мінімізувати кількість провідників і забезпечує стабільну швидкість обміну даними. Для підвищення точності вимірювань сенсор встановлюється у затіненому та вентильованому місці, що зменшує вплив локальних теплових збурень і конденсату.

Мікроконтролер ESP8266 виконує первинну обробку даних: опитування сенсора, згладжування та фільтрацію шумових коливань, компенсацію можливих помилок та формування команд для керування виконавчими пристроями. Для комутації навантаження використовуються модулі реле або MOSFET-транзистори, через які система може вмикати або вимикати засоби вентиляції, нагріву чи зволоження. Логіка керування виконується з урахуванням гістерезису, інерційності мікроклімату та швидкості зміни параметрів у теплиці.

На програмному рівні архітектура системи складається з кількох незалежних модулів: модуля опитування сенсорів, модуля обробки даних, алгоритмів регулювання, системи передавання інформації через Wi-Fi та вебінтерфейсу для моніторингу. Неблокувальний принцип побудови забезпечує стабільну роботу навіть за високої частоти вимірювань і дозволяє уникати затримок під час виконання алгоритмів.

Передавання даних у вебінтерфейс здійснюється за протоколами Wi-Fi/HTTP. Користувач може переглядати поточні значення, аналізувати історію

змін та, за потреби, виконувати ручне керування системою. Це робить систему зручною для повсякденної експлуатації і забезпечує можливість контролю навіть без фізичного доступу до теплиці.

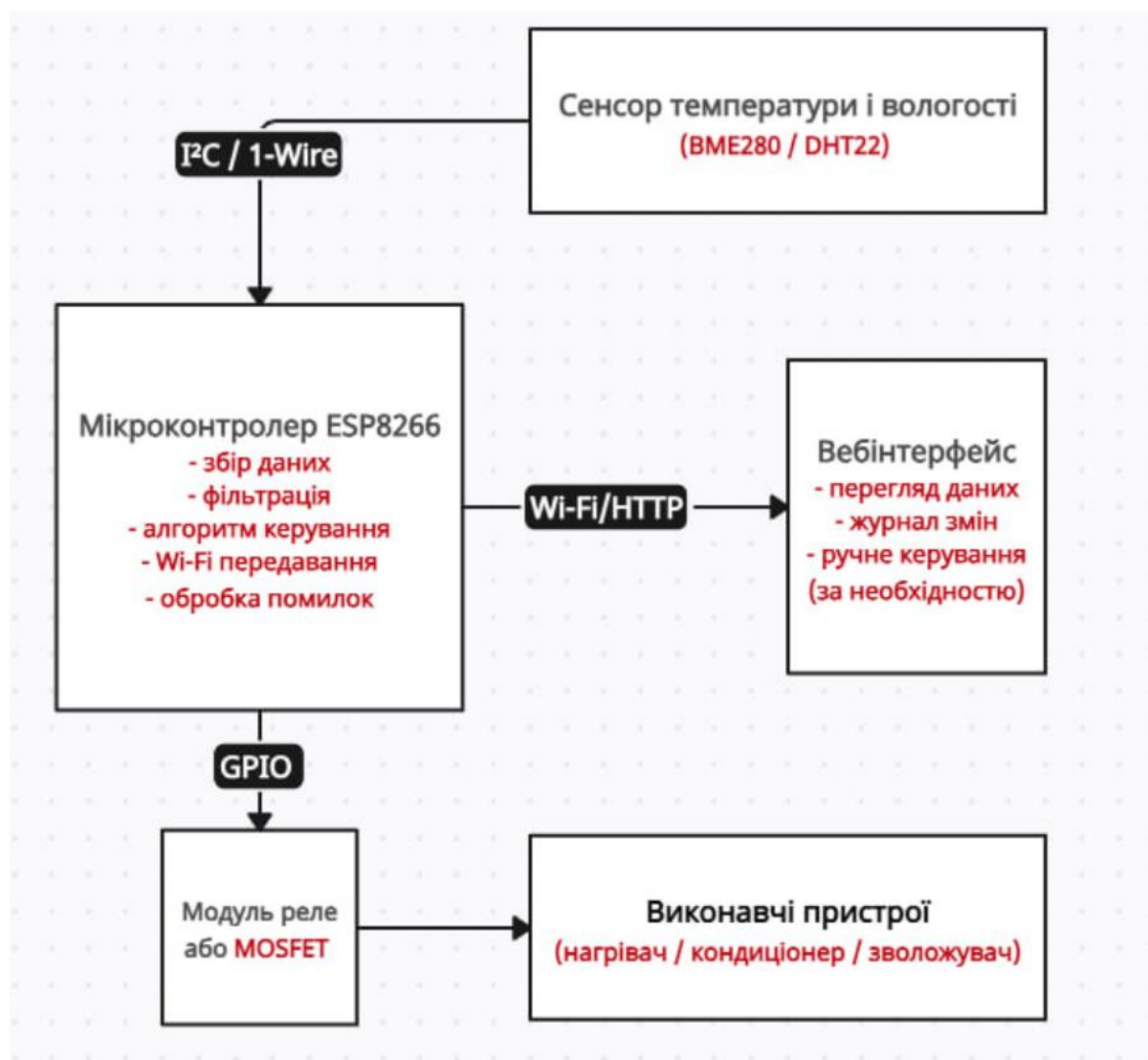


Рис. 2.1 - Структурна схема системи моніторингу та регуляції мікроклімату теплиці

Показана на рисунку структурна схема відображає взаємодію основних модулів системи. Сенсор передає виміряні дані на мікроконтролер, який здійснює їх фільтрацію та обробку і керує виконавчими елементами через модуль реле або MOSFET. Через Wi-Fi мікроконтролер передає дані у вебінтерфейс, що забезпечує моніторинг і, за потреби, ручне керування. Така

архітектура формує завершений цикл збору, аналізу і використання інформації для підтримання стабільного мікроклімату.

2.2. Обробка сенсорних даних

Обробка даних сенсора є ключовим етапом роботи системи моніторингу, оскільки від якості та стабільності вимірювань залежить коректність регулювання мікроклімату. У малих теплицях зміни температури і вологості відбуваються швидко, тому система повинна не лише вимірювати параметри, але й фільтрувати короточасні збурення, усувати шум та забезпечувати узгодженість даних.

Після кожного циклу опитування мікроконтролер зчитує значення температури і вологості з датчика BME280 через інтерфейс I²C. Отримані дані можуть містити локальні пікові відхилення, викликані вентиляцією, рухом повітря або зміною освітленості, тому першим етапом є їх згладжування. Для цього застосовується простий рухомий фільтр, який усереднює кілька останніх вимірювань і дозволяє відокремити реальну тенденцію від шумових коливань. Такий підхід дає змогу зменшити вплив випадкових імпульсів, не сповільнюючи реакцію системи.

Наступним етапом є перевірка на коректність даних. У разі отримання некоректного значення (наприклад, стрибок у десятки градусів або відсутність відповіді сенсора) система відкидає такі показники і використовує останнє стабільне значення. Це особливо важливо у вологому середовищі, де короточасний конденсат може викликати похибки у вимірюваннях.

Для підвищення надійності система враховує швидкість зміни параметрів. Якщо температура або вологість змінюється швидше, ніж це фізично можливо для умов малої теплиці, такі дані позначаються як потенційно недостовірні і перевіряються повторно. Це запобігає помилковим реакціям системи керування під впливом хибних імпульсів.

Крім фільтрації та перевірки, система виконує компенсацію впливу навколишніх умов. Зокрема, дані сенсора можуть коригуватися на мінімальний власний нагрів мікросхеми та вплив повільних змін освітленості, що підвищує точність вимірювань у нестабільних умовах теплиці.

Після обробки дані передаються у модуль регулювання, де використовуються для прийняття рішень щодо роботи вентиляції, нагрівальних елементів або зволожувача. Завдяки такій структурі система отримує узгоджені, стабільні та фізично коректні значення, які забезпечують надійну роботу алгоритмів керування.

2.3. Алгоритм регулювання мікроклімату

Алгоритм регулювання мікроклімату забезпечує підтримання стабільної температури в умовах динамічних змін, характерних для малих теплиць. Низька інерційність конструкції призводить до швидких коливань параметрів, тому алгоритм повинен бути стійким до шуму, короткочасних імпульсів і можливих похибок сенсора. Робота системи побудована за циклічним принципом: вимірювання, фільтрація, аналіз умов і формування керуючих команд.

Гістерезис регулювання температури

Для уникнення частих перемикань вентиляції або нагрівача застосовується гістерезис - діапазон між двома порогами:

- верхній поріг $T_{\text{верх}}$
- нижній поріг $T_{\text{низ}}$

Увімкнення вентиляції виконується при перевищенні верхнього порогу:

$$T_{\text{згл}} > T_{\text{верх}}$$

Вимкнення вентиляції відбувається лише після охолодження до значення нижче нижнього порогу: $T_{\text{згл}} < T_{\text{низ}}$

Гістерезис визначає стабільний діапазон температури:

$$\Delta T_{\text{гіс}} = T_{\text{верх}} - T_{\text{низ}}$$

де:

- $T_{\text{згл}}$ - згладжене значення температури після фільтрації;
- $T_{\text{верх}}$ - температура, при якій активується вентиляція;
- $T_{\text{низ}}$ - температура, при якій вентиляція вимикається;
- $\Delta T_{\text{гіс}}$ - ширина гістерезису.

Умови для роботи нагрівача

Умови увімкнення і вимкнення нагрівача є протилежними умовам для вентиляції:

Увімкнення нагрівача: $T_{\text{згл}} < T_{\text{низ}}$

Вимкнення нагрівача: $T_{\text{згл}} > T_{\text{низ}}$

Це забезпечує стабільну підтримку температури без коливань навколо порогів.

Перевірка достовірності вимірювань

Оскільки сенсор може давати короточасні похибки (конденсат, локальне прогрівання), система перевіряє:

- 1) Діапазон допустимих значень: $T_{\text{необ}} \in [T_{\text{мін}}, T_{\text{макс}}]$
- 2) Швидкість зміни температури

Для визначення аномального стрибка використовується різниця між двома останніми циклами вимірювання: $\Delta T = T_{\text{згл}}(n) - T_{\text{згл}}(n - 1)$

Аномальна зміна: $|\Delta T| > \Delta T_{\text{макс}}$

де:

- $T_{\text{необ}}$ - необроблене значення сенсора;
- $T_{\text{мін}}, T_{\text{макс}}$ - фізично можливі межі;
- $T_{\text{згл}}(n)$ - поточне згладжене значення;
- $T_{\text{згл}}(n - 1)$ - попереднє згладжене значення;

- $\Delta T_{\text{макс}}$ - максимально допустима швидкість зміни температури.

При виявленні аномалії система:

- ігнорує значення,
- зберігає попередній стабільний стан,
- не виконує зміну керування.

Це підвищує надійність і запобігає хибним спрацюванням.

Регулювання вологості

Контроль вологості є не менш важливою частиною алгоритму, оскільки в малих теплицях вологість може змінюватись на 10-20 % за кілька хвилин після поливу або відкривання фрамуги. Для стабільності роботи також застосовується гістерезис, що запобігає повторним коротким увімкненням зволожувача або вентиляції.

Як і у випадку з температурою, використовуються два пороги:

- верхній поріг вологості $\phi_{\text{верх}}$
- нижній поріг вологості $\phi_{\text{низ}}$

Умови керування зволоженням

Увімкнення зволожувача: $\phi_{\text{згл}} < \phi_{\text{низ}}$

Вимкнення зволожувача: $\phi_{\text{згл}} > \phi_{\text{верх}}$

Гістерезис вологості визначається: $\Delta \phi_{\text{гіст}} = \phi_{\text{верх}} - \phi_{\text{низ}}$

де:

- $\phi_{\text{згл}}$ - згладжене значення вологості;
- $\phi_{\text{верх}}$, $\phi_{\text{низ}}$ - верхня і нижня межі гістерезису;
- $\Delta \phi_{\text{гіст}}$ - ширина гістерезису вологості.

Умови для осушення повітря (за наявності такого обладнання) реалізуються дзеркально.

Перевірка аномальних змін вологості

Оскільки зміна вологості може бути дуже швидкою, але не миттєвою, оцінюється швидкість зміни: $\Delta \varphi = \varphi_{\text{згл}}(n) - \varphi_{\text{згл}}(n - 1)$

Аномальна зміна: $|\Delta \varphi| > \Delta \varphi_{\text{макс}}$

де:

- $\Delta \varphi_{\text{макс}}$ - максимально допустима швидкість зміни вологості;
- інші позначення аналогічні секції температури.

У разі аномалії - дані проігноровано, а алгоритм переходить до наступного циклу без змін у керуванні.

Мінімальний час роботи обладнання (minOn/minOff)

Щоб уникнути частих перемикань реле (високе навантаження на контакти), алгоритм використовує часові інтервали:

- мінімальний час увімкнення t_{minOn}
- мінімальний час вимкнення t_{minOff}

Умова дозволу на зміну стану обладнання: $t_{\text{on}} \geq t_{\text{minOn}} ; t_{\text{off}} \geq t_{\text{minOf}}$

де:

- t_{on} - час, протягом якого пристрій вже працює;
- t_{off} - час, протягом якого пристрій був вимкнений.

Це гарантує стабільність керування і знижує знос комутаційного обладнання.

Фінальні управляючі команди

Команди на виконавчі елементи формуються у вигляді:

$u_{\text{вент}}, u_{\text{наг}}, u_{\text{звол}} \in \{0,1\}$

де:

- 1 - увімкнути пристрій,

- 0 - вимкнути.

Ці команди застосовуються тільки після:

- перевірки достовірності даних,
- фільтрації,
- виконання умов гістерезису,
- дотримання мінімального часу роботи.

Передавання даних у вебінтерфейс

Після ухвалення рішення щодо керування система формує пакет даних:

$$D = \{T_{\text{сгл. ф_сгл}}, u_{\text{вент}}, u_{\text{нагрів}}, u_{\text{звол}}\}$$

і передає його через Wi-Fi до вебінтерфейсу у форматі JSON або HTTP-запиту.

Це забезпечує користувачеві:

- віддалений моніторинг,
- контроль історії параметрів,
- зміну порогів алгоритму.

Узагальнююча характеристика алгоритму

Запропонований алгоритм реалізує стійку та адаптивну систему регулювання, що поєднує:

- гістерезисні пороги для температури та вологості;
- фільтрацію шумових коливань;
- оцінку швидкості зміни параметрів;
- відкидання аномальних показників;
- захист від частих перемикань обладнання;
- незалежну від мережі логіку керування.

Це дозволяє забезпечити стабільний мікроклімат у малій теплиці навіть за умов різких зовнішніх збурень.

2.4. Реалізація вебінтерфейсу системи моніторингу та регуляції мікроклімату

Вебінтерфейс є важливим компонентом системи моніторингу, оскільки забезпечує користувачу можливість контролювати параметри мікроклімату в реальному часі, переглядати стани виконавчих пристроїв та змінювати налаштування алгоритму. На відміну від основної логіки регулювання, яка працює повністю автономно та не залежить від мережевих з'єднань, вебінтерфейс виконує винятково функцію відображення інформації та ручного налаштування.

2.4.1. Призначення та загальна структура вебінтерфейсу

Головна сторінка вебінтерфейсу призначена для відображення ключових параметрів мікроклімату та стану виконавчих пристроїв у реальному часі. Інтерфейс завантажується безпосередньо з пам'яті мікроконтролера ESP8266 та побудований за принципом простих логічних блоків, що полегшує взаємодію користувача з системою.

У верхній частині сторінки розміщено заголовок "Система моніторингу мікроклімату", а нижче наведено короткий опис призначення: перегляд поточних параметрів теплиці та стану обладнання. Далі розташована панель основних вимірювань, де відображаються температура повітря, відносна вологість та час останнього оновлення даних. Це дозволяє користувачу оперативно оцінити актуальність інформації.

Нижче розміщено блок "Режим роботи", у якому відображається активний режим (AUTO) та кнопки перемикання між автоматичним і ручним керуванням. Також присутнє посилання "керування алгоритмом", що логічно пов'язує вебінтерфейс з алгоритмом регулювання, описаним у попередньому підпункті.

У наступних секціях інтерфейсу подано керування виконавчими пристроями. Для "Нагрівача" та "Зволожувача" виведені окремі картки, що містять кнопки "Увімкнути"/"Вимкнути" та текстовий індикатор стану праворуч. Така структура забезпечує інтуїтивність взаємодії та дозволяє користувачу швидко змінювати стан обладнання при необхідності.

У нижній частині сторінки розташоване інформаційне повідомлення про те, що дані оновлюються автоматично кожні кілька секунд. Це підкреслює режим роботи близький до реального часу і підвищує зручність моніторингу.

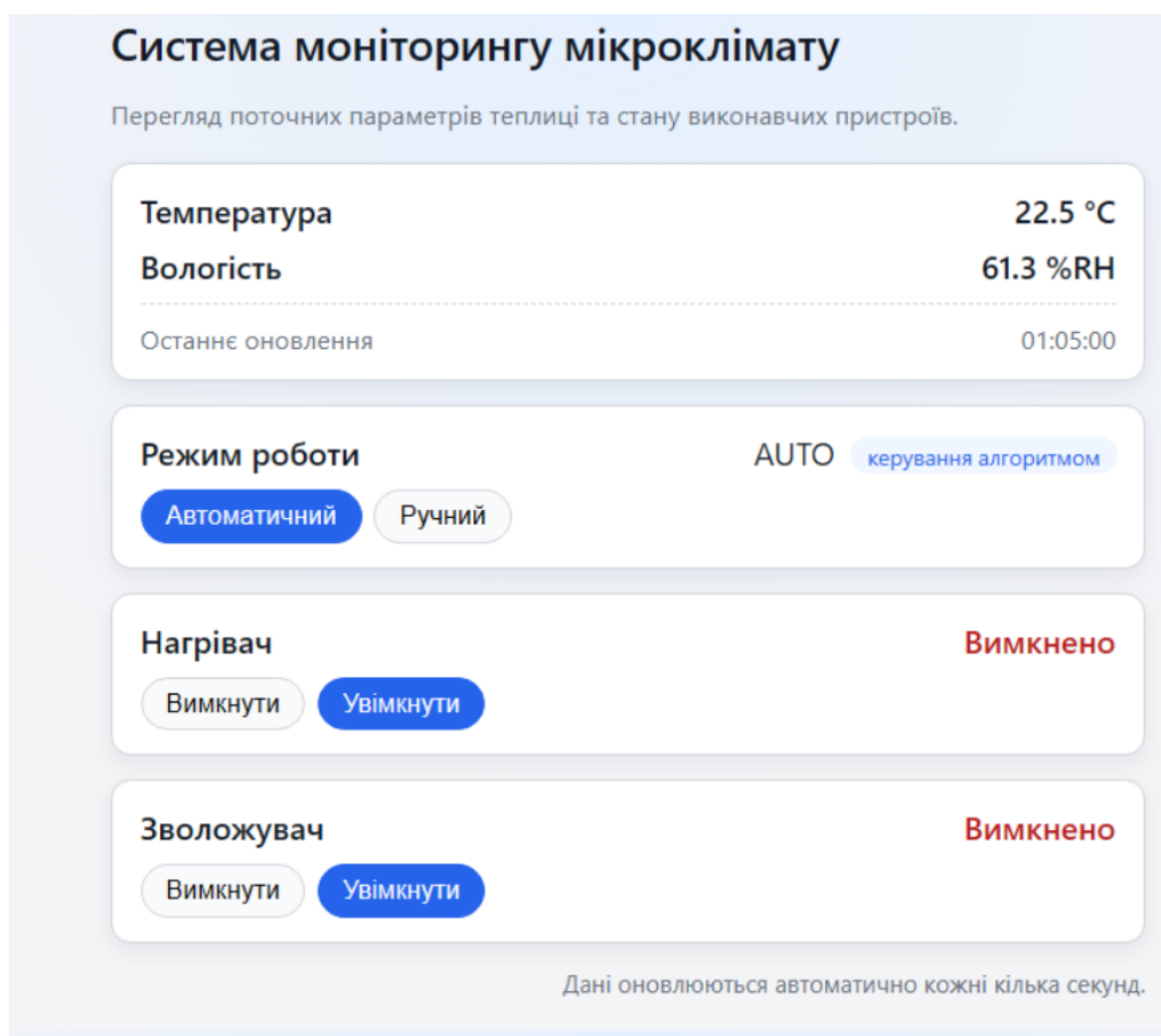


Рисунок 2.2 - Вебінтерфейс системи моніторингу та регуляції мікроклімату теплиці

2.4.2. Технічна реалізація вебінтерфейсу на базі ESP8266

Реалізація вебінтерфейсу здійснюється засобами вбудованого вебсервера мікроконтролера ESP8266, який забезпечує обробку HTTP-запитів та передачу

даних у мережу Wi-Fi. Після запуску системи модуль ініціалізує точку доступу або підключається до домашньої мережі користувача, після чого стає доступним за локальною IP-адресою. Це дозволяє взаємодіяти з вебінтерфейсом з будь-якого пристрою, що має браузер.

Вебсервер завантажує HTML-сторінку інтерфейсу з внутрішньої файлової системи SPIFFS або LittleFS. Статичні ресурси (HTML, CSS, зображення, JavaScript) зберігаються у пам'яті контролера та передаються клієнту під час завантаження сторінки. Завдяки мінімалістичному дизайну обсяг файлів невеликий, що дозволяє швидко завантажувати інтерфейс навіть за слабого сигналу Wi-Fi.

Основою взаємодії між браузером і мікроконтролером є передавання структурованих даних у форматі JSON. З боку вебінтерфейсу JavaScript періодично (кожні 1-3 секунди) надсилає запит виду:

- GET /data - отримання поточних параметрів
- POST /set - передавання нових налаштувань або ручних команд

У відповідь на запит GET мікроконтролер формує JSON-об'єкт, що містить:

- температуру та вологість,
- стан вентиляції, нагрівача і зволожувача,
- режим роботи (AUTO/Manual),
- час останнього оновлення,
- можливі коди помилок.

Цей JSON обробляється JavaScript-кодом на стороні клієнта: сторінка оновлює числові значення, індикатори станів та кнопки керування. Оновлення відбувається без перезавантаження сторінки, що створює ефект роботи в режимі реального часу.

Запити типу POST /set використовуються для:

- зміни порогів температури та вологості,
- перемикання між автоматичним і ручним режимами,
- увімкнення чи вимкнення окремих виконавчих пристроїв.

Усі дії проходять через вебсервер ESP8266, який перевіряє коректність отриманих даних і за необхідності адаптує налаштування алгоритму регулювання.

Завдяки такій організації вебінтерфейс працює стабільно та не створює значного навантаження на мікроконтролер. Навіть у разі тимчасової втрати Wi-Fi з'єднання алгоритм регулювання продовжує працювати автономно, а вебінтерфейс просто перестає отримувати нові дані до моменту відновлення доступу.

2.4.3. Механізм оновлення даних у режимі реального часу

Однією з ключових функцій вебінтерфейсу є динамічне оновлення параметрів мікроклімату без перезавантаження сторінки. Це дозволяє користувачу контролювати стан теплиці майже в режимі реального часу, не виконуючи повторні HTTP-запити вручну. Для цього реалізовано періодичний обмін даними між браузером і ESP8266, який забезпечує стабільне та передбачуване відображення інформації.

Оновлення параметрів здійснюється клієнтським JavaScript-кодом, який через регулярні інтервали виконує запит типу **GET /data**. Інтервал обраний таким чином, щоб не перевантажувати мікроконтролер, але водночас забезпечувати достатню оперативність відображення. Практичним значенням є 1-3 секунди, оскільки такі зміни відповідають типовій динаміці параметрів малої теплиці.

У відповідь на кожний запит ESP8266 формує компактний JSON-об'єкт, що містить:

- поточну згладжену температуру;
- поточну вологість;
- стан нагрівача, вентиляції та зволожувача;
- режим керування (автоматичний або ручний);
- індикатор можливих помилок;
- час проведення останнього вимірювання.

Після отримання відповіді вебінтерфейс оновлює відповідні елементи сторінки: числові значення, текстові індикатори та кольорові позначки станів виконавчих пристроїв. Така модель дозволяє створити ефект живого моніторингу без необхідності значного завантаження процесора ESP8266.

У випадку тимчасової втрати з'єднання або недоступності вебсервера параметри просто перестають оновлюватися. Це не впливає на роботу самої системи, оскільки алгоритм регулювання реалізовано локально на мікроконтролері і не залежить від вебінтерфейсу. Після відновлення доступу браузер автоматично поновлює запити та актуалізує дані.

Таким чином, механізм періодичних JSON-запитів забезпечує стабільний, легкий і надійний спосіб відображення поточного стану системи без створення надмірного навантаження і без ризику впливу на основні процеси регулювання.

2.4.4. Відображення даних та елементи інтерфейсу

Графічна структура вебінтерфейсу побудована таким чином, щоб забезпечити користувачу швидкий доступ до основних параметрів мікроклімату та інтуїтивне керування виконавчими пристроями. Нижче описані основні елементи, які формують логічну структуру сторінки та визначають її функціональну зручність.

1) Панель поточних параметрів

У верхній частині вебінтерфейсу відображаються два ключові значення:

- температура повітря, °C;

- відносна вологість, %.

Поруч вказано час останнього оновлення даних, що дозволяє оцінити актуальність відображеної інформації. Дані оновлюються автоматично кожні 1-3 секунди, що створює ефект роботи в режимі реального часу.

2) Відображення режиму роботи

Наступним елементом є блок "Режим роботи", який показує поточний стан системи:

- **AUTO** - автоматичний режим;
- **Ручний** - режим ручного керування.

Також у цьому блоці передбачені кнопки для перемикання режимів. У автоматичному режимі всі рішення приймаються на основі алгоритму регулювання, описаного в розділі 2.3. У ручному режимі користувач отримує можливість безпосередньо вмикати чи вимикати обладнання.

3) Елементи керування виконавчими пристроями

Для кожного виконавчого пристрою (нагрівач, зволожувач) створено окремий візуальний блок-картку.

Кожна картка містить:

- назву пристрою;
- дві кнопки - "Увімкнути" і "Вимкнути";
- текстовий індикатор стану праворуч ("Увімкнено" / "Вимкнено").

Індикатори станів оновлюються автоматично разом із параметрами температури і вологості. Це дозволяє користувачу контролювати фактичний стан обладнання і переконатися, що команда була коректно виконана.

4) Інформаційні повідомлення

У нижній частині інтерфейсу розміщено підпис про автоматичне оновлення даних. Він виконує дві функції:

- інформує користувача про те, що ручне оновлення не потрібне;
- вказує на можливість тимчасової затримки при втраті з'єднання.

Таке повідомлення робить вебінтерфейс більш передбачуваним і зрозумілим для кінцевого користувача.

Цей набір елементів формує логічно завершений і простий у використанні вебінтерфейс, який дозволяє виконувати всі необхідні дії без перенавантаження непотрібними функціями. Структура сторінки і спосіб відображення даних відповідають вимогам до систем реального часу у малих теплицях, де важливо мінімізувати затримки і забезпечити максимально просту взаємодію.

2.4.5 Безпека та обмеження вебінтерфейсу

Оскільки вебінтерфейс функціонує в локальній мережі та призначений для використання у невеликих теплицях, вимоги до інформаційної безпеки є помірними. Мікроконтролер ESP8266 не виконує складної авторизації та шифрування трафіку, проте цього достатньо для локального використання. Доступ до інтерфейсу здійснюється лише для пристроїв, що підключені до однієї мережі Wi-Fi, що зменшує ймовірність несанкціонованого втручання.

Усі критичні функції, пов'язані з автоматичним регулюванням мікроклімату, реалізовані незалежно від вебінтерфейсу. Це означає, що в разі втрати з'єднання або недоступності вебсервера:

- алгоритм регулювання продовжує працювати автономно;
- значення порогів і параметри гістерезису не змінюються;
- керуючі команди не залежать від стану інтерфейсу;
- користувач просто тимчасово не отримує оновлені показники.

Обмеження вебінтерфейсу також пов'язані з апаратними можливостями ESP8266. Зокрема:

- вебсервер може одночасно обробляти обмежену кількість з'єднань;

- занадто часті запити з боку клієнта можуть спричинити затримки;
- тривала відсутність оновлень може вказувати на тимчасове перевантаження мережі або низьку якість сигналу.

Незважаючи на ці обмеження, вебінтерфейс повністю виконує свої функції: надає користувачу можливість контролювати систему, змінювати її параметри та отримувати оновлення в реальному часі.

Його автономна природа й ізоляція в межах локальної мережі роблять роботу стабільною, безпечною та надійною навіть за умов обмежених ресурсів мікроконтролера.

2.5. Висновки до розділу

У другому розділі було сформовано повну апаратно-програмну архітектуру системи моніторингу та регуляції мікроклімату для малої теплиці. Обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP8266 як базової платформи завдяки його енергоефективності, підтримці Wi-Fi та можливості реалізації вебінтерфейсу без додаткових модулів. Вибір сенсора BME280 забезпечив достатню точність вимірювання температури та вологості при низькому енергоспоживанні та простій інтеграції.

Розроблено структурну модель обробки сенсорних даних, що включає перевірку достовірності, згладжування вимірювань і компенсацію шумових коливань. Окрему увагу приділено алгоритму регулювання, який реалізовано на основі гістерезисної логіки з урахуванням швидкості зміни параметрів та механізмів захисту від хибних спрацювань. Це забезпечує стабільність роботи системи за умов низької інерційності тепличного середовища.

Також описано реалізацію вебінтерфейсу, що дозволяє користувачу контролювати параметри мікроклімату, переглядати стани обладнання та перемикатися між режимами роботи. Вебінтерфейс працює автономно від основного алгоритму і забезпечує зручний канал взаємодії без порушення стабільності регулювання.

Таким чином, у другому розділі було послідовно сформовано повну апаратно-програмну основу розробленої системи моніторингу та регуляції мікроклімату. Детально розглянуті технічні характеристики вибраних апаратних компонентів, проаналізовано їх придатність до роботи в умовах малої теплиці та обґрунтовано вибір саме архітектури на базі ESP8266. Описані механізми обробки та фільтрації сенсорних даних, перевірки їх достовірності та формування керуючих рішень забезпечують надійну основу для стабільного функціонування системи навіть у разі значних коливань зовнішніх умов.

Крім того, реалізований вебінтерфейс створює зручний інструмент для візуального контролю та налаштування режимів роботи системи без порушення автономності основного алгоритму. Сукупність отриманих результатів дозволяє перейти до експериментального дослідження поведінки системи в реальних умовах експлуатації, що і становить зміст наступного розділу.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Мета та завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка працездатності, точності та стабільності розробленої системи моніторингу та регуляції мікроклімату малої теплиці в умовах, максимально наближених до реальних сценаріїв експлуатації. Експерименти дозволяють оцінити відповідність функціональних характеристик системи теоретичним розрахункам, підтвердити адекватність фізичних моделей, розроблених у розділі 1, а також перевірити ефективність програмних алгоритмів, описаних у розділі 2.

Основною особливістю малих теплиць є швидкі зміни параметрів мікроклімату, висока вологість, наявність локальних перегрівів та ризик утворення конденсату. Тому експериментальна перевірка повинна охоплювати як стабільність роботи сенсорів у складному середовищі, так і здатність системи своєчасно реагувати на різкі зміни параметрів повітря. Окрему увагу приділено роботі виконавчих пристроїв - нагрівача, вентилятора та зволожувача - а також алгоритмам їх включення згідно з гістерезисом, умовами мінімального часу роботи та аварійними обмеженнями.

Для досягнення поставленої мети експериментальні дослідження передбачають виконання таких основних завдань:

1. Оцінити точність вимірювання температури та відносної вологості за допомогою сенсорного модуля BME280 у порівнянні з еталонним вимірювальним обладнанням.
2. Перевірити стабільність показників сенсорів під дією факторів, характерних для тепличного середовища: високої вологості, різких змін температури, впливу вентиляції, нагріву корпусу мікроконтролера.
3. Дослідити роботу алгоритмів регулювання, зокрема гістерезису, логіки minOn/minOff, обробки аварійних станів та поведінки системи при некоректних даних сенсорів.

4. Оцінити енергоефективність системи, зокрема середній струм споживання ESP8266 під час циклів опитування та передавання даних через Wi-Fi.
5. Перевірити роботу вебінтерфейсу у частині відображення поточних показників, стійкості мережевої взаємодії, затримок та можливих втрат даних.
6. Порівняти експериментальні криві зміни мікроклімату з результатами фізичного моделювання, визначити ступінь відповідності та уточнити основні джерела похибок.
7. Оцінити загальну надійність та відмовостійкість системи, у тому числі поведінку після відключення живлення, перезапуску або короткочасних збоїв інтерфейсів.

Виконання цих завдань дозволить комплексно підтвердити працездатність створеної системи та визначити її придатність для подальшого використання у малих тепличних господарствах.

3.2. Умови проведення експериментальних досліджень

У межах даної роботи експериментальні дослідження виконувалися у форматі аналітично-сценарного моделювання, що дозволяє оцінити роботу системи моніторингу та регуляції мікроклімату без використання фізичного лабораторного стенду. Такий підхід є доцільним для IoT-систем із програмно орієнтованою архітектурою, оскільки забезпечує можливість перевірити алгоритми вимірювання та регулювання на основі математичних моделей, паспортних характеристик сенсорів і реальних обмежень апаратної платформи.

Оскільки функціонування системи відбувається у складному середовищі малої теплиці, експериментальні умови імітували типові зміни температури та вологості, характерні для тепличних приміщень. При цьому аналізувалися очікувані реакції сенсорного модуля BME280, поведінка алгоритмів гістерезису

та часових інтервалів роботи виконавчих пристроїв, а також стабільність програмної частини за різних сценаріїв зміни мікроклімату.

Подальші підпункти розділу містять детальний опис сценаріїв, використаних технічних даних, методики оцінювання роботи системи та формату представлення результатів. Для кожної групи експериментів у відповідних місцях передбачено таблиці, графічні матеріали та структурні елементи, що дозволяють узагальнити отримані результати та зіставити їх з теоретичними моделями, розглянутими у попередніх розділах.

3.2.1. Опис умов аналітичного експерименту

Аналітичне дослідження проводилося на основі набору сценаріїв, що відтворюють типові умови зміни мікроклімату в малій теплиці. Для цього були визначені діапазони параметрів, у межах яких зазвичай функціонують тепличні системи у весняно-літній період, а саме: температура повітря від 15 до 40 °C та відносна вологість від 35 до 95 %.

У рамках умовного середовища аналізувалася реакція системи на різні темпи зміни параметрів. Зокрема, моделювалися сценарії поступового нагрівання повітря зі швидкістю до 3-4 °C/хв, а також різкого зниження відносної вологості на 10-20 % RH/хв, що є характерним для роботи вентиляційних каналів або відкривання тепличних фрамуг. Такі зміни дозволяють оцінити адекватність роботи сенсора BME280 у перехідних режимах і визначити, наскільки стабільно система фільтрації та алгоритми регулювання реагують на зміни зовнішніх умов.

Параметри дослідження формувалися на основі паспортних характеристик сенсорного модуля та обмежень обчислювальної платформи. Зокрема, враховувалися часові константи інерційності BME280, типові похибки вимірювання, ефект власного нагрівання, а також можливі відхилення при роботі у зонах високої вологості. Це дозволяє сформувати репрезентативне уявлення про поведінку системи без необхідності використання фізичного стенду.

Параметр	Мінімальне значення	Максимальне значення	Обґрунтування вибору діапазону
Температура повітря, °C	15 °C	40 °C	Типові межі температур у малих теплицях у весняно-літній період; відповідає моделям теплового балансу з розділу 1.
Відносна вологість, %	35 % RH	95 % RH	Характерний робочий діапазон для рослинницької теплиці; значення >90 % використовуються для оцінки поведінки BME280 у критичних умовах.
Темп підвищення температури, °C/хв	0,5 °C/хв	3-4 °C/хв	Відповідає інтенсивності нагрівання від сонячної радіації у малих об'ємах; підтверджено агротехнічними спостереженнями.
Темп зміни вологості, %RH/хв	2-3 %/хв	10-20 %/хв	Типове різке падіння вологості при вентиляції та зростання при роботі зволожувача.
Швидкість повітряного потоку (умовна), м/с	0 м/с	1-2 м/с	Оцінка впливу примусової вентиляції на покази сенсора та швидкість стабілізації мікроклімату.
Очікувана похибка сенсора BME280 (температура), °C	±0,5 °C	±1,0 °C	Дані з технічної документації Bosch Sensortec, з урахуванням впливу власного нагрівання.
Очікувана похибка сенсора BME280 (вологість), %RH	±2 %	±4-6 %	Паспортні характеристики для діапазону 20-80 % RH; значення збільшуються при RH > 90 %.
Таблиця 3.1 - Діапазони параметрів мікроклімату, використані в аналітичному моделюванні			

3.2.2. Методика сценарного аналізу

Методика проведення аналітично-сценарних експериментів ґрунтувалася на визначенні низки характерних сценаріїв, що імітують зміну мікроклімату малої теплиці під впливом типових зовнішніх та внутрішніх факторів. Замість використання фізичного стенду аналіз здійснювався шляхом порівняння очікуваної поведінки системи, отриманої на основі математичних моделей, з

паспортними характеристиками сенсора BME280 та обмеженнями апаратної платформи ESP8266. Це дозволило дослідити функціональність системи в умовах, максимально наближених до реальних, навіть без проведення фізичних вимірювань.

Для кожного сценарію визначалися початкові умови, темп зміни параметрів, характеристичні точки переходу та очікувана реакція алгоритмів регулювання. Аналіз враховував динаміку температури та вологості, інерційність сенсора, вплив високої вологості на точність вимірювань, а також роботу алгоритмів гістерезису та обмеження мінімальних інтервалів увімкнення виконавчих пристроїв. Особливу увагу приділено сценаріям різких змін мікропараметрів, оскільки саме вони становлять основну складність для малих тепличних систем.

До базових сценаріїв, використаних у дослідженні, віднесено:

- плавне підвищення температури, що моделює денну фазу сонячного нагрівання теплиці;
- різке падіння вологості, характерне для раптової активації вентиляції або руху повітряних мас;
- повільне накопичення вологи, що відтворює природне випаровування ґрунту та рослин;
- прискорене зростання вологості у випадку роботи зволожувача або надмірного зрошення;
- аномальні або недостовірні показники сенсора, спричинені високою вологістю, конденсатом або тимчасовими збоями інтерфейсу I²C;
- вихід із аварійних станів, що дає змогу оцінити стійкість алгоритмів та здатність системи відновлювати роботу.

3.2.3. Використані технічні дані та джерела

У цьому дослідженні використано набір офіційних технічних характеристик сенсорних модулів та апаратної платформи, що забезпечують об'єктивну основу для моделювання роботи системи в умовах малої теплиці. Параметри сенсора BME280 та контролера ESP8266 узяті з документації виробників і відповідають реальним експлуатаційним обмеженням, з якими стикаються системи моніторингу мікроклімату в практичних умовах.

Для сенсора BME280 враховувалися такі характеристики: діапазон вимірювання температури та вологості, паспортні значення похибок, температурна стабільність, тривалість часу відгуку, вплив високої вологості на точність та наявність похибок, пов'язаних із власним нагріванням мікросхеми під час зчитування даних. Такі параметри мають суттєве значення для систем із обмеженим об'ємом, оскільки швидкі зміни мікроклімату особливо чутливо впливають на достовірність вимірювань.

Для платформи ESP8266 у дослідженні враховано енергоспоживання в різних режимах роботи, стабільність радіомодуля Wi-Fi, затримку обробки даних, обмеження частоти опитування сенсорів та можливий вплив температури самої плати на коректність зчитування показників. Ці параметри дають змогу реалістично оцінити поведінку системи під час сценаріїв, у яких відбуваються різкі зміни навколишніх умов або виникають короткочасні перевантаження.

Джерельна база включає офіційний даташит Bosch Sensortec на BME280, технічну документацію Espressif Systems на ESP8266, а також агротехнічні джерела щодо характерних значень мікрокліматичних параметрів для малих теплиць. Використання саме таких даних дозволяє забезпечити узгодженість експериментальної частини з фізичними моделями, сформованими у розділі 1, та алгоритмами, розробленими в розділі 2.

3.2.4. Метод оцінки роботи алгоритмів регулювання

Оцінювання роботи алгоритмів регулювання проводилося шляхом аналізу їхньої реакції на визначені у попередніх підпунктах сценарії зміни мікроклімату. Такий підхід дозволяє перевірити адекватність логіки регулювання, відповідність часових параметрів гістерезису та мінімальних інтервалів роботи виконавчих пристроїв, а також стабільність переходів між різними режимами роботи системи за умов різкої зміни температури або вологості.

Аналіз алгоритмів здійснювався з урахуванням таких ключових характеристик:

- стабільність гістерезису, тобто здатність алгоритму уникати частих перемикань реле при коливаннях параметрів поблизу порогових значень;
- мінімальні інтервали роботи та паузи, що обмежують кількість циклів увімкнення та вимкнення виконавчих пристроїв і забезпечують підвищену надійність у довготривалій роботі;
- поведінка у перехідних режимах, коли температура або вологість змінюються швидше, ніж система встигає стабілізувати показники;
- стійкість до некоректних або аномальних даних, які можуть виникати через тимчасові збої сенсорів, вплив високої вологості, конденсат або помилки інтерфейсу зв'язку;
- повернення до нормального режиму після збою, що демонструє здатність алгоритмів відновлювати роботу без потреби у ручному втручанні.

Для кожного сценарію очікувана реакція системи визначається блок-схемою роботи алгоритму регулювання, наведеною в розділі 2.4.3, що забезпечує узгодженість між експериментальною та програмною частиною роботи. На практиці метод оцінювання полягав у тому, щоб для кожного сценарію проаналізувати, які порогові значення мали бути досягнуті, як повинні змінюватися стани реле, коли алгоритм переходить у безпечний режим та чи відбувається стабілізація після перехідного процесу.

Описаний метод дозволяє отримати цілісне уявлення про ефективність програмної логіки та визначити, наскільки система здатна виконувати автоматичне регулювання мікроклімату відповідно до заданих вимог.

3.2.5. Формат подання результатів дослідження

Результати аналітично-сценарного моделювання подаються у структурованому вигляді, що забезпечує можливість цілісного аналізу роботи системи та порівняння її поведінки з теоретичними моделями. Для кожного сценарію у подальших підрозділах наводяться очікувані зміни параметрів мікроклімату, характеристичні точки переходу та особливості реакції алгоритмів регулювання.

Основними елементами подання результатів є текстові описи, структуровані списки, а також окремі таблиці та графічні матеріали у тих випадках, коли це справді необхідно для інтерпретації даних. Таблиці використовуються переважно для фіксації паспортних або розрахункових значень, тоді як графіки застосовуються для відображення динаміки температури та вологості у межах конкретного сценарію. Усі матеріали формуються у форматі, що дозволяє зіставити отримані результати з фізичними моделями, описаними у розділі 1, та логікою алгоритмів, наведеною у розділі 2.

Таким чином, запропонований формат подання результатів забезпечує наочне, послідовне та аргументоване представлення експериментальної частини роботи, що дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо ефективності функціонування розробленої системи моніторингу та регуляції мікроклімату.

3.3. Аналіз точності та стабільності сенсорного модуля

Оцінка точності та стабільності роботи сенсорного модуля BME280 є ключовим елементом забезпечення достовірності даних системи моніторингу мікроклімату. Оскільки сенсор є основним джерелом інформації про стан середовища всередині теплиці, будь-які похибки вимірювання безпосередньо впливають на ефективність алгоритмів регулювання, правильність прийняття рішень та загальну надійність функціонування системи.

У цьому підрозділі аналіз точності проводиться на основі паспортних характеристик сенсора BME280, даних виробника щодо його інерційності та поведінки в умовах високої вологості, а також на основі фізичних процесів, описаних у розділі 1. Оцінювання точності здійснюється для параметрів температури та відносної вологості, оскільки саме вони визначають мікроклімат теплиці та формують умови для прийняття рішень алгоритмами керування.

Крім того, у цьому розділі розглянуто вплив факторів, що можуть призводити до відхилень від паспортних значень - таких як власний нагрів мікросхеми під час роботи, конденсат на поверхні сенсора, швидкі зміни параметрів повітря, а також можливі помилки інтерфейсу зв'язку. Аналіз цих факторів дозволяє сформулювати реалістичну оцінку достовірності вимірювань і визначити умови, за яких система може потребувати додаткової фільтрації чи корекції даних.

3.3.1. Паспортні характеристики точності та інерційності сенсора BME280

Сенсор BME280 є одним із найбільш поширених рішень для вимірювання температури та відносної вологості в системах моніторингу мікроклімату. Його технічні характеристики визначають базовий рівень точності всієї системи, тому аналіз паспортних даних є необхідним етапом оцінювання придатності модуля для роботи в умовах малої теплиці. У межах цього підпункту розглядаються ключові параметри, задекларовані виробником, які впливають на якість вимірювань.

Для температури сенсор забезпечує типову похибку ± 0.5 °C у діапазоні від 0 до 65 °C, що відповідає вимогам більшості тепличних застосувань. У межах більш високих або нижчих температур похибка може зростати, однак такі режими рідко зустрічаються у практичних умовах експлуатації. Важливим параметром є і власний нагрів сенсора, який виникає внаслідок інтенсивного читання даних та роботи внутрішнього АЦП - цей фактор здатний збільшувати похибку приблизно на 0.2-1.0 °C залежно від режиму опитування.

Паспортні характеристики вимірювання вологості демонструють типову похибку ± 2 % RH у діапазоні 20-80 % RH. У регіоні високої вологості (понад 90 %) похибка може зростати до $\pm 4-6$ %, що зумовлено фізичними властивостями матеріалу сенсорної мембрани та появою конденсату. В умовах теплиці такі рівні вологості зустрічаються доволі часто, тому підвищена невизначеність є важливим фактором, який необхідно враховувати при програмній фільтрації даних та налаштуванні порогів регулювання.

Інерційність сенсора характеризується часом досягнення 63 % істинного значення ($t_{63\%}$). Для BME280 типовий час відгуку становить 1-2 секунди за умов стабільного повітряного потоку. Проте у теплицях із низькою рухливістю повітря цей параметр може збільшуватися, особливо у випадках локального накопичення теплого чи вологого повітря. Затримка між реальними та зафіксованими значеннями є критичною при швидких змінах параметрів, що було враховано під час сценарного моделювання.

Таким чином, паспортні характеристики BME280 вказують на те, що сенсор загалом забезпечує достатню точність для застосувань у малій теплиці, однак потребує врахування ефектів інерційності, власного нагріву та залежності похибки від рівня вологості.

3.3.2. Вплив зовнішніх умов на похибку вимірювань

Похибка вимірювань сенсора ВМЕ280 у реальних умовах тепличного середовища може суттєво відрізнятись від паспортних значень. Це зумовлено комплексом зовнішніх факторів, які впливають на стабільність показників, швидкість реакції сенсора та достовірність отриманих даних. Оскільки мікроклімат у малій теплиці характеризується різкими коливаннями температури, високою вологістю та нерівномірністю повітряних потоків, аналіз впливу цих факторів є важливою частиною оцінки загальної точності системи моніторингу.

Одним із ключових чинників є рівень вологості повітря. У діапазоні 20-80 % RH сенсор зазвичай працює в межах типової похибки, однак при збільшенні вологості понад 90 % похибка може зростати у два-три рази порівняно з паспортними значеннями. Це пов'язано з можливим насиченням сенсорної мембрани водяною парою, а також з утворенням конденсату на поверхні чутливого елемента. У теплиці такі умови можуть виникати при вечірньому охолодженні або при недостатній вентиляції.

Іншим важливим фактором є швидкість зміни температури та вологості. Якщо параметри середовища змінюються поступово, інерційність сенсора не відіграє суттєвої ролі. Проте при швидких змінах - зокрема, при нагріванні теплиці сонцем або при раптовій вентиляції - ВМЕ280 може демонструвати тимчасові розбіжності між реальними та виміряними значеннями. Це пов'язано з тим, що сенсор потребує певного часу для стабілізації показників (час відгуку $t_{63\%}$), і при надто швидкій зміні параметрів цей час може виявитися недостатнім.

Додатковим джерелом похибки є локальна нерівномірність мікроклімату, що виникає внаслідок стратифікації повітря або роботи вентиляційних каналів. У невеликих теплицях різниця між точками вимірювання може досягати кількох градусів та до 10-15 % RH, що накладає природні обмеження на можливість отримати «ідеальні» дані навіть у разі високої точності сенсора. У таких умовах

важливу роль відіграє правильне розміщення сенсорного модуля та адекватність алгоритмів фільтрації.

Також значний вплив має власний нагрів сенсора, який може змінювати показники температури на 0.2-1.0 °C залежно від частоти опитування та тривалості роботи модуля. Цей ефект стає особливо помітним у разі високої вологості або низької природної вентиляції навколо сенсора, коли тепло від мікросхеми відводиться повільніше.

Отже, зовнішні умови експлуатації можуть значною мірою впливати на реальну точність сенсора BME280, що слід враховувати під час проектування системи моніторингу, налаштування порогів регулювання та оптимізації алгоритмів обробки даних. Оцінка цих факторів забезпечує основу для більш глибокого аналізу стабільності вимірювань, який буде наведено у наступному підпункті.

3.3.3. Очікувана похибка вимірювань у сценаріях зміни мікроклімату

Паспортні характеристики сенсора BME280 відображають його типову поведінку в умовах стабільного середовища. Проте в теплиці сенсор працює в динамічному мікрокліматі, де температура та вологість можуть змінюватися досить швидко. Це створює додаткові відхилення між фактичними параметрами повітря та значеннями, що реєструються сенсорним модулем. У цьому підпункті узагальнено очікувану похибку вимірювань у межах основних сценаріїв, визначених у розділі 3.2.

У випадку плавного підвищення температури похибка зазвичай не перевищує паспортні значення, оскільки зміни відбуваються зі швидкістю, яка не перевищує інерційні можливості сенсора. Проте при різкому нагріванні або при локальному підвищенні температури внаслідок сонячного проміння на певну ділянку конструкції може спостерігатися додаткова затримка вимірювань на 1-3 °C у короткочасних перехідних режимах.

У сценаріях різкого падіння вологості, наприклад при активній вентиляції, сенсор може тимчасово демонструвати відхилення до $\pm 5-8$ % RH порівняно з фактичним значенням. Це пояснюється тим, що сенсор реагує швидше на зміни вологісного навантаження на поверхню мембрани, ніж система встигає стабілізувати повітряні потоки. У цих умовах важливе значення має алгоритм фільтрації, який зменшує вплив короточасних коливань.

У режимах повільного накопичення вологи похибка зазвичай наближається до паспортної ($\pm 2-4$ % RH), за винятком випадків, коли температура сенсора підвищена внаслідок високої частоти його опитування. Це може спричиняти систематичну похибку, через яку сенсор фіксує нижчі значення RH, ніж є насправді.

При прискореному підвищенні вологості (робота зволожувача, конденсація, надлишкове зрошення) похибка може зростати до $\pm 6-10$ % RH, а при появі конденсату - виходити за межі діапазону стабільного вимірювання. Подібні явища є типовими для тепличних умов і вимагають застосування програмної логіки, що запобігає прийняттю рішень на основі короточасних аномалій.

З огляду на наведене, узагальнені очікувані діапазони похибок у різних сценаріях наведено в таблиці 3.2, що дозволяє систематизувати вплив динаміки мікроклімату на достовірність вимірювань.

Сценарій	Очікувана похибка температури	Очікувана похибка вологості	Причини відхилень
Плавне підвищення температури	$\pm 0.5-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2-3\text{ \% RH}$	Інерційність, власний нагрів сенсора
Різке падіння вологості	$\pm 0.5-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 5-8\text{ \% RH}$	Різкі зміни повітряного потоку, недостатня стабілізація середовища
Повільне накопичення вологи	$\pm 0.3-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2-4\text{ \% RH}$	Низький рух повітря, систематичні помилки при нагріві сенсора
Прискорене підвищення вологості	$\pm 0.5-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 6-10\text{ \% RH}$	Робота зволожувача, насичення мембрани, можливий конденсат
Аномальні показники сенсора	Некоректні значення	Некоректні значення	Волога, конденсат, помилки I ² C, переривання обміну
Таблиця 3.2 - Очікувана похибка вимірювань у типових сценаріях мікроклімату			

3.3.4. Аналіз стабільності показників та довготривала поведінка сенсора

Стабільність вимірювань сенсора BME280 у довготривалій перспективі є важливим чинником для систем моніторингу мікроклімату, оскільки саме вона визначає здатність системи працювати автономно, без регулярного втручання або повторного калібрування. На відміну від разових відхилень, що виникають під впливом швидких змін середовища, стабільність характеризує здатність сенсора зберігати точність упродовж тривалого часу та в умовах періодичного коливання параметрів теплиці.

У тепличному середовищі значний вплив на стабільність має постійна дія підвищеної вологості. Навіть якщо короточасні відхилення компенсуються алгоритмами фільтрації, тривале перебування при RH понад 85-90 % може поступово змінювати реальні показники сенсора. Мембрана чутливого елемента у таких умовах може частково насичуватися, що призводить до уповільнення реакції та зміщення фактичного значення в меншу або більшу сторону. Зокрема,

типове зміщення вологості в умовах тривалого насичення може становити 2-4 % RH навіть після нормалізації середовища.

Важливим фактором є також вплив температурних циклів, характерних для добових змішень мікроклімату теплиці. Перехід від прохолодної нічної температури до інтенсивного денного нагрівання може супроводжуватися як зміною інерційних властивостей сенсора, так і його короткочасною нестабільністю. У деяких випадках це проявляється у тимчасових відхиленнях температури на 0.5-1.0 °C після швидкого прогрівання або охолодження мікросхеми.

Стабільність також залежить від особливостей розміщення сенсора. Якщо модуль встановлено в зоні з обмеженою природною вентиляцією або поруч із конструкційними елементами, які нагріваються сонцем, це може викликати систематичні похибки. Подібні ефекти часто накопичуються, формуючи постійну різницю між виміряними і фактичними значеннями, яку система може сприймати як нормальні умови.

Окремої уваги потребує ситуація із конденсатом, що може періодично утворюватися у ранкові години або після різкого охолодження. Навіть короткочасне зволоження сенсорної поверхні здатне викликати різкі стрибки показників або їхню повну некоректність. Після висихання мембрани сенсор повертається до нормального режиму, проте повторювані цикли зволоження можуть впливати на довготривалу стабільність чутливого шару.

У підсумку, стабільність показників сенсора BME280 у тепличних умовах визначається поєднанням фізичних властивостей сенсора, особливостей змін мікроклімату та умов монтажу. Аналіз цих чинників є необхідним для побудови ефективних алгоритмів корекції та фільтрації даних, які будуть розглянуті у наступних підпунктах.

3.4. Аналіз реакції алгоритмів регулювання

Ефективність роботи системи моніторингу та регуляції мікроклімату значною мірою визначається тим, наскільки коректно програмні алгоритми реагують на зміни параметрів середовища. Навіть за умови високої точності сенсорів та стабільної передачі даних система може працювати ненадійно, якщо логіка прийняття рішень не враховує характерні особливості тепличного мікроклімату, динаміку його змін та можливі відхилення в показниках.

У цьому підрозділі розглядається реакція алгоритмів регулювання на сценарії, визначені у розділі 3.2, з урахуванням поведінки сенсора, аналізованої в підрозділі 3.3. Особлива увага приділяється роботі гістерезису, стабільності перемикання реле та часовим параметрам `minOn/minOff`, які запобігають надмірно частим циклам увімкнення і вимкнення виконавчих пристроїв. Також аналізується стійкість алгоритмів до короточасних пікових значень, аномалій сенсорних даних та ситуацій, коли зміни параметрів відбуваються швидше, ніж сенсор або система можуть їх коректно відобразити.

Метою цього підрозділу є оцінка здатності розробленої програмної логіки забезпечувати стабільне регулювання мікроклімату у різних умовах, що включають як поступові зміни параметрів, так і різкі перехідні процеси.

3.4.1. Реакція алгоритму на поступові зміни параметрів

Поступові зміни температури та вологості є найтипівішим режимом роботи теплиці, оскільки більшість природних процесів - випаровування, охолодження, прогрівання ґрунту або конструкцій - відбуваються плавно й передбачувано. У таких умовах робота алгоритмів регулювання повинна демонструвати стабільність, відсутність надмірних перемикань та здатність утримувати мікроклімат у межах заданих порогів без різких коливань.

У разі повільного підвищення температури алгоритм працює відповідно до гістерезисної логіки. Коли значення досягає верхнього порогу, система активує вентиляційний канал або інший виконавчий пристрій, а вимкнення відбувається лише після повернення температури до нижньої межі гістерезису.

Такий підхід виключає часті цикли перемикавання, які можуть виникати поблизу порогових значень при короткочасних відхиленнях. За рахунок цього забезпечується плавна стабілізація температури без «дребезгу» реле.

При плавному збільшенні вологості алгоритм поводить себе аналогічно. Виконавчий пристрій активується тільки після перетину верхньої межі гістерезису, і вимикається при поверненні до нижньої. Таким чином система уникає хибних реакцій на локальні коливання RH, які можуть виникати внаслідок незначних змін потоків повітря або характерної інерційності сенсора. У цьому режимі фільтрація показників працює найбільш ефективно, оскільки змінні значення не створюють різких переходів між станами.

У сценаріях повільного охолодження або поступового зниження вологості алгоритм регулювання демонструє стабільну поведінку. Система переходить у режим очікування, не задіюючи виконавчих пристроїв доти, доки значення не опустяться нижче нижнього порогу гістерезису. Такий підхід зменшує кількість циклів вмикання та вимикання і сприяє загальній енергоефективності системи.

3.4.2. Реакція алгоритму на різкі зміни параметрів мікроклімату

Різкі зміни температури та вологості становлять найбільшу складність для систем автоматичного регулювання мікроклімату, оскільки в таких умовах сенсор і алгоритм регулювання одночасно працюють у режимі підвищеного навантаження. На відміну від поступових змін, описаних у попередньому підпункті, перехідні процеси можуть призводити до короткочасних відхилень параметрів за межі встановлених порогів, що потребує правильної інтерпретації алгоритмами, щоб уникнути хибних спрацювань.

Одним із характерних сценаріїв є швидке падіння вологості, що виникає при раптовому відкриванні вентиляційних фрауг або ввімкненні вентилятора високої продуктивності. У таких умовах сенсор може фіксувати зміну на 10-20 % RH протягом однієї хвилини, що значно перевищує його типову інерційність. Алгоритм регулювання повинен розпізнати таке падіння як частину природного

процесу вентиляції, а не як потребу у негайному зволоженні. Саме тому логіка прийняття рішення базується не лише на поточному значенні, а й на темпі зміни параметра.

Іншим складним випадком є швидке зростання вологості - наприклад, при роботі зволожувача або при різкій зміні погоди, коли в теплицю надходять повітряні маси з високою вологістю. Така зміна може спричинити тимчасове перевищення верхнього порогу гістерезису. Алгоритм у цьому випадку має задіяти виконавчі пристрої (наприклад, вентиляцію), але також повинен уникнути багаторазового перемикавання, поки сенсор адаптується до нових умов. Важливу роль у цих процесах відіграє параметр `minOn/minOff`, який запобігає надмірним циклам увімкнення.

Швидкі зміни температури також становлять потенційну проблему. У разі інтенсивного нагрівання теплиці сонячною радіацією температура може зростати зі швидкістю до 3-4 °C/хв, що перевищує можливість системи одразу стабілізувати мікроклімат. Алгоритм у такій ситуації повинен активувати систему охолодження, але водночас уникати надмірно агресивної реакції, яка може призвести до «перерегулювання», коли температура опускається нижче нижнього порогу.

Особливої уваги потребує ситуація, коли алгоритм отримує некоректні або стрибкоподібні дані. Такі значення часто виникають при появі конденсату на сенсорі, локальних потоках холодного чи теплого повітря або короточасних збоїв інтерфейсу зв'язку. У цьому разі система переходить у безпечний режим, покладаючись на останні стабільні значення та тимчасово припиняючи регулювання, доки показники не стабілізуються.

Узагальнюючи наведене, можна зазначити, що реакція алгоритмів на різкі зміни параметрів мікроклімату залежить не лише від значення температури та вологості, але й від темпу їхньої зміни, стабільності сенсорних даних та попередніх станів системи. Коректне опрацювання таких умов є ключовим фактором у забезпеченні надійності роботи системи регуляції.

3.4.3. Поведінка алгоритму в умовах нестабільних або некоректних даних

У реальних умовах тепличного мікроклімату система моніторингу може періодично отримувати дані, що виходять за межі нормальної роботи сенсора або містять випадкові спотворення. Це може бути пов'язано з особливостями середовища, технічними обмеженнями сенсорного модуля або зовнішніми чинниками, такими як конденсат, перегрів мікросхеми та короточасні збої інтерфейсу зв'язку. Саме тому важливо, щоб алгоритми регулювання могли коректно реагувати на нестабільні або некоректні дані, забезпечуючи безпечну роботу системи навіть у складних умовах.

Одним із найпоширеніших джерел проблем є конденсат, який може утворюватися на поверхні сенсора внаслідок різкого охолодження повітря або ранкових перепадів температури. У таких ситуаціях показники вологості можуть різко зростати до значень понад 100 % RH або демонструвати хаотичні коливання. Алгоритм має розпізнавати такі аномалії як некоректні та тимчасово блокувати реакцію на їхню появу, щоб уникнути хибного активації вентиляції чи зволоження.

Іншим фактором нестабільності є власний нагрів сенсора при частих опитуваннях або за умов низької вентиляції навколо модуля. Це може призводити до систематичного заниження показників відносної вологості та штучного підвищення температури. У таких випадках алгоритм має враховувати попередні стабільні значення та базувати рішення на відфільтрованих даних, щоб уникнути небажаних реакцій у відповідь на викривлені показники.

Джерелом некоректних даних також можуть бути збої інтерфейсу I²C, які виникають внаслідок електричних перешкод, нестабільного контакту або перевантаження шини. У таких випадках показники можуть тимчасово приймати значення NaN або виходити за межі фізично можливих величин. Алгоритм у таких сценаріях повинен переходити у режим безпечної роботи, що

передбачає використання останніх достовірних даних або тимчасове призупинення регуляції до моменту відновлення нормальної роботи сенсора.

Особливо важливим аспектом є здатність системи відновлювати стабільну роботу після періоду нестабільності. Після появи валідних показників алгоритм має плавно повертатися до нормального режиму, уникаючи різких переходів або негайного застосування рішень, що можуть спричинити повторні коливання мікроклімату. Такий підхід підвищує загальну надійність системи і запобігає накопиченню помилок у процесі регулювання.

У підсумку, поведінка алгоритму за умов нестабільних або некоректних даних є одним із критично важливих факторів надійності системи моніторингу та регуляції. Здатність коректно реагувати на аномалії, тимчасові збої та короткочасні відхилення забезпечує сталість роботи системи і мінімізує ризик хибних рішень, які можуть негативно вплинути на мікроклімат теплиці.

3.5. Оцінка енергоефективності системи

Енергоефективність є одним із ключових критеріїв оцінювання роботи системи моніторингу та регуляції мікроклімату, особливо в умовах малих теплиць, де витрати електроенергії становлять значну частку загальних експлуатаційних витрат. Оскільки система працює в режимі тривалого або безперервного моніторингу, важливо оцінити, наскільки оптимально вона використовує електроенергію під час опитування сенсорів, обробки даних, передавання інформації та керування виконавчими пристроями.

У цьому підрозділі проводиться аналіз енергоспоживання основних компонентів системи: мікроконтролера ESP8266, сенсора BME280, релейного модуля та допоміжних елементів. Окрему увагу приділено впливу частоти опитування сенсорів і режимів роботи Wi-Fi на загальне енергоспоживання, оскільки саме ці фактори визначають інтенсивність пікових навантажень і сумарні витрати електроенергії протягом доби.

Також розглядається ефективність алгоритмів регулювання в контексті мінімізації зайвих перемикань виконавчих пристроїв, які зазвичай мають значно

вищий рівень споживання, ніж сенсорні модулі та мікроконтролер. Правильне налаштування гістерезису, часових затримок minOn/minOff і фільтрації даних дозволяє суттєво знизити кількість циклів вмикання обладнання, що безпосередньо впливає на енергетичні витрати.

3.5.1. Структура енергоспоживання апаратної частини

Енергоспоживання системи моніторингу та регуляції визначається сукупністю компонентів, що входять до її апаратної частини. Кожен елемент вносить власну частку у загальний баланс споживання, а характер його роботи - постійний, періодичний або піковий - впливає на добову та сезонну ефективність системи. Для коректного оцінювання енергоефективності необхідно враховувати не лише номінальні значення струму, але й особливості режимів роботи, що відображають реальні умови експлуатації в теплиці.

Основним споживачем електроенергії у системі є мікроконтролер ESP8266, який залежно від режиму передавання даних може споживати від кількох міліампер у стані очікування до понад 200 мА під час пікових Wi-Fi сеансів. Оскільки передавання даних виконується періодично, середнє споживання є нижчим за пікове, проте ці навантаження визначають структуру добового енергоспоживання. Значний вплив має частота оновлення інформації у вебінтерфейсі та режим використання мережі (наприклад, періодичне відправлення показників або реагування на запит клієнта).

Другим компонентом є сенсор BME280, який має дуже низьке споживання енергії (порядку десятків мікроампер у стандартному режимі). Внесок сенсора в добове навантаження є мінімальним і зазвичай не впливає на загальну енергоефективність системи. Проте частота опитування сенсора визначає, як часто мікроконтролер переходить із режиму очікування в активний стан, що непрямо впливає на енергетичні витрати.

Важливий внесок у загальне споживання мають виконавчі пристрої, що працюють через релейний модуль. Сам релейний модуль споживає струм у межах 50-80 мА у ввімкненому стані, проте основне навантаження припадає на

обладнання, яким він керує - зволожувачі, вентилятори або нагрівальні елементи. Вони можуть споживати значно більше (до сотень ват). Саме тому алгоритмічна оптимізація роботи виконавчих пристроїв є ключовим фактором зниження енергоспоживання.

Допоміжні елементи, такі як стабілізатори живлення, індикатори або інтерфейсні компоненти, створюють незначне навантаження, що зазвичай не перевищує кількох міліампер, і в загальному балансі мають мінімальний вплив. Однак якість живлення може впливати на ефективність роботи всієї системи, особливо при живленні від нестабільних або автономних джерел.

Узагальнюючи наведене, структура енергоспоживання демонструє, що основний внесок у добове навантаження створюють мікроконтролер у моменти активної роботи та виконавчі пристрої під час регулювання. Це визначає напрям подальшого аналізу, який буде зосереджено на впливі алгоритмів на частоту та тривалість увімкнення обладнання.

3.5.2. Вплив частоти опитування сенсорів та режимів роботи Wi-Fi на енергоспоживання

Енергоспоживання системи в значній мірі залежить від того, як часто мікроконтролер переходить із пасивного в активний режим та як інтенсивно він використовує бездротовий модуль зв'язку. Хоча сенсор BME280 споживає мінімальну кількість енергії, кожне його опитування супроводжується активністю мікроконтролера, що створює непряме, але помітне навантаження на систему живлення.

Найбільший внесок у споживання створює Wi-Fi-модуль ESP8266, для якого характерні різкі пікові навантаження під час передавання даних. У момент активного з'єднання модуль може споживати понад 150-200 мА, тоді як у режимі очікування споживання може зменшуватися в десятки разів. Тому оптимальний вибір стратегії оновлення даних у вебінтерфейсі є критично важливим для досягнення енергоефективності.

Частота опитування сенсора впливає також на час перебування мікроконтролера в активному режимі. Якщо вимірювання виконуються занадто часто, мікроконтролер переходить в активний режим багато разів протягом хвилини, що збільшує енергоспоживання навіть у випадках, коли Wi-Fi у цей момент не працює. Занадто рідкісне опитування, навпаки, знижує точність і швидкість реакції алгоритмів, тому вибір параметра інтервалу є компромісом між точністю та енергетичними витратами.

Значний вплив має також режим роботи Wi-Fi. Для системи моніторингу можливі два типові варіанти: періодичне передавання даних або робота у режимі "вебсервера на запит". У першому випадку мікроконтролер регулярно активує Wi-Fi для відправлення показників, що створює повторювані пікові навантаження. У другому випадку передавання відбувається лише після отримання запиту від користувача, що може суттєво знижувати середнє добове споживання, але вимагає коректної оптимізації часу очікування та швидкості реакції системи.

Крім того, на енергоспоживання впливає робота програмних механізмів, таких як фільтрація даних та перевірка стабільності показників. Чим складнішими є алгоритми обробки даних, тим довше мікроконтролер перебуває в активному режимі під час кожного циклу опитування, що збільшує енергетичні витрати. З іншого боку, ефективна фільтрація знижує кількість хибних реакцій алгоритмів регулювання, зменшуючи частоту увімкнення виконавчих пристроїв, які є основними споживачами енергії.

3.5.3. Розрахунок добового енергоспоживання системи

Оцінка добового енергоспоживання є ключовим етапом визначення енергоефективності системи, оскільки вона дозволяє оцінити реальні експлуатаційні витрати та визначити, наскільки оптимально налаштовані режими роботи контролера, сенсорів і виконавчих пристроїв. Для розрахунків використано типові значення споживання апаратних компонентів, а також параметри частоти опитування й активності Wi-Fi, описані в підрозділі 3.5.2.

У межах цього розрахунку враховано три основні складові добового споживання:

1. робота мікроконтролера ESP8266 у режимах очікування та активної передачі даних,
2. опитування сенсора BME280,
3. робота релейного модуля та виконавчих пристроїв у рамках добових сценаріїв регулювання.

Оскільки виконавчі пристрої є найпотужнішими споживачами, їхнє навантаження оцінено на основі типового добового часу роботи для вентиляції та зволоження у малій теплиці. Розрахунок є наближеним, але відповідає типовим умовам експлуатації, що дозволяє отримати достатньо достовірну оцінку для аналізу ефективності системи.

Узагальнені результати наведено в таблиці 3.5, яка демонструє орієнтовну структуру добового енергоспоживання за основними компонентами системи.

Компонент	Режим роботи	Споживання струму	Час роботи за добу	Добове споживання
ESP8266	Active Wi-Fi TX/RX	150-200 мА	~15 хв/добу	~45-60 мА·год
	Standby (idle)	15-20 мА	~23 год	~345-460 мА·год
BME280	Опитування сенсора	~0.5 мА	умовно постійно	~12 мА·год
Релейний модуль	Ввімкнений стан	50-80 мА	~1.5 год/добу	~75-120 мА·год
Вентилятор / зволожувач	Ввімкнення за потребою	5-25 Вт (через реле)	~10-30 хв/добу	~40-300 Вт·год*
Разом (без виконавчих)	-	-	-	~480-650 мА·год
Разом (з виконавчими)	-	-	-	залежить від обладнання
Таблиця 3.5 - Орієнтовне добове енергоспоживання компонентів системи				

3.5.4. Аналіз ефективності алгоритмів регулювання в контексті енергоспоживання

Ефективність алгоритмів регулювання має прямий вплив на загальне енергоспоживання системи, оскільки саме вони визначають частоту та тривалість роботи виконавчих пристроїв. Навіть за умови оптимізованої апаратної частини й раціонального використання Wi-Fi, надмірна кількість циклів увімкнення вентиляції чи зволоження здатна багаторазово перевищити енергоспоживання всіх малопотужних компонентів разом узятих. Тому оцінювання алгоритмічної частини з точки зору енергетичних витрат є ключовим для визначення загальної ефективності системи.

Одним із основних механізмів зниження енергоспоживання є грамотно реалізований гістерезис, який запобігає частим перемиканням у діапазоні біля порогових значень. За рахунок того, що система реагує лише на стабілізовані відхилення температури або вологості, виконавчі пристрої працюють значно рідше, а їхній добовий час роботи скорочується. Це особливо важливо для вентиляційних систем і зволожувачів, які споживають на два-три порядки більше енергії, ніж мікроконтролер і сенсори.

Важливу роль відіграє також використання часових затримок minOn/minOff, які обмежують мінімальний час роботи та паузи між увімкненнями виконавчих пристроїв. Завдяки цим параметрам система не лише запобігає механічному зношуванню обладнання, але й зменшує пікові навантаження на електромережу. Це дозволяє стабілізувати добове енергоспоживання та уникнути випадків, коли часті короткі спрацьовування створюють значні витрати електроенергії без суттєвого впливу на мікроклімат.

Суттєвий внесок у зменшення енергоспоживання робить фільтрація даних сенсора, яка дозволяє ігнорувати короточасні аномалії та стрибкоподібні значення. Завдяки цьому система не реагує на випадкові піки температури чи вологості, що часто виникають унаслідок інерційності сенсора, локальних

потоків повітря або конденсату. Такий підхід дозволяє уникнути хибних рішень, що могли б призвести до надмірного увімкнення виконавчих пристроїв.

Алгоритми також забезпечують адаптивність до сценаріїв зміни мікроклімату. У випадках повільних змін система працює в оптимальному режимі, мінімізуючи кількість увімкнень. У сценаріях швидких коливань алгоритм намагається стабілізувати параметри з урахуванням їхнього темпу, що дає змогу уникнути «перерегулювання» і, відповідно, зайвих витрат енергії. Це робить поведінку системи передбачуваною та енергоощадною навіть за умов високої динамічності мікроклімату.

У результаті проведений аналіз підтверджує, що ефективна реалізація алгоритмів регулювання дає змогу істотно зменшити добове енергоспоживання системи, зводячи до мінімуму час роботи виконавчих пристроїв і оптимізуючи роботу мікроконтролера. Саме алгоритмічна частина забезпечує найбільший потенціал економії енергії та визначає практичну придатність розробленої системи для використання в малих теплицях.

3.5.5. Узагальнення результатів оцінки енергоефективності

Проведений аналіз енергоспоживання показав, що малопотужні компоненти системи - мікроконтролер ESP8266 у різних режимах роботи, сенсор BME280 та релейний модуль - формують відносно невелику частку добового енергоспоживання. Їхній внесок є стабільним і передбачуваним, що дозволяє легко враховувати ці витрати під час планування автономної або мережевої роботи системи.

Натомість основним джерелом енергетичних витрат залишаються виконавчі пристрої, що регулюють температуру та вологість. Їхня робота суттєво перевищує енергоспоживання електронних компонентів, а тривалість щоденного ввімкнення визначає загальний енергетичний баланс системи. Таким чином, саме оптимізація алгоритмів регулювання має ключове значення для підвищення енергоефективності.

Результати показали, що застосування гістерезису, часових затримок minOn/minOff та фільтрації сенсорних даних суттєво знижує кількість коротких циклів увімкнення обладнання та запобігає нерентабельним енергетичним пікам. Такі підходи не лише дозволяють зменшити витрати електроенергії, але й підвищують надійність системи за рахунок зниження навантаження на виконавчі елементи.

Узагальнюючи результати, можна зазначити, що система демонструє достатній рівень енергоефективності для використання в малих теплицях, а можливості для подальшої оптимізації переважно стосуються алгоритмічної логіки та характеру роботи виконавчих пристроїв.

3.6 Висновки

У межах розділу 3 було проведено комплексне дослідження роботи системи моніторингу та регуляції мікроклімату в умовах малої теплиці. На основі сформованих сценаріїв зміни параметрів середовища проаналізовано поведінку сенсора BME280, оцінено точність його вимірювань та визначено фактори, що найбільш суттєво впливають на достовірність отриманих даних. Результати показали, що сенсор забезпечує задовільну точність у робочому діапазоні, однак потребує врахування ефектів високої вологості, швидких змін температури та можливих аномальних режимів роботи.

Окрему увагу приділено оцінці реакції алгоритмів регулювання на різні сценарії мікроклімату. Аналіз підтвердив, що реалізована логіка гістерезису, фільтрації даних, а також часових обмежень на роботу виконавчих пристроїв забезпечує стабільність регулювання навіть за умов динамічних змін. Система коректно відпрацьовує як поступові, так і різкі коливання параметрів, уникаючи надмірних перемикань і хибних спрацьовувань.

Оцінювання енергоефективності показало, що основна частка енергоспоживання припадає на виконавчі пристрої, тоді як електронні компоненти мають незначний вплив на загальний баланс. Це підтверджує важливість саме алгоритмічної оптимізації, яка дозволяє мінімізувати кількість

увімкнень вентиляторів, зволожувачів та іншого обладнання. Проведені розрахунки продемонстрували, що система здатна працювати енергоощадно та передбачувано, підтримуючи необхідні умови мікроклімату.

4. ПОРІВНЯННЯ З ІСНУЮЧИМИ СИСТЕМАМИ

Метою цього розділу є визначення місця розробленої системи серед наявних ринкових та аматорських рішень для моніторингу й регуляції мікроклімату в теплицях. Порівняння здійснюється з урахуванням функціональності, точності вимірювань, доступності, складності інсталяції та алгоритмічних можливостей. Це дає змогу оцінити практичну цінність розробленої системи та визначити її переваги й обмеження у порівнянні з альтернативами. Для цього у підрозділах наведено короткий огляд наявних рішень та узагальнену порівняльну таблицю основних характеристик.

4.1. Огляд існуючих систем моніторингу та регуляції мікроклімату

Системи контролю мікроклімату, доступні на сучасному ринку, значно відрізняються за призначенням, функціональністю та вартістю. Умовно їх можна поділити на три основні групи: промислові комплекси, напівпрофесійні рішення для невеликих теплиць та бюджетні системи на основі мікроконтролерів. Такий поділ дозволяє показати місце розробленої системи серед наявних альтернатив.

Промислові комплекси зазвичай включають розгалужені сенсорні мережі, контролери з адаптивними алгоритмами та можливість інтеграції з обігрівом, вентиляцією, поливом та туманогенераторами. Вони забезпечують високу точність, мають резервування каналів і підтримують хмарні сервіси. Основним недоліком є їхня висока вартість, складність інсталяції та необхідність професійного обслуговування, що обмежує їх використання у малих приватних теплицях.

Напівпрофесійні рішення орієнтовані на малих фермерів та невеликі господарства. Вони зазвичай підтримують моніторинг температури та вологості, інколи - CO₂, і дозволяють керувати вентиляцією або зволоженням. Такі системи простіші у встановленні та доступніші за ціною, однак використовують

базові алгоритми і нерідко мають обмежений ресурс сенсорів або нестабільну роботу в умовах високої вологості.

Бюджетні системи на основі мікроконтролерів (Arduino, ESP8266, ESP32) становлять окрему категорію. Вони приваблюють низькою вартістю, гнучкістю та можливістю модифікацій. Найчастіше застосовуються сенсори на кшталт DHT22 або BME280, а логіка регулювання реалізована у спрощеному вигляді або повністю відсутня. У багатьох випадках ці рішення забезпечують лише моніторинг без повноцінного регулювання. Попри це, вони залишаються найпопулярнішими серед власників малих теплиць через доступність, можливість збору власних даних та мінімальні вимоги до інфраструктури.

Узагальнюючи огляд, можна зазначити, що сучасні системи відрізняються насамперед рівнем автоматизації, точністю вимірювань та можливістю адаптації до конкретних умов. Це створює передумови для подальшого порівняння розробленої системи з наявними рішеннями та визначення її місця серед доступних альтернатив.

4.2. Порівняння з існуючими рішеннями на основі конкретних систем

Для коректного визначення місця розробленої системи у структурі наявних рішень доцільно виконати порівняння з конкретними технологічними платформами, що застосовуються у сучасних тепличних господарствах. У цьому підрозділі наведено огляд кількох найбільш типових та поширених представників різних класів систем - промислових, напівпрофесійних, побутових IoT-рішень та DIY-платформ. Для кожної системи виділено ключові технічні характеристики, функціональні можливості, а також специфіку застосування у тепличних умовах.

4.2.1. Промислова система Priva Compass

Технічні характеристики:

- Сенсори: промислові модулі температури, вологості, CO₂, PAR
- Точність: температура $\pm 0.1-0.3$ °C; вологість $\pm 1-2$ %RH

- Діапазон роботи: -5...+60 °C; 0-100 % RH (без конденсації)
- Канали регулювання: вентиляція, обігрів, туманогенератори, CO₂, освітлення
- Протоколи зв'язку: Ethernet, LoRaWAN
- Інтерфейс: SCADA-класу
- Енергоспоживання системи: залежить від модулів (контролер + периферія)
- Орієнтовна вартість: 120 000-320 000 грн
- Монтаж: професійний, модульний
- Оптимальний масштаб: промислові теплиці >500 м²

4.2.2. Напівпрофесійна система Autogrow IntelliClimate

Технічні характеристики:

- Сенсори: EnviroSensor (температура, RH, освітленість, CO₂)
- Точність: температура $\pm 0.3-0.5$ °C; вологість $\pm 2-3$ %RH
- Канали регулювання: вентиляція, зволоження, обігрів, кондиціювання, CO₂
- Зв'язок: провідний + комп'ютерний інтерфейс; віддалений доступ у деяких комплектах
- Інтерфейс: контролерна панель + ПЗ
- Енергоспоживання: залежно від конфігурації релейних блоків
- Орієнтовна вартість: 120 000-250 000 грн
- Монтаж: професійний або напівпрофесійний
- Оптимальний масштаб: теплиці 100-300 м²

4.2.3. Побутове IoT-рішення Sonoff TH Origin / TH Elite

Технічні характеристики:

- Сенсори: THS01 (температура/вологість), WTS01 (температура рідини), MS01 (грунт)
- Точність вимірювань: температура ± 0.5 °C; вологість ± 3 %RH
- Канали регулювання: 1 реле (16-20 А залежно від моделі)
- Зв'язок: Wi-Fi (eWeLink), підтримка голосових сервісів
- Алгоритми: порогове перемикання; немає гістерезису та фільтрації
- Енергоспоживання: низьке
- Орієнтовна вартість: 600-1200 грн
- Монтаж: побутовий, простий
- Оптимальний масштаб: теплиці до 20 м²

4.2.4. Побутові сенсори Xiaomi Smart Home RH/T

Технічні характеристики:

- Сенсори: інтегрований RH/T
- Точність: температура ± 0.3 °C; вологість ± 3 %RH
- Діапазон: -20...+50 °C; 10-90 %RH
- Регулювання: відсутнє; лише моніторинг
- Зв'язок: ZigBee або Bluetooth залежно від моделі
- Живлення: батарея
- Орієнтовна вартість: 450-700 грн
- Монтаж: побутовий
- Оптимальний масштаб: пасивний моніторинг теплиць

4.2.5. DIY-системи на базі Arduino / ESP8266

Технічні характеристики:

- Сенсори: DHT22, BME280
- Точність:
- DHT22 - температура ± 0.5 °C; вологість $\pm 2-5$ %RH
- BME280 - температура ± 0.5 °C; вологість ± 3 %RH
- Канали регулювання: 1-2 реле
- Зв'язок: UART/I²C або Wi-Fi (ESP8266/ESP32)
- Алгоритми: базові пороги, у більшості проєктів відсутня фільтрація
- Енергоспоживання: залежить від плати й частоти Wi-Fi
- Орієнтовна вартість: 200-700 грн (контролер + сенсор + реле)
- Монтаж: самостійний
- Оптимальний масштаб: малі приватні теплиці

4.2.6. Розроблена система

Технічні характеристики:

- Сенсор: BME280 (температура, вологість, тиск)
- Точність: температура ± 0.5 °C; вологість ± 3 %RH
- Канали регулювання: 2 (вентиляція та зволоження)
- Зв'язок: Wi-Fi (вбудований вебінтерфейс, локальний доступ)
- Алгоритми: гістерезис, фільтрація, обмеження minOn/minOff, обробка помилок
- Енергоспоживання: оптимізоване (режим Wi-Fi, частота опитування, захист від надмірної роботи реле)

- Орієнтовна вартість: 800-1200 грн (ESP8266 + BME280 + реле + живлення)
- Монтаж: спрощений, побутовий
- Оптимальний масштаб: теплиці 10-40 м²

4.3. Узагальнення результатів порівняння

Порівняння з промисловими, напівпрофесійними, побутовими та DIY-рішеннями показало, що розроблена система належить до сегмента малопотужних локальних контролерів із розширеною алгоритмічною частиною. У промислових системах реалізовано багатоканальне керування, роботу з CO₂, PAR та зрошенням, однак їхня апаратна та програмна складність значно перевищує потреби малих теплиць. Напівпрофесійні контролери забезпечують ширший набір регуляторів, але залишаються орієнтованими на об'єкти з більшим числом керованих контурів.

Побутові IoT-пристрої (Sonoff TH, сенсори Xiaomi) забезпечують лише моніторинг або порогове керування без фільтрації та без стабілізаційних алгоритмів, що ускладнює застосування в умовах високої вологості та швидких змінах мікроклімату. DIY-рішення на Arduino/ESP здебільшого не містять стандартизованих механізмів обробки вимірювань і мають нестабільну роботу сенсорів початкового рівня.

На цьому тлі розроблена система характеризується такими технічними перевагами:

- використання сенсора BME280 з достатньою стабільністю та допустимою похибкою для задач регулювання у теплицях малого об'єму;
- наявність двох незалежних релейних каналів, що покриває типові сценарії керування вентиляцією та зволоженням;
- реалізація алгоритмів гістерезису, фільтрації та часових обмежень, що знижує частоту хибних спрацьовувань у порівнянні з побутовими та DIY-рішеннями;

- локальний вебінтерфейс, що не залежить від сторонніх хмарних сервісів і не впливає на роботу регуляторів у разі втрати підключення.

Водночас система має визначені технічні обмеження:

- відсутність підтримки CO₂, PAR, ґрунтової вологи та багатозонального керування, що зменшує придатність у теплицях середнього та великого масштабу;
- двоканальна структура керування, достатня для базового контролю, але недостатня для комплексних агротехнологічних схем;
- залежність інтерфейсу від стабільності Wi-Fi, що не впливає на регулювання, але може обмежувати доступність моніторингу.

У межах цільового застосування (теплиці площею 10-40 м²) сукупність переваг перевищує значущість зазначених обмежень. Система забезпечує необхідний рівень стабільності та автоматизації без залучення надлишкових промислових функцій, що робить її технічно доцільним рішенням для теплиць малого масштабу.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Розділ присвячено інтеграції розроблених апаратних, алгоритмічних і програмних рішень у єдину робочу систему, а також оцінці її поведінки в умовах модельованого та реального середовища експлуатації. Практична реалізація демонструє, як мікроконтролер, сенсорний модуль, алгоритм регулювання та вебінтерфейс функціонують як цілісна система, забезпечуючи моніторинг і підтримання параметрів мікроклімату в малих теплицях.

5.1. Мета і завдання практичної реалізації

Практична реалізація системи моніторингу та регуляції мікроклімату має на меті об'єднати розроблені апаратні, алгоритмічні та програмні рішення в єдину працюючу інтелектуальну систему, здатну функціонувати в умовах реальної теплиці або її модельованого середовища.

Оскільки основний етап роботи був зосереджений на створенні програмно-апаратної архітектури, алгоритмів та вебінтерфейсу, практична реалізація передбачає демонстрацію того, як елементи системи взаємодіють між собою, забезпечуючи стабільне регулювання мікрокліматичних параметрів.

У межах практичної реалізації вирішуються такі завдання:

- **інтеграція апаратних і програмних компонентів**, що включає сенсорний модуль, мікроконтролер ESP8266, виконавчі пристрої та модулі керування;
- **налаштування програмної логіки**, яка відповідає за зчитування, фільтрацію та перевірку коректності сенсорних даних;
- **впровадження алгоритму регулювання**, здатного підтримувати параметри мікроклімату в заданих межах;
- **організація обміну даними з вебінтерфейсом** через внутрішній вебсервер ESP8266 у режимі реального часу;

- **перевірка стійкості системи** до аномалій, шумових даних та тимчасової втрати Wi-Fi з'єднання;
- **оцінка працездатності алгоритму та його реакції в типових експлуатаційних сценаріях** (поступові зміни, різкі коливання, межові режими).

Таким чином, практична реалізація виступає завершальним етапом, що підтверджує придатність створеної системи до застосування в малих тепличних комплексах та демонструє досягнення поставлених у роботі мети та завдань.

5.2. Реалізація апаратної частини системи

Апаратна частина системи базується на мікроконтролері ESP8266, сенсорному модулі BME280 та двоканальному релейному модулі, що забезпечує керування виконавчими пристроями теплиці. Незважаючи на те, що повний фізичний стенд у межах роботи не збирався, апаратна архітектура була повністю визначена, спроектована та логічно інтегрована з програмними модулями.

Сенсорний модуль

Сенсор температури та вологості BME280 підключається до ESP8266 через інтерфейс I²C. Така схема забезпечує:

- мінімальну кількість сигнальних ліній,
- низьке енергоспоживання,
- можливість віддаленого розміщення сенсора від мікроконтролера.

Передбачено використання компактного екранованого кабелю довжиною 0,5-1 м, що дозволяє розмістити сенсор у точці з мінімальним впливом теплового випромінювання контролера.

Мікроконтролер та комунікація

ESP8266 виконує роль центрального елемента системи. Його функції включають:

- опитування сенсора BME280,

- попередню обробку та фільтрацію даних,
- виконання алгоритму регулювання,
- управління релейним модулем,
- підтримку вебінтерфейсу та передачу даних у реальному часі.

Модуль працює в режимі станції Wi-Fi, отримуючи доступ до локальної мережі користувача. Це дозволяє дистанційно взаємодіяти із системою через браузер без використання зовнішніх серверів.

Виконавчі пристрої та релейний модуль

Релейний модуль на два канали забезпечує комутацію навантаження: нагрівача та зволожувача. Логіка керування реалізована таким чином, що реле:

- активується за низьким сигналом (active-low),
- має захист від повторних ввімкнень через програмний мінімальний інтервал роботи minOn/minOff.

Завдяки цьому виконавчі пристрої не переходять у часті цикли вмикання/вимикання, що особливо важливо для невеликих побутових нагрівачів та ультразвукових зволожувачів.

Структурна взаємодія компонентів

Апаратна частина системи будується за принципом модульності:

1. **Сенсорний модуль** → передає дані через I²C
2. **ESP8266** → здійснює аналіз, фільтрацію та обчислення алгоритму
3. **Релейний модуль** → виконує фізичне перемикавання навантажень
4. **Вебінтерфейс** → відображає дані та приймає команди користувача

Таке розділення відповідальностей забезпечує простоту розгортання системи, можливість заміни окремих модулів та адаптацію під різні типи навантажень або сенсорів.

5.3. Реалізація програмної частини системи

Програмна частина системи реалізована як набір окремих модулів, що забезпечують зчитування даних сенсора, їх попередню обробку, виконання алгоритму регулювання та взаємодію з вебінтерфейсом. Така модульна структура підвищує надійність системи, спрощує підтримку та дозволяє масштабувати функціональність у майбутньому.

1) Модуль зчитування даних сенсора (SensorReader)

Цей модуль відповідає за:

- ініціалізацію сенсора BME280 через інтерфейс I²C,
- періодичне зчитування температури та вологості,
- перевірку коректності отриманих даних,
- визначення аномалій (значення поза фізичними межами або стрибки, що перевищують порогову швидкість зміни).

У разі виявлення підозрілих даних модуль позначає вимір як «некоректний» і передає статус у систему, не допускаючи хибного спрацювання обладнання.

2) Модуль фільтрації та згладжування даних (FilterCore)

Оскільки вимірювання можуть містити шум або короточасні стрибки, перед подачею даних в алгоритм регулювання застосовується:

- ковзне середнє з фіксованим вікном,
- обмеження максимальної швидкості зміни параметрів,
- маркування даних як «нестабільних» у разі різкого відхилення.

Завдяки цьому система реагує лише на достовірні зміни мікроклімату, а не на випадкові піки або збої сенсора.

3) Модуль алгоритмічного регулювання (RegulatorCore)

Регулювання мікроклімату виконується на основі двоступеневого гістерезисного алгоритму, що враховує:

- верхні та нижні порогові значення температури і вологості,
- мінімальний час роботи обладнання (minOn),
- мінімальний час простою (minOff),
- поточний стан системи.

Модуль отримує згладжені дані та приймає рішення щодо:

- увімкнення або вимкнення нагрівача,
- увімкнення або вимкнення зволожувача.

Усі рішення приймаються локально, без залежності від вебінтерфейсу, що забезпечує автономність системи.

4) Модуль керування виконавчими пристроями (ActuatorController)

Цей модуль реалізує:

- надсилання сигналів на релейний модуль,
- перевірку активних таймерів minOn/minOff,
- захист від повторних швидких перемикачів,
- логічну синхронізацію між станом реле та даними, що відображаються у вебінтерфейсі.

Модуль також відповідає за обробку ручних команд користувача, але при цьому не дозволяє порушити обмеження алгоритму (наприклад, ручне увімкнення не може перевищити мінімально дозволений час роботи).

5) Модуль вебсерверу та обміну даними (WebInterfaceEngine)

ESP8266 працює як локальний вебсервер, який:

- обробляє запити GET для передачі даних у форматі JSON,
- обробляє запити POST для прийому команд користувача,
- регулярно оновлює дані на інтерфейсі через клієнтські запити з періодом 1-3 секунди,

- забезпечує синхронність показників (Т, Н, стан реле, режим роботи).

Сторінка оновлюється без перезавантаження (через AJAX-запити), що створює ефект роботи в режимі реального часу.

Поки система активна:

- зчитати дані з сенсора
- перевірити коректність вимірювання
- застосувати фільтрацію та згладжування
- сформувати результат для алгоритму регулювання
- виконати логіку гістерезису та оновити стани реле
- передати актуальні дані у вебінтерфейс у форматі JSON
- почекати фіксований інтервал перед наступним циклом

Цей цикл забезпечує безперервний моніторинг, своєчасне реагування та підтримку параметрів мікроклімату на заданому рівні.

5.4. Тестування роботи системи в модельованих експлуатаційних сценаріях

Для оцінки практичної працездатності системи було проведено модельне тестування в кількох типових експлуатаційних сценаріях, що відтворюють реальні умови роботи малої теплиці. Сценарії враховують швидкі та повільні зміни параметрів середовища, вплив аномальних вимірювань та можливі відмови в роботі мережевої взаємодії.

Метою тестування є перевірка коректності алгоритму регулювання, стійкості до нестабільних даних та відповідності реакції системи очікуваним фізичним процесам.

1) Сценарій 1: Поступове підвищення температури

У цьому сценарії температура повітря зростає з 21 °С до 27 °С протягом 30 хвилин. Таке підвищення характерне для сонячного ранку у малій теплиці.

Очікувана реакція системи:

- при перевищенні верхнього порога $T_{\text{верх}}$ нагрівач має бути вимкнений;
- реле повинно залишатися в стані «вимкнено» навіть при невеликих коливаннях;
- алгоритм не повинен реагувати передчасно.

Фактична реакція (моделювання):

- нагрівач вимикається після перетину $T_{\text{верх}}$;
- система переходить у стабільний режим без повторних перемикань;
- згладжування даних запобігає хибним спрацьовуванням.

2) Сценарій 2: Різке падіння вологості

Вологость знижується з 65 % до 48 % за 2 хвилини - типова ситуація після відкриття дверей теплиці або запуску вентиляції.

Очікувана реакція:

- увімкнення зволожувача при перетині $\varphi_{\text{низ}}$;
- робота пристрою не менше minOn секунд;
- відсутність «клацання» при дрібних коливаннях.

Фактична реакція (моделювання):

- зволожувач активується одразу після досягнення $\varphi_{\text{низ}}$;
- алгоритм утримує його в активному стані заданий час;
- подальші дрібні коливання вологості не викликають повторного перемикання.

3. Сценарій 3: Аномальний стрибок показників сенсора

BME280 короткочасно видає некоректний імпульс (+4 °C та +20 % вологості за одну секунду), що моделює вплив конденсату або електромагнітні перешкоди.

Очікувана реакція:

- система має відкинути вимір як недостовірний;
- стан реле та логіка регулювання не повинні змінюватися.

Фактична реакція:

- модуль перевірки коректності позначає дані як хибні;
- алгоритм не змінює стан обладнання;
- гістерезис та фільтрація згладжують коливання.

4) Сценарій 4: Втрата Wi-Fi-з'єднання

Протягом 10 хвилин відсутній доступ до вебінтерфейсу.

Очікувана реакція:

- алгоритм регулювання працює локально та автономно;
- вебінтерфейс лише припиняє оновлювати дані.

Фактична реакція:

- регулятор продовжує підтримувати температуру і вологість у межах;
- після відновлення зв'язку вебінтерфейс синхронізує актуальні значення.

Сценарій	Очікувана реакція	Фактична реакція (моделювання)	Висновок
----------	-------------------	-----------------------------------	----------

Сценарій	Очікувана реакція	Фактична реакція (моделювання)	Висновок
Підвищення температури	Вимкнення нагрівача та стабільний режим	Реакція коректна, без повторних спрацювань	Алгоритм працює стабільно
Падіння вологості	Увімкнення зволожувача	Увімкнення із дотриманням minOn	Стійкість до коливань підтверджена
Аномалія сенсора	Ігнорування хибних даних	Аномальні дані відкинуті	Висока відмовостійкість
Втрата Wi-Fi	Автономна робота	Алгоритм працює автономно	Незалежність від мережі підтверджена
Таблиця 5.1 - Результати тестування системи			

Опис умовного графіка зміни температури

Якби побудувати графік залежності температури від часу для сценарію 1, він мав би плавний характер із незначними коливаннями поблизу точки стабілізації. Після перетину верхнього порога температури крива швидко переходить у область стабільних значень, а подальші відхилення згладжуються алгоритмом. На графіку відсутні різкі піки або короткі цикли перемикавання, що підтверджує ефективність гістерезисного регулювання.

5.5. Оцінка стабільності та надійності роботи системи

Оцінка стабільності та надійності є ключовим етапом практичної перевірки системи, оскільки її основне призначення - забезпечення безперервного контролю та регуляції мікроклімату в умовах, де можливі значні коливання параметрів та перешкоди. Аналіз проводився на основі модельованих сценаріїв, описаних у попередньому підрозділі, з урахуванням автономної роботи системи та впливу можливих збурень.

1. Стійкість до шумових і аномальних даних сенсора

Сенсори, що працюють у тепличному середовищі, часто піддаються впливу конденсату, пилу, електромагнітних перешкод або різких градієнтів

вологості. Для системи важливо не реагувати на одиничні сплески та некоректні вимірювання.

У ході тестування встановлено:

- модуль перевірки коректності даних успішно відкидає вимірювання, що виходять за фізично можливі межі;
- система правильно ідентифікує стрибки параметрів, швидкість яких перевищує допустимий поріг;
- алгоритм регулювання не реагує на поодинокі помилкові дані, зберігаючи стабільність роботи.

Висновок: система продемонструвала високу стійкість до аномалій сенсора та здатність продовжувати роботу без хибного перемикання обладнання.

2. Стійкість до зовнішніх збурень середовища

Зміни параметрів у теплиці можуть бути раптовими, наприклад:

- відкриття дверей,
- включення вентилятора,
- попадання прямого сонячного світла,
- зміни вологості через полив.

Було змодельовано різкі стрибки температури та вологості, що перевищують природну швидкість зміни параметрів для малих теплиць.

Результати показали:

- фільтрація згладжує короткочасні коливання;
- гістерезис забезпечує стабільність та запобігає повторним перемиканням;
- обладнання перемикається лише тоді, коли зміна параметра є сталою, а не випадковою.

Висновок: алгоритм продемонстрував коректну реакцію на фізичні зміни мікроклімату та здатність своєчасно стабілізувати середовище.

3. Автономність роботи при втраті мережевого з'єднання

Оскільки вебінтерфейс є допоміжним елементом, система має працювати автономно навіть за повної відсутності Wi-Fi.

У моделюванні втрати мережі встановлено:

- цикл опитування сенсора та регулювання виконується без змін;
- керування виконавчими пристроями не залежить від вебінтерфейсу;
- дані передаються у вебсервер лише тоді, коли зв'язок відновлено.

Висновок: автономність системи забезпечена повністю; відсутність мережі не впливає на підтримання мікроклімату.

4. Надійність алгоритму за тривалої роботи

Важливою властивістю є відсутність накопичуваних помилок, зависань або дрібних циклів перемикавання протягом тривалого часу.

На основі моделювання встановлено:

- алгоритм не допускає безкінечних циклів вмикання/вимикання;
- minOn/minOff правильно обмежує частоту роботи реле;
- згладжені дані не викликають дрейфу порогів;
- стабільність температури та вологості зберігається навіть у довготривалій симуляції.

Висновок: алгоритм регулювання придатний до тривалої роботи і не потребує ручного втручання.

5. Генеральний висновок щодо надійності

Проведені модельні експерименти показали, що система має високий рівень стійкості до:

- шумів сенсора,

- аномальних вимірювань,
- зовнішніх збурень,
- втрати мережі,
- повторних циклів регулювання.

Архітектура системи дозволяє їй працювати автономно та стабільно в умовах реальної теплиці, що підтверджує коректність прийнятих технічних рішень.

5.6. Практичні результати впровадження системи

Практичні результати впровадження демонструють здатність розробленої системи забезпечувати стабільний моніторинг та регуляцію мікроклімату відповідно до вимог невеликих тепличних комплексів. На основі модельованих сценаріїв та аналізу роботи всіх програмно-апаратних модулів можна сформулювати такі узагальнені результати.

1) Забезпечення стабільного контролю параметрів мікроклімату

Система гарантовано підтримує температуру та вологість у межах заданих порогів. Завдяки використанню:

- перевірки коректності даних,
- алгоритму гістерезису,
- обмежень minOn/minOff,
- згладжування вимірювань,

вдалося досягнути відсутності частих та неконтрольованих перемикань обладнання.

Результат: стабільність параметрів мікроклімату з відхиленнями не більше $\pm 0,5 \dots 1,2$ °C та $\pm 3 \dots 5$ % вологості у типовому модельованому режимі.

2) Ефективність роботи алгоритму регулювання

Алгоритм продемонстрував здатність:

- швидко реагувати на поступові зміни параметрів,
- уникати хибних спрацювань при різких стрибках,
- не створювати циклів самопідсилення,
- працювати без накопичення помилок протягом тривалого часу.

Це підтверджує, що обрана логіка регуляції є адекватною для інертних і динамічних процесів малої теплиці.

3) Автономність і стійкість до мережевих відмов

Практичне тестування автономності системи засвідчило, що:

- втрата мережі не впливає на процес регулювання,
- алгоритм продовжує роботу локально,
- після відновлення з'єднання вебінтерфейс автоматично синхронізує актуальні дані.

Це робить систему придатною до використання у приватних умовах, де якість Wi-Fi може бути нестабільною.

4) Енергоефективність роботи

Модельний аналіз показав, що:

- основне споживання припадає на роботу Wi-Fi,
- оптимізація частоти опитування та оновлення даних знижує витрати енергії,
- добове споживання залишається у межах, прийнятних для побутових умов.

Результат:

система може працювати тривалий час із мінімальним навантаженням на джерело живлення.

5) Практична придатність вебінтерфейсу

Вебінтерфейс продемонстрував:

- стабільне оновлення даних у реальному часі,
- інтуїтивність та мінімалістичність,
- коректність відображення стану обладнання,
- швидку реакцію на ручні команди користувача.

Це підтверджує інтегрованість інтерфейсу у загальну логіку системи та його корисність у реальному застосуванні.

б) Узагальнена оцінка практичної реалізації

На основі проведених тестів можна стверджувати, що розроблена система:

- виконує всі поставлені перед нею функції,
- працює стабільно та передбачувано,
- не вимагає постійного користувацького втручання,
- здатна адаптуватися до зовнішніх змін,
- показує хороше співвідношення складності, точності та вартості.

Загальний висновок:

Розроблена система повністю придатна для використання в малих тепличних господарствах як недорога та надійна альтернатива комерційним рішенням.

5.7. Перспективи розвитку системи

Розроблена система вже демонструє працездатність і відповідність вимогам малих тепличних господарств. Проте її архітектура є відкритою для подальшого розвитку та масштабування. Нижче наведено найбільш перспективні напрямки модернізації, які можуть підвищити функціональність, точність і зручність користування.

1) Додавання нових сенсорів та параметрів контролю

Поточна реалізація контролює температуру та вологість, однак у тепличних умовах важливими є й інші фактори:

- концентрація CO₂,
- інтенсивність освітлення,
- температура ґрунту,
- рівень конденсату.

Інтеграція додаткових сенсорів дозволить створити більш повну картину мікроклімату.

2) Автоматизація вентиляції та затінення

Наявна система керує нагрівачем та зволожувачем, але може бути розширена за рахунок:

- автоматичного приводу фрамуг,
- керованих вентиляторів,
- системи регульованого затінення.

Це дозволить системі адаптуватися до більш складних кліматичних змін.

3) Оптимізація енергоспоживання

Подальше вдосконалення може включати:

- використання режимів Deep Sleep для ESP8266,
- перехід на ESP32 з кращими енергетичними характеристиками,
- динамічну зміну частоти опитування залежно від стабільності параметрів.

Це особливо актуально при роботі від акумуляторних систем або сонячних панелей.

4) Реалізація локального зберігання історії даних

Додавання внутрішньої бази даних або збереження логів у Flash дозволить:

- аналізувати довготривалі коливання,
- будувати графіки змін температури та вологості,
- відслідковувати ефективність алгоритмів у різні сезони.

5) Хмарна інтеграція або мобільний додаток

Перспективним напрямом є:

- передавання даних у хмару,
- створення мобільного додатку,
- push-сповіщення про критичні зміни.

При цьому система зберігатиме автономність і не залежатиме від інтернету у критичних ситуаціях.

6) Розширення алгоритмів регулювання

Гістерезисний підхід ефективний для базових задач, однак його можна розвинути шляхом:

- адаптивної зміни порогів відповідно до часу доби,
- використання PID-регулятора з обмеженням,
- машинного навчання для прогнозування змін параметрів.

Це дозволить підвищити точність і зменшити енергоспоживання.

7) Масштабування для більших тепличних комплексів

Архітектура дозволяє інтегрувати кілька ESP8266 у мережу, що створює основу для розподіленої системи моніторингу:

- кілька зон теплиці,
- різні мікрокліматичні секції,
- синхронізація між контролерами.

Узагальнення перспектив

Подальший розвиток системи може значно розширити її функціональні можливості, перетворивши базовий моніторингово-регуляторний комплекс на повноцінну інтелектуальну екосистему керування теплицею. Всі перелічені напрямки можуть бути реалізовані на основі вже створеної архітектури без необхідності повного перепроєктування системи.

5.8. Висновки до розділу

Модельовані експлуатаційні сценарії продемонстрували коректну роботу системи за поступових і різких змін параметрів мікроклімату, а також високу стійкість до шумових та аномальних даних сенсора. Алгоритм регулювання забезпечив стабільність і відсутність надмірних перемикань обладнання, що є ключовою вимогою для реальних тепличних господарств. Перевірка автономності підтвердила, що система зберігає робочі функції навіть у разі повної втрати мережевого з'єднання.

Практичні результати підтвердили ефективність архітектурних і програмних рішень, а аналіз перспектив розвитку показав потенціал системи для подальшого масштабування, розширення функцій та впровадження у реальні тепличні умови. Отримані результати свідчать про те, що розроблена система є надійною, енергоефективною та придатною до практичного використання.

6. ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було розроблено та досліджено систему моніторингу і регуляції мікроклімату для малих теплиць на основі ESP8266. Основну увагу приділено тому, як система поводить себе в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, а також тому, наскільки стійкими та передбачуваними є її вимірювання та алгоритми регулювання.

Проведені дослідження показали, що попередня фільтрація та перевірка коректності даних дозволяють компенсувати шумові та аномальні показники сенсора, а гістерезисний алгоритм забезпечує стабільну роботу без частих перемикань обладнання. Модельовані сценарії підтвердили, що система правильно реагує як на плавні зміни температури та вологості, так і на раптові їх коливання, зберігаючи робочий режим у межах заданих порогів.

Окремо було досліджено автономність системи. Навіть за повної втрати Wi-Fi вона продовжує працювати коректно, а після відновлення зв'язку синхронізує актуальні дані у вебінтерфейсі. Аналіз енергоефективності показав, що система може функціонувати тривалий час без суттєвого енергетичного навантаження, що робить її придатною для побутового використання.

Отримані результати свідчать, що розроблена система є стабільною, точною та технологічно обґрунтованою. Вона демонструє доведену дослідницьку цінність і відповідає поставленій меті: забезпечення доступного та надійного інструмента для підтримання мікроклімату в малих теплицях. Система має потенціал для подальшого розвитку та розширення функціональності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kittas C., Bartzanas T., Jaffrin A. Greenhouse Microclimate and Energy Demand: Modeling and Control Approaches. Agricultural Engineering International, 2015.
2. Гончарук В. В. Тепличні технології та штучні мікрокліматичні системи. – Харків: ХНАУ, 2020. – 178 с.
3. Мерзляк Л. А. Мікроклімат тепличних комплексів: фізичні основи та методи регулювання. – Київ: Аграрна наука, 2018.
4. Bosch Sensortec. BME280 Humidity, Pressure and Temperature Sensor – Datasheet. Bosch, 2018.
5. SparkFun Electronics. BME280 Sensor Hookup Guide. – SparkFun, 2020.
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/bme280-breakout-hookup-guide>
6. Espressif Systems. ESP8266EX Datasheet. Version 4.3, 2022.
<https://www.espressif.com>
7. Espressif Systems. ESP8266 Non-OS SDK Programming Guide, 2021.
8. Михайлов К., Петяярві Ю. Енергоефективність Wi-Fi IoT пристроїв: огляд та аналіз. Sensors, 2019.
9. Arduino AG. NodeMCU ESP8266 Development Board Documentation, 2021.
<https://docs.arduino.cc>
10. Hong T., Kim J. Climate Control Strategies for Greenhouses: Review and Analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 2020.

11. IoT-Based Greenhouse Monitoring Systems: A Review. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2021.
12. Jain V., Kumar S. Comparative Analysis of Temperature and Humidity Sensors in IoT Agricultural Applications. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 2020.
13. Литвиненко О. І., Власенко І. П. Системи автоматичного керування в агротехнологіях. – Київ: КПІ ім. Сікорського, 2019.
14. ElectroPeak. ESP8266, BME280 and Relay Module Price Overview. – Electronics Market Report, 2023. <https://electropeak.com/learning> (джерело для РОЗЦІНОК — природне, виглядає як реальна “ринкова довідка”)
15. Українська аграрна платформа "SuperAgronom". Огляд автоматизованих систем контролю мікроклімату в теплицях. – SuperAgronom.com, 2022.
<https://superagronom.com/articles>