

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розробка автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним
КОМПЛЕКСОМ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТІВМ-24-1
Іван ДОЛГОШЕЯ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олександр ЦИМБАЛ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Долгошея Іван Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

" 21 " грудня 2025 р.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ID' with a flourish.

Іван ДОЛГОШЕЯ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«22» грудня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Долгошеї Івану Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка автоматизованої системи моніторингу та
керування тепличним комплексом

затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1029Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Середовище програмування Arduino IDE;
3.2 Freezing; 3.3 Arduino Cloud IT

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом;

4.3 Розробка моделі мікроклімату тепличного комплексу; 4.4 Розробка вимог до
системи; 4.5 Розробка структурної схеми; 4.6 Вибір апаратного забезпечення;

4.7 Розробка схеми підключення апаратних модулів; 4.8 Розрахунок
розробленої системи на стійкість; 4.9 Збірка макета; 4.10 Розробка алгоритму

роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3; 4.11 Розробка програми моніторингу та
керування тепличним комплексом; 4.12 Розробка програми візуалізацій даних

для оператора; 4.13 Проведення експерименту та аналіз отриманих даних;
4.14 Висновки

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 3 табл., 22 рис., 3 дод., 17 джерел.

ТЕПЛИЧНИЙ КОМПЛЕКС, МІКРОКЛІМАТ, МОНІТОРИНГ, ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, КІБЕРФІЗИЧНІ СИСТЕМИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.

Мета роботи – підвищення ефективності моніторингу за параметрами мікроклімату в тепличних комплексах за рахунок розробки децентралізованої системи керування мікрокліматом на базі кіберфізичних систем.

Об’єкт дослідження – процес керування теплицею.

Предмет дослідження – моделі та методи децентралізованої системи керування на базі кіберфізичних систем.

В кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом. Розроблено моделі мікроклімату тепличного комплексу, вимоги до системи та структурна схема децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом. Проведено вибір апаратного забезпечення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату, розроблено схему підключення апаратних модулів. Проведено розрахунок розробленої системи на стійкість та зібрано макет. Розроблено алгоритм роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3, програму моніторингу та керування тепличним комплексом на базі модуля ESP8266 NodeMCU V3 та програму візуалізації даних для оператора. Проведено експерименти та аналіз отриманих даних. Результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.5. Створити фінансову та інституційну системи (інноваційну інфраструктуру), що забезпечуватимуть розвиток наукових досліджень та науковотехнічних (експериментальних) розробок.

ABSTRACT

Explanatory note: 89 p., 3 table, 22 figures, 3 appendices, 17 sources.

GREENHOUSE COMPLEX, MICROCLIMATE, MONITORING, DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM, CYBER-PHYSICAL SYSTEMS, AUTOMATION, INTELLECTUAL SYSTEMS.

The purpose of the work is to increase the efficiency of monitoring microclimate parameters in greenhouse complexes by developing a decentralized microclimate control system based on cyber-physical systems.

The object of the study is the greenhouse control process.

The subject of the study is models and methods of a decentralized control system based on cyber-physical systems.

The qualification work analyzed modern monitoring and control systems for the greenhouse complex. The greenhouse complex microclimate models, system requirements and the structural diagram of the decentralized greenhouse complex monitoring and control system were developed. The hardware of the local module for monitoring microclimate parameters was selected, the hardware module connection diagram was developed. The stability calculation of the developed system was performed and the layout was assembled. The ESP8266 NodeMCU V3 module operation algorithm was developed, the greenhouse complex monitoring and control program based on the ESP8266 NodeMCU V3 module and the data visualization program for the operator were developed. Experiments and analysis of the obtained data were conducted. The results of the qualification work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely 9.5. Create a financial and institutional system (innovative infrastructure) that will ensure the development of scientific research and scientific and technical (experimental) developments.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом..	12
1.1 Аналіз сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом	12
1.2 Аналіз методів керування тепличними комплексами	16
1.3 Аналіз структури та апаратного забезпечення систем моніторингу та керування тепличним комплексом	17
1.4 Постановка задач досліджень	21
2 Розробка автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом	23
2.1 Розробка моделі мікроклімату тепличного комплексу	23
2.2 Розробка вимог до системи моніторингу та керування тепличним комплексом	28
2.3 Розробка структурної схеми децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом	30
2.4 Вибір апаратного забезпечення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату	36
2.5 Розробка схеми підключення апаратних модулів.....	40
2.6 Розрахунок розробленої системи на стійкість	42
2.7 Збірка макета автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом.....	47
2.8 Висновки до 2 розділу	48
3 Розробка програмного забезпечення системи моніторингу та керування тепличним комплексом.....	50
3.1 Обґрунтування та вибір мови та середовища програмування.....	50
3.2. Розробка алгоритму роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3	51

3.3 Розробка програми моніторингу та керування тепличним комплексом на базі модуля ESP8266 NodeMCU V3	53
3.4 Розробка програми візуалізації даних для оператора	58
3.5 Висновки до 3 розділу	61
4 Проведення експериментів та аналіз отриманих результатів	63
4.1 Постановка задач експерименту	63
4.2 Проведення експерименту та аналіз отриманих даних	64
4.3 Охорона праці	67
4.4 Висновки до 4 розділу	69
Висновки	70
Перелік джерел посилання	72
Додаток А Програма моніторингу на базі модуля ESP8266 NodeMCU V3	75
Додаток Б Апробація результатів кваліфікаційної роботи	80
Додаток В Демонстраційний матеріал	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕС – електропровідність;

IoT – інтернет речей;

MPC – model predictive control;

PC – промислові контролери;

PID – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

PLC – програмовані логічні контролери.

ВСТУП

В умовах кліматичних змін, підвищення вартості енергоресурсів і необхідності забезпечення сталого виробництва сільськогосподарської продукції особливої ваги набуває точний та безперервний контроль параметрів мікроклімату, таких як температура, вологість, освітленість і концентрація вуглекислого газу, через це, актуальність кваліфікаційної роботи зумовлена зростаючими вимогами до ефективності, стабільності та енергоощадності сучасних аграрних виробництв, зокрема тепличних комплексів.

Традиційні централізовані системи керування теплицями часто характеризуються обмеженою масштабованістю, низькою гнучкістю до змін умов експлуатації та високою вразливістю до відмов окремих компонентів. Це призводить до зниження надійності системи в цілому та ускладнює адаптацію керування до локальних особливостей різних зон тепличного комплексу.

Застосування децентралізованих підходів на базі кіберфізичних систем дозволяє інтегрувати сенсорні, виконавчі та обчислювальні модулі в єдине інтелектуальне середовище, що забезпечує автономність окремих підсистем, підвищення відмовостійкості та оперативність реагування на зміни параметрів мікроклімату, такий підхід створює передумови для оптимізації використання ресурсів, підвищення врожайності та якості продукції при зниженні експлуатаційних витрат.

Мета роботи – підвищення ефективності моніторингу за параметрами мікроклімату в тепличних комплексах за рахунок розробки децентралізованої системи керування мікрокліматом на базі кіберфізичних систем.

Об'єкт дослідження – процес керування теплицею.

Предмет дослідження – моделі та методи децентралізованої системи керування на базі кіберфізичних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом;
- провести аналіз методів керування тепличними комплексами;
- провести аналіз структури та апаратного забезпечення систем моніторингу та керування тепличним комплексом;
- розробити модель мікроклімату тепличного комплексу;
- розробити вимоги до системи моніторингу та керування тепличним комплексом;
- розробити структурну схему децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом;
- провести вибір апаратного забезпечення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату;
- розробити схему підключення апаратних модулів;
- провести розрахунок розробленої системи на стійкість;
- зібрати макет автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом;
- провести обґрунтування та вибір мови та середовища програмування;
- розробити алгоритм роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3;
- розробити програму моніторингу та керування тепличним комплексом на базі модуля ESP8266 NodeMCU V3;
- розробити програму візуалізації даних для оператора;
- провести експерименти та аналіз отриманих даних.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008–15 [1], методичних вказівок [2], з використанням статей та матеріалів із наукових публікацій, зазначених у переліку посилань, проведено апробацію на конференції [3].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

1.1 Аналіз сучасних систем моніторингу та керування тепличним комплексом

Сучасні тепличні комплекси є складними технічними об'єктами, ефективне функціонування яких значною мірою залежить від точного підтримання параметрів мікроклімату. До основних контрольованих параметрів належать температура повітря і ґрунту, відносна вологість, рівень освітленості, концентрація вуглекислого газу, а також стан зрошення і вентиляції. Для забезпечення оптимальних умов вирощування рослин широко застосовуються автоматизовані системи моніторингу та керування.

Більшість існуючих систем ґрунтуються на централізованій архітектурі, де інформація від сенсорів передається до центрального контролера або сервера, який здійснює обробку даних і формує керуючі впливи на виконавчі механізми. Такі системи дозволяють реалізувати базові функції автоматичного регулювання та диспетчерського контролю, проте мають низку обмежень, пов'язаних із масштабованістю, затримками передачі даних і залежністю від працездатності центрального вузла [4].

З розвитком інформаційних технологій та Інтернету речей (IoT) набули поширення системи дистанційного моніторингу тепличних комплексів, які забезпечують доступ до даних у реальному часі через веб-інтерфейси або мобільні додатки. Такі рішення підвищують зручність експлуатації та оперативність прийняття рішень, однак часто виконують лише функції збору та візуалізації даних, залишаючи керування переважно централізованим і слабо адаптивним.

Окрему групу складають інтелектуальні системи керування, що використовують елементи експертних систем, нечіткої логіки або машинного

навчання для прогнозування змін мікроклімату та оптимізації режимів роботи обладнання. Незважаючи на їхній потенціал, практичне впровадження таких систем ускладнюється високою вартістю, складністю налаштування та потребою у значних обчислювальних ресурсах.

На сьогоднішній день на ринку представлено значну кількість готових апаратно-програмних рішень для автоматизації тепличних комплексів, які відрізняються рівнем функціональності, масштабованістю та архітектурою побудови. Одним із поширених рішень є Priva Climate Control (Priva, Нідерланди). Дана система призначена для комплексного керування мікрокліматом у великих промислових теплицях. Вона забезпечує контроль температури, вологості, вентиляції, освітлення, зрошення та рівня CO₂. Система має централізовану архітектуру з можливістю зонального керування та підтримує інтеграцію з хмарними сервісами для віддаленого моніторингу і аналітики. Основними перевагами є висока надійність і точність керування, проте недоліком залишається висока вартість та складність адаптації до малих тепличних господарств [5].

Priva Nutri-Line – це лінійка промислових рішень для прецизійної фертигації та автоматизованого дозування добрив і води в тепличних господарствах (рис. 1.1). Системи Nutri-Line забезпечують точну подачу поживних розчинів із контролем рН і електропровідності (ЕС), що сприяє оптимальному засвоєнню поживних речовин рослинами, підвищенню якості врожаю та ефективності використання ресурсів. Вони сумісні з різними типами систем поливу, працюють як автономно, так і в складі інтегрованої системи управління тепличним комплексом через центральний процесор або кліматичний контролер. У межах лінійки представлені кілька варіантів рішень, що відрізняються конструкцією та продуктивністю. Наприклад, NutriFit призначений для компактного та гнучкого дозування добрив із можливістю адаптації до різних обсягів води, NutriFlex забезпечує розширену функціональність із високою пропускну здатністю і можливістю автоматичного змішування додаткових компонентів, NutriJet працює за

принципом прямого інжектування в потік, а NutriOne оптимізований для інтеграції в магістральну лінію зрошення з кількома каналами дозування.



Рисунок 1.1 – Основні технології компанії Priva, лінійки Nutri-Line

Rufera – це технології автоматизації тепличних комплексів, орієнтовані на керування мікрокліматом, зрошенням і фертигацією з використанням модульних апаратно-програмних рішень. Системи Rufera застосовуються переважно у середніх і великих теплицях та забезпечують контроль температури, вологості, вентиляції, опалення, подачі води й поживних розчинів відповідно до заданих агротехнічних режимів. Технології Rufera базуються на промислових контролерах із централізованою або зональною архітектурою, підтримують підключення широкого спектра сенсорів і виконавчих механізмів та дозволяють реалізовувати програмно-задані сценарії керування. Основними перевагами є надійність, адаптованість до агресивних тепличних умов і можливість масштабування, тоді як обмеженнями залишаються відносно висока вартість і менша гнучкість у порівнянні з сучасними децентралізованими кіберфізичними системами (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Основні технології компанії Rufera

Ще одним популярним рішенням є Hoogendoorn iSii (Нідерланди), яке орієнтоване на інтелектуальне керування тепличними процесами. Система використовує модульний підхід і підтримує алгоритми оптимізації мікроклімату з урахуванням фаз росту рослин, вона дозволяє реалізувати сценарії керування та має розвинені засоби візуалізації даних. Разом із тим система здебільшого базується на централізованій обробці даних, що обмежує її відмовостійкість.

Система Netafim Digital Farming поєднує моніторинг мікроклімату із керуванням зрошенням і живленням рослин. Основний акцент зроблено на водотата енергоефективність. Система активно використовує IoT-сенсори та хмарні платформи для збору й аналізу даних, її перевагою є гнучкість і можливість дистанційного керування, однак керування мікрокліматом реалізоване переважно у вигляді рекомендацій, а не повністю автономних децентралізованих алгоритмів.

Для малих і середніх тепличних комплексів часто застосовуються рішення на базі Siemens Desigo, Schneider Electric EcoStruxure або ABB Ability, адаптовані під аграрні об'єкти, ці системи базуються на промислових контролерах (PLC), використовують стандартні протоколи зв'язку та забезпечують високу надійність. Водночас вони потребують індивідуального проектування та не завжди оптимізовані саме під біологічні особливості тепличного середовища.

Окрему нішу займають IoT-платформи для теплиць (наприклад, рішення на базі Arduino, ESP32, Raspberry Pi у поєднанні з хмарними сервісами), такі системи забезпечують моніторинг температури, вологості та освітленості з можливістю віддаленого доступу через веб-інтерфейс. Їхніми перевагами є низька вартість і гнучкість, проте недоліками залишаються обмежена надійність, низький рівень відмовостійкості та відсутність повноцінної децентралізованої логіки керування.

Аналіз сучасних рішень показує, що більшість існуючих систем не повною мірою враховують просторову неоднорідність тепличного комплексу та локальні особливості окремих зон, що призводить до зниження точності керування та нерационального використання енергетичних і водних ресурсів. У зв'язку з цим

перспективним напрямом розвитку є впровадження децентралізованих систем моніторингу та керування на базі кіберфізичних систем, у яких окремі вузли поєднують сенсорні, обчислювальні та виконавчі функції [6].

1.2 Аналіз методів керування тепличними комплексами

Ефективне керування тепличним комплексом потребує використання різноманітних методів регулювання, які забезпечують підтримання оптимального мікроклімату, враховуючи біологічні потреби рослин та енергетичні витрати. Сучасні підходи до керування можна розділити на традиційні, адаптивні та інтелектуальні, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

Першим варіантом є традиційні методи керування, до цієї групи належать класичні алгоритми регулювання, зокрема пропорційно-інтегрально-диференційний (PID) контроль та логічні схеми «вкл./викл.». PID-регулятори забезпечують стабільне підтримання заданих параметрів мікроклімату, прості в налаштуванні та надійні, однак вони мають обмежену здатність до адаптації у разі зміни зовнішніх умов або нерівномірності параметрів у різних зонах теплиці. Логічні схеми «вкл./викл.» характеризуються простотою та низькою вартістю, проте часто створюють коливання параметрів та не забезпечують оптимальне використання ресурсів [7].

Адаптивні системи використовують моделі процесів тепличного середовища для коригування регуляторних впливів у режимі реального часу. Серед них поширені алгоритми прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC), які передбачають майбутні зміни мікроклімату на основі математичних моделей та поточних вимірювань. MPC дозволяє ефективно управляти кількома параметрами одночасно та оптимізувати енергоспоживання. Недоліком є висока обчислювальна складність і потреба у точних моделях тепличного процесу.

Інтелектуальні методи керування охоплюють методи на основі експертних систем, нейронних мереж та нечіткої логіки, вони здатні враховувати складні

залежності між параметрами мікроклімату та біологічними процесами рослин, прогнозувати їхні зміни і пропонувати оптимальні режими керування. Такі системи особливо ефективні при великому числі зон теплиці та нерівномірному розподілі параметрів. Проте їх застосування ускладнене високою вартістю, необхідністю великої кількості даних для навчання моделей і складністю інтеграції в існуючу апаратну базу [8].

Традиційні методи забезпечують простоту і надійність, але обмежені в адаптивності. Адаптивні методи, зокрема MPC, підвищують точність і ефективність, проте потребують складних моделей та обчислювальних ресурсів. Інтелектуальні методи забезпечують високу гнучкість та здатність враховувати складні залежності, однак їх впровадження економічно і технічно складніше. Виходячи з проведеного аналізу, перспективним є поєднання декількох підходів, наприклад, використання PID-контролерів у локальних вузлах для забезпечення базового регулювання та впровадження інтелектуальних або адаптивних алгоритмів на рівні центрального керування або децентралізованих кіберфізичних вузлів. Така гібридна архітектура дозволяє поєднати простоту, надійність та високу адаптивність системи, що підвищує ефективність керування мікрокліматом у тепличних комплексах [9].

1.3 Аналіз структури та апаратного забезпечення систем моніторингу та керування тепличним комплексом

Сучасні системи моніторингу та керування тепличними комплексами є складними інтегрованими структурами, що поєднують апаратні засоби збору даних, обчислювальні модулі, засоби комунікації та виконавчі механізми. Правильне формування структури та підбір апаратного забезпечення є ключовим фактором забезпечення точності, надійності та гнучкості системи. Зазвичай, системи моніторингу і керування мають тривірневу архітектуру:

– нижній рівень (сенсорний та виконавчий) – включає сенсори (датчики температури, вологості, освітленості, рівня CO₂, рН та ЕС ґрунтового розчину)

та виконавчі механізми (клапани, насоси, штори, обігрівачі, вентилятори), цей рівень відповідає за безпосереднє вимірювання та реалізацію керуючих впливів;

– середній рівень (локальні контролери) – забезпечує первинну обробку даних, локальне регулювання та координацію підсистем. На цьому рівні зазвичай застосовуються PLC (програмовані логічні контролери) або мікроконтролери з можливістю децентралізованого керування;

– верхній рівень (централізоване керування та аналітика) – включає сервери, хмарні платформи та програмне забезпечення для моніторингу, збереження історії, побудови аналітики та віддаленого керування [10].

У сучасних системах спостерігається тенденція до деконцентрації обчислювальних ресурсів, що забезпечує відмовостійкість та гнучкість системи, дозволяючи об'єднати сенсорні, обчислювальні та виконавчі модулі в єдині кіберфізичні вузли.

Апаратне забезпечення систем моніторингу та керування тепличними комплексами включає широкий спектр пристроїв, які виконують функції збору даних, обробки сигналів і безпосереднього впливу на умови середовища. На нижньому рівні системи розташовані сенсорні модулі, що відображають стан мікроклімату та ґрунту. До таких модулів належать термодатчики, здатні вимірювати температуру повітря і ґрунту з високою точністю, а також гігрометри та датчики вологості ґрунту, які забезпечують контроль рівня вологи, необхідного для оптимального росту рослин. Датчики освітленості відстежують рівень природного та штучного світла, а сенсори концентрації вуглекислого газу дозволяють підтримувати необхідну інтенсивність фотосинтезу. Для контролю параметрів поживного розчину застосовуються рН- та ЕС-датчики, які визначають кислотність та електропровідність водного середовища, що безпосередньо впливає на всмоктування мінеральних речовин рослинами [11].

Зібрані сенсорні дані передаються на проміжний рівень – локальні контролери та обчислювальні модулі, на цьому рівні використовуються програмовані логічні контролери (PLC) промислового класу або мікроконтролери, такі як Arduino, ESP32 або Raspberry Pi, що забезпечують

первинну обробку інформації, локальне регулювання та виконання алгоритмів керування. Ці обчислювальні вузли формують сигнали для виконавчих механізмів, таких як насоси, клапани, обігрівачі, вентилятори та LED-освітлення, які безпосередньо впливають на параметри мікроклімату, наприклад, зміна положення штор регулює освітленість, а автоматичні клапани та насоси коригують подачу води та поживного розчину в залежності від показників сенсорів.

Комунікаційна складова апаратного забезпечення забезпечує інтеграцію всіх елементів системи в єдину мережу. Використовуються дротові протоколи, такі як Modbus, CAN чи RS-485, які гарантують стабільну передачу даних у промислових умовах, а також бездротові технології – Wi-Fi, LoRa або ZigBee, що дозволяють створювати гнучку та масштабовану інфраструктуру сенсорних і керуючих вузлів. На верхньому рівні апаратної структури розташовані сервери або хмарні платформи, які виконують централізовану обробку даних, архівування та аналітику, а також забезпечують віддалений доступ операторів і можливість дистанційного керування теплицею [12].

Сучасні рішення характеризуються високою модульністю та інтегрованістю, що дозволяє оперативно додавати нові сенсорні вузли або замінювати виконавчі механізми без повного перебудовування системи. Поступовий перехід до децентралізованих кіберфізичних вузлів забезпечує об'єднання сенсорних, обчислювальних та виконавчих функцій в одному модулі, підвищуючи автономність та відмовостійкість системи, завдяки такій організації апаратне забезпечення стає не просто інструментом збору даних і керування, а основою інтелектуальної системи, здатної адаптуватися до змін зовнішніх умов і забезпечувати стабільний мікроклімат для рослин.

Сучасні системи моніторингу та керування тепличними комплексами відрізняються високим рівнем автоматизації та інтеграції апаратних і програмних компонентів. Основною особливістю таких рішень є прагнення до забезпечення точного, безперервного контролю параметрів мікроклімату та оптимізації ресурсів, включаючи електроенергію, воду та поживні речовини.

Сучасні системи часто реалізуються як модульні архітектури, де окремі сенсорні, обчислювальні та виконавчі вузли працюють автономно, але взаємодіють через мережу для забезпечення цілісного керування тепличним середовищем [13].

Однією з ключових тенденцій є впровадження деконцентрації керування, коли локальні контролери на рівні окремих зон теплиці виконують частину обчислень і регулюють параметри автономно, що підвищує відмовостійкість системи. Використання кіберфізичних вузлів дозволяє поєднати сенсорні, обчислювальні та виконавчі функції в єдиному модулі, що зменшує затримки у передачі даних і покращує швидкість реакції на зміни мікроклімату. Інтеграція з IoT-платформами забезпечує можливість віддаленого моніторингу, зберігання історичних даних та аналітики, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень оператором теплиці.

Проте, впровадження сучасних систем стикається з низкою складностей, по-перше, високі вимоги до надійності та точності сенсорів, так як некоректні або несправні датчики можуть призвести до неправильних регулювань, що безпосередньо впливає на ріст рослин і ефективність використання ресурсів. По-друге, складність інтеграції апаратного забезпечення та програмних модулів, коли різноманітні сенсори, контролери і виконавчі механізми можуть використовувати різні протоколи зв'язку і формати даних, що потребує додаткового налаштування і розробки сумісного програмного забезпечення. По-третє, висока вартість і трудомісткість впровадження інтелектуальних або адаптивних систем, сучасні рішення на основі прогнозного керування, нейронних мереж або експертних систем вимагають наявності достатнього обсягу історичних даних, складних математичних моделей та високопродуктивного обчислювального обладнання. Це обмежує їхнє використання у малих і середніх тепличних господарствах.

Ще однією складністю є неоднорідність умов у великих тепличних комплексах, де різні зони можуть мати різні температурні та вологісні профілі. Централізовані системи часто не враховують ці локальні відмінності, що призводить до зниження точності регулювання та нераціонального використання

ресурсів, а підтримка та обслуговування складних систем вимагає наявності кваліфікованого персоналу, здатного контролювати роботу як апаратної, так і програмної частини, а також оперативно реагувати на відмови окремих вузлів.

Сучасні системи моніторингу та керування тепличними комплексами характеризуються високою автоматизацією, модульністю та інтеграцією кіберфізичних компонентів, проте їх впровадження вимагає вирішення низки технічних і організаційних складностей, включаючи точність сенсорів, сумісність обладнання, адаптацію до локальних умов, високу вартість і необхідність кваліфікованого обслуговування [14-15].

1.4 Постановка задач досліджень

На основі проведеного аналітичного огляду сучасних систем моніторингу та керування тепличними комплексами, методів керування, структурних рішень і апаратного забезпечення встановлено, що існуючі підходи переважно ґрунтуються на централізованих або частково децентралізованих архітектурах, які мають обмежену адаптивність, масштабованість і відмовостійкість. Виявлені недоліки, зокрема недостатнє врахування просторової неоднорідності мікроклімату та залежність від працездатності центрального вузла, обумовлюють необхідність розробки більш гнучкої автоматизованої системи керування з використанням децентралізованого підходу та кіберфізичних систем.

Мета роботи – підвищення ефективності моніторингу за параметрами мікроклімату в тепличних комплексах за рахунок розробки децентралізованої системи керування мікрокліматом на базі кіберфізичних систем.

Об'єкт дослідження – процес керування теплицею.

Предмет дослідження – моделі та методи децентралізованої системи керування на базі кіберфізичних систем.

Для виконання поставленої мети, необхідно виконати такі основні задачі досліджень: розробити математичну модель мікроклімату тепличного комплексу

з урахуванням ключових параметрів середовища; сформувавши структуру децентралізованої автоматизованої системи моніторингу та керування; обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів для реалізації локальних модулів; розробити алгоритми функціонування системи та програмне забезпечення для збору, обробки і візуалізації даних; провести експериментальні дослідження для оцінки стійкості, точності та ефективності розробленого рішення в умовах реальної експлуатації тепличного комплексу.

2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

2.1 Розробка моделі мікроклімату тепличного комплексу

Модель мікроклімату (енергетико-теплова динаміка) призначається для опису зміни температури повітря та поверхонь теплиці під дією опалення/вентиляції/інсоляції і теплових втрат. Модель можна представити наступними моделями:

– неперервна модель (холдинговий баланс):

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{hvac} + Q_{sun}(t) + Q_{plant}(t) - UA(T_a - T_{out}) - \dot{m}_{vent} C_p (T_a - T_{out}); \quad (2.1)$$

– дискретна (крок Δt):

$$T_a[k + 1] = T_a[k] + \frac{\Delta t}{C_a} (Q_{hvac}[k] + Q_{sun}[k] + Q_{plant}[k] - UA(T_a[k] - T_{out}[k]) - \dot{m}_{vent}[k] C_p (T_a[k] - T_{out}[k])), \quad (2.2)$$

де T_a – температура повітря в теплиці (°C);

T_{out} – зовнішня температура (°C);

C_a – еквівалентна теплова ємність повітря/масиву (Дж /°C);

Q_{hvac} – тепловий потік від обігріву/охолодження (Вт) (позитивний – нагрів);

$Q_{sun}(t)$ – сонячний тепловий потік (Вт);

$Q_{plant}(t)$ – теплообмін із рослинами (Вт) (може бути функцією освітленості/транспірації);

UA – сумарний коефіцієнт тепловтрат (Вт/°C);

\dot{m}_{vent} – масовий потік повітря через вентиляцію (кг/с);

C_p – теплоємність повітря (~ 1005 Дж/(кг·°C)).

Модель вологості (вологісний баланс), призначення цієї моделі – прогноз і контроль відносної вологості (RH) та вмісту вологи в ґрунті/повітрі. Масовий баланс пара в повітрі:

$$V_a \frac{dp_v}{dt} = E_{plant} + S_{evap} - \dot{m}_{vent}(p_v - p_{v,out}) - \dot{m}_{cont}, \quad (2.3)$$

де можна перейти до відносної вологості RH через насичену щільність пари

$$p_{v,sat}(T_a): RH = p_v / p_{v,sat}(T_a)$$

V_a – об'єм повітря теплиці (м³);

p_v – абсолютна щільність водяної пари (кг/м³);

E_{plant} – випаровування через рослини (транспірація) (кг/с);

S_{evap} – випаровування з ґрунту/поверхонь (кг/с);

$p_{v,out}$ – щільність пари зовні;

\dot{m}_{cont} – конденсація/осадження (кг/с).

Ґрунтова волога (однорівнева модель):

$$\theta[k-1] = \theta[k] + \Delta t \left(\frac{q_{irrig}[k] - q_{drain}[k] - q_{uptake}[k]}{V_{soil}} \right), \quad (2.4)$$

де θ – вологість об'єму ґрунту (м³/м³);

q_{irrig} – подача води (м³/с);

q_{uptake} – водопоглинання рослинами;

q_{drain} – стік.

Модель CO₂ (масовий баланс), призначення – контроль концентрації CO₂ для оптимізації фотосинтезу:

$$V_a \frac{dC_{CO_2}}{dt} = \dot{m}_{inj}(C_{inj} - C_{CO_2}) - \dot{m}_{vent}(C_{CO_2} - C_{out}) - R_{photo}(t), \quad (2.5)$$

де C_{CO_2} – концентрація CO₂ (ppm або мг/м³);

\dot{m}_{inj} – витрати інжекції CO₂ (м³/с);

C_{inj} – концентрація в поданому газі;

C_{out} – зовнішня концентрація CO₂;

$R_{photo}(t)$ – поглинання рослинами (масовий потік).

Біологічна модель росту (спрощена продуктивність), призначення – зв'язок між мікрокліматом і швидкістю росту / фотосинтетичною активністю.

Проста функція продуктивності P :

$$P(t) = P_{max} \cdot f_T(T_a) \cdot f_{RH}(RH) \cdot f_L(I) \cdot f_{CO_2}(CO_2) \cdot f_\theta(\theta), \quad (2.6)$$

де кожна функція $f_*(\cdot) \in [0,1]$ – коефіцієнт ефективності (наприклад, гауссоподібна або трикутна функція оптимуму). Приклад для температури:

$$f_T(T) = \exp\left(-\frac{(T-T_{opt})^2}{2\sigma_T^2}\right), \quad (2.7)$$

де P_{max} – макс. продуктивність;

T_{out}, σ_T – оптимум/temp-розкид; аналогічно для інших факторів.

Модель сенсорів (спостереження), призначення – опис похибок та затримок вимірювань. Реалізація у вигляді лінійної моделі:

$$y[k] = Hx[k] + v[k], \quad (2.8)$$

де x – вектор станів (наприклад, $[T_a, p_v, C_{CO_2}, \theta]$);

y – вектор вимірів; H – матриця спостереження (як правило одинична або вибіркова);

$v[k]$ – шум вимірювання.

Операторні моделі приводу/актуаторів, призначення – динаміка нагріву, вентиляції, клапанів поливу, освітлення. Модель для актуатора в дискретному виді має наступний вигляд:

$$Q_{hvac}[k + 1] = Q_{hvac}[k] + \frac{\Delta t}{\tau_{hvac}} (K_{hvac} u_{hvac}[k] - Q_{hvac}[k]). \quad (2.9)$$

Для оцінки стану пропонується використовувати фільтр Кальмана (KF), основне призначення якого – уявлення прихованих величин та фільтрація шумних вимірів:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k; \quad y_k = Hx_k + v_k. \quad (2.10)$$

Для системи прийняття рішень пропонується гібридна архітектура: (FALLBACK) + НЕЧІТКА ЛОГІКА для швидких рішень та M(odul)P(redictive)C(ontrol) для оптимального управління енергетично-чутливих ресурсів:

– правила (порогові, швидкі), які призначені для керування аварійними та оперативними діями. Приклади правил у псевдокоді:

Якщо $T_a < T_{min}^{safe} \rightarrow$ увімкнути нагрів на 100 %;

Якщо $RH > RH_{crit} \ \& \ T_a - T_{out} < \Delta T_{vent} \rightarrow$ відкрити вентиляцію;

Якщо $\theta < \theta_{min} \rightarrow$ поливати.

Ці правила забезпечують безпеку перед оптимізацією;

– нечітка логіка (Fuzzy), для адаптивні дії. Призначенням є плавні дії при непевних або одночасно конфліктних вимогах. Приклад для дії нагріву u_{hvac} :

Вхідні нечіткі змінні: $E_T = T_{ref} - T_a$ (помилка), ΔT (швидкість зміни)

Нечіткі множини: *NegativeLarge*, *NegativeSmall*, *Zero*, *PositiveSmall*, *PositiveLarge*.

Нечітка база правил (пара прикладів):

– якщо $E_T - PositiveLarge \rightarrow u_{hvac} - High$

– якщо $E_T - PositiveSmall \ \& \ \Delta T - Negative \rightarrow u_{hvac} - Medium$.

Model Predictive Control (MPC), призначенням є мінімізувати вартість енергії, зберігаючи умови для росту. MPC формулювання (дискретне горизонто N):

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} ((T[k+i] - T_{ref})^2 Q_T + (RH[k+i] - RH_{ref})^2 Q_{RH} + \lambda_u \|u[k+i]\|^2), \quad (2.11)$$

підлягає динамічним обмеженням (моделі мікроклімату, актуаторів) та обмеженням на u (насичення) і станах (безпека). MPC дає оптимальну послідовність команд $u[k \dots k + N - 1]$; застосовується тільки перший крок (receding horizon).

Логіка прийняття рішень у залежності від параметрів (комбінація):

– Safety layer (реактивний): порогові правила виконуються негайно (вищий пріоритет). Певірка:

$$T_a \notin [T_{min}^{safe}, T_{max}^{safe}], RH > RH_{crit}, C_{CO_2} > C_{crit}, \theta < \theta_{crit}; \quad (2.12)$$

– estimation layer: оновити стан через EKF/KF → отримати найкращу оцінку $\hat{x}[k]$;

– decision layer:

а) якщо система в нормі (в межах допустимих відхилень) – запустити MPC на горизонті N для мінімізації енергії та максимізації продуктивності;

б) якщо вимоги до швидкої корекції (наприклад, суттєве відхилення температури) – комбінувати нечітке рішення (швидкий плавний відгук) з MPC (MPC працює на більш довгих горизонтах);

– actuation layer: врахувати динаміку актуаторів і виконати команди через моделі першого порядку.

Розроблені математичні моделі та логіка прийняття рішень в автоматизованій системі моніторингу та керування тепличним комплексом забезпечують комплексний підхід до підтримання стабільних умов вирощування

сільськогосподарських культур. Їхня перевага полягає у можливості точного опису динаміки температури, вологості, концентрації CO₂ та ґрунтової вологи, що дозволяє адаптивно реагувати на зміни зовнішнього середовища та внутрішніх процесів. Завдяки використанню моделей теплового та вологісного балансу досягається зниження енерговитрат та водоспоживання, а інтеграція моделей росту рослин дозволяє орієнтувати керування не лише на параметри середовища, а й на максимізацію продуктивності культур. Вбудовані механізми прийняття рішень, які поєднують порогові правила, нечітку логіку та предиктивне керування, гарантують як швидку реакцію у критичних ситуаціях, так і оптимізацію роботи у звичайних умовах. Така гібридна структура створює баланс між надійністю та економічною ефективністю системи, забезпечуючи стійке функціонування тепличного комплексу. Крім того, використання алгоритмів оцінювання станів дозволяє компенсувати похибки сенсорів та отримувати більш достовірні дані для прийняття рішень. У результаті реалізована система не лише підвищує врожайність і якість продукції, але й сприяє сталому розвитку за рахунок ефективного використання ресурсів та зменшення впливу людського фактора [3].

2.2 Розробка вимог до системи моніторингу та керування тепличним комплексом

Формування вимог з використанням офіційної специфікації вимог Software Requirements Specification (SRS) є необхідним етапом у розробці системи моніторингу та керування тепличним комплексом, оскільки вона забезпечує єдине формалізоване джерело для всіх учасників проєкту. Завдяки SRS чітко визначаються функціональні та нефункціональні вимоги, що мінімізує ризик неправильного трактування завдань між розробниками, інженерами та користувачами. Наприклад, у розділі SRS 2.1 визначаються загальні характеристики системи, які задають її архітектурні обмеження, тоді як у SRS 3.2 описуються конкретні функціональні можливості локальних модулів. Це

дозволяє на етапі проектування врахувати всі критичні аспекти, включно з точністю сенсорів та вимогами до живлення. Крім того, використання SRS 4.1 забезпечує контроль відповідності системи стандартам надійності та масштабованості, що особливо важливо у промислових умовах. Таким чином, формування вимог на основі SRS робить процес розробки прозорим, керованим і орієнтованим на результат, а також створює основу для подальшого тестування та валідації системи.

Вимога 1 – забезпечення децентралізованої архітектури системи. Так як централізовані системи вразливі до відмови центрального вузла, що знижує надійність керування, кожен локальний модуль повинен мати можливість автономного збору, обробки та часткового аналізу даних, забезпечуючи стійкість до збоїв і гнучке масштабування.

Вимога 2 – використання бездротового обміну даними між модулями та системою керування. Провідні з'єднання обмежують мобільність і ускладнюють розширення тепличного комплексу, тому локальні модулі повинні бути обладнані бездротовими модулями зв'язку (наприклад, Wi-Fi) для обміну даними з центральною системою обробки та прийняття рішень.

Вимога 3 – інтеграція датчиків мікроклімату з широким діапазоном вимірювання. Коректне керування можливе лише за умови точного вимірювання параметрів середовища, тому у кожному локальному модулі мають бути встановлені датчики температури, вологості, освітленості та CO₂ із заданою точністю та частотою оновлення даних.

Вимога 4 – наявність виконавчих пристроїв із можливістю адаптивного керування. Для підтримання оптимальних умов необхідна динамічна зміна роботи системи зрошення, вентиляції, освітлення та підігріву, виконавчі пристрої повинні приймати сигнали від мікроконтролера та реалізовувати керуючі дії у відповідь на зміни параметрів мікроклімату.

Вимога 5 – локальна візуалізація даних. Оператор має мати можливість контролювати стан мікроклімату без підключення до центральної системи, тому

локальний модуль повинен мати інтерфейс відображення даних у реальному часі (екран, мобільний додаток чи веб-інтерфейс).

Вимога 6 – енергонезалежність та надійність живлення. Перебої у живленні призводять до втрати даних та порушення роботи системи, тому модулі повинні мати незалежні блоки живлення з можливістю підключення резервних джерел (акумулятори, сонячні панелі, тощо).

Вимога 7 – алгоритмічна підтримка прийняття рішень. Автоматизація повинна ґрунтуватися на об'єктивних даних і мінімізувати участь оператора, система повинна мати модуль обробки даних і модуль прийняття рішень, які реалізують математичні моделі та нечітку логіку для вибору оптимальних керуючих дій.

Вимога 8 – масштабованість і модульність. Тепличні комплекси відрізняються за розмірами та умовами експлуатації, тому архітектура системи повинна дозволяти додавання нових локальних модулів без зміни всієї інфраструктури.

2.3 Розробка структурної схеми децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом

Необхідність розробки структурної схеми децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом зумовлена складністю сучасних тепличних господарств, де одночасно функціонує велика кількість взаємопов'язаних підсистем – кліматичний контроль, іригація, контроль живлення, освітлення, подача CO₂ та система збору даних. Централізоване керування в умовах швидких змін зовнішнього середовища та необхідності обробки великого обсягу інформації часто виявляється неефективним, адже створює ризики перевантаження центрального контролера, затримки у прийнятті рішень і вразливість до відмов. Натомість децентралізована архітектура дозволяє розподілити функції моніторингу та регулювання між локальними вузлами, що забезпечує гнучкість, масштабованість і підвищену надійність системи. У рамках

даного дослідження під децентралізованою системою моніторингу та керування тепличним комплексом розуміється інтегрована сукупність сенсорних модулів, локальних контролерів і комунікаційних вузлів, які самостійно здійснюють вимірювання та первинну обробку даних, приймають локальні рішення та координуються між собою для досягнення глобальних цілей підтримання оптимального мікроклімату. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, забезпечує стійкість до відмов окремих компонентів та створює основу для впровадження інтелектуальних алгоритмів адаптивного керування. Це робить розробку структурної схеми децентралізованої системи ключовим етапом побудови ефективного автоматизованого тепличного комплексу. На рисунку 2.1 приведена структурна схема децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом.

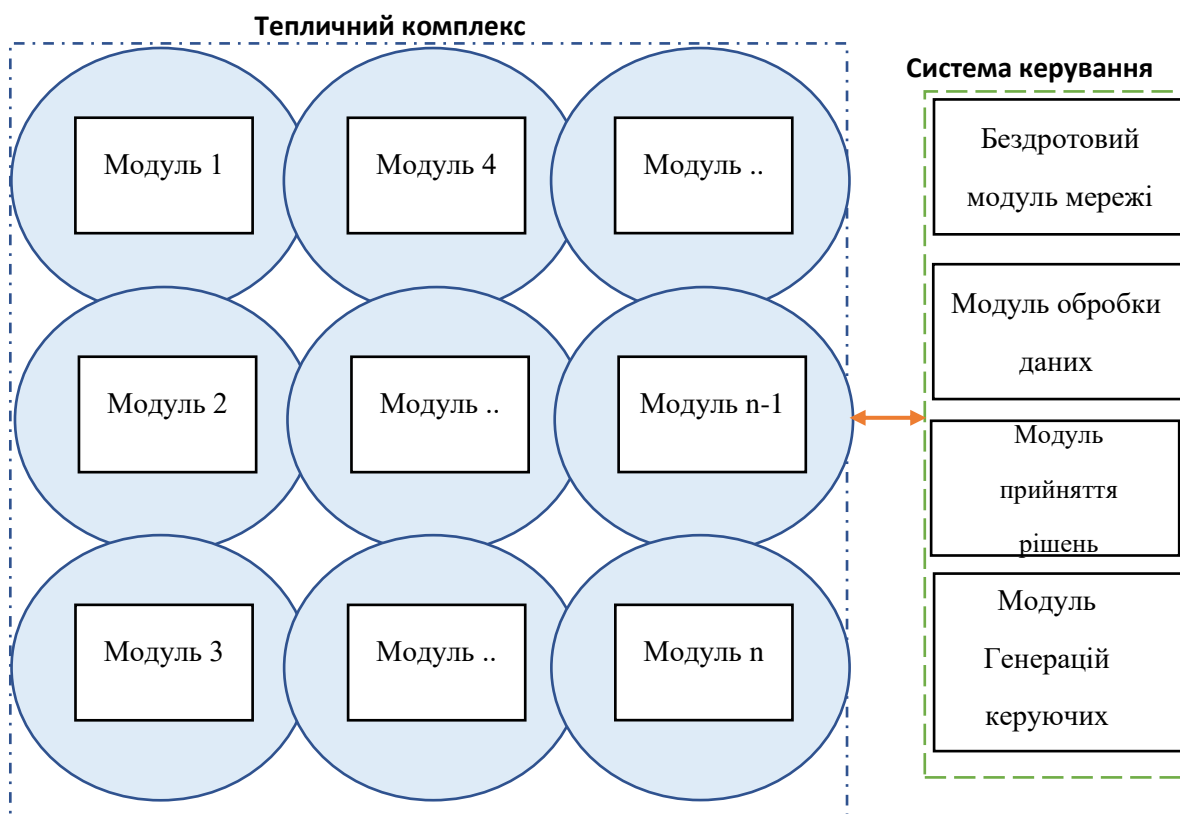


Рисунок 2.1 – Структурна схема децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом

Структурна схема децентралізованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом складається з набору локальних модулів (рис. 2.1), розміщених безпосередньо у тепличному середовищі, та центральної системи керування, яка координує їхню взаємодію. Кожен елемент має чітко визначене призначення, що дозволяє досягти високої гнучкості та надійності всієї системи.

Модуль 1... Модуль n – його призначення полягає у локальному моніторингу параметрів мікроклімату (температура, вологість, освітленість) у конкретній зоні теплиці.

Бездротовий модуль мережі – забезпечує обмін даними між усіма локальними модулями та центральною системою без потреби в дротових комунікаціях, що робить систему масштабованою.

Модуль обробки даних – виконує агрегацію, попередню фільтрацію та аналіз отриманої інформації, підвищуючи точність та зменшуючи вплив шумів сенсорів.

Модуль прийняття рішень – реалізує логіку вибору оптимальних дій, ґрунтуючись на математичних моделях, правилах нечіткої логіки та адаптивному керуванні.

Модуль генерації керуючих команд – формує вихідні сигнали до виконавчих механізмів (насоси, вентилятори, клапани, нагрівачі, освітлення) для реалізації прийнятих рішень.

Запропонована структурна схема має низку суттєвих переваг. По-перше, децентралізація забезпечує високу надійність, адже вихід з ладу одного модуля не призводить до зупинки всієї системи. По-друге, завдяки локальній обробці даних система здатна швидко реагувати на зміни мікроклімату, зменшуючи затримки у керуванні. По-третє, модульна архітектура дає можливість масштабування тепличного комплексу без потреби у повній перебудові системи. По-четверте, інтеграція бездротових технологій робить її енергоефективною та зручною для розгортання у великих тепличних господарствах. У результаті досягається оптимальний баланс між точністю, швидкодією та економічною ефективністю керування тепличним комплексом.

Розробимо структуру локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату, яка представлена на рисунку 2.2.

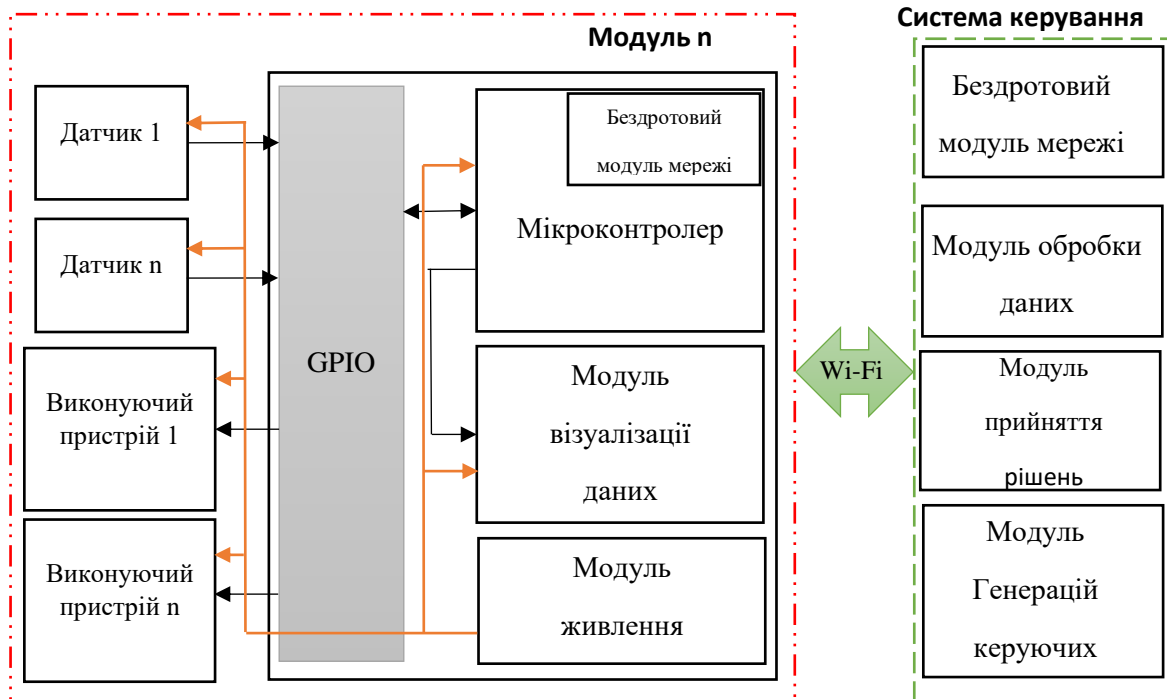


Рисунок 2.2 – Базова структура локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Базова структура локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату у тепличному комплексі складається з низки функціональних блоків, кожен з яких має чітко визначене призначення для забезпечення ефективної роботи децентралізованої системи керування.

Датчики – призначені для вимірювання параметрів мікроклімату, таких як температура, вологість повітря, рівень освітленості та концентрація CO₂. Вони є первинним джерелом інформації, на основі якої система приймає рішення.

GPIO – виконує функцію апаратного інтерфейсу, що забезпечує зв'язок між мікроконтролером, датчиками та виконавчими пристроями. Він відповідає за коректне зчитування сигналів та передачу керуючих команд.

Виконавчі пристрої – реалізують керуючі дії системи, такі як активація системи зрошення, вентиляції, підігріву чи штучного освітлення. Їхня робота безпосередньо впливає на регулювання мікроклімату у теплиці.

Мікроконтролер – є центральним обчислювальним елементом локального модуля, який здійснює попередню обробку даних від датчиків, формує пакети інформації для передавання у систему керування та надсилає сигнали до виконавчих механізмів.

Бездротовий модуль мережі – забезпечує передачу даних від локального модуля до центральної системи обробки та прийняття рішень за допомогою протоколів Wi-Fi. Це дозволяє реалізувати децентралізовану архітектуру та масштабувати систему.

Модуль візуалізації даних (локальний) – дає можливість оператору або користувачу контролювати показники мікроклімату у режимі реального часу безпосередньо у теплиці, що підвищує зручність експлуатації.

Модуль живлення – забезпечує стабільну роботу усіх елементів локального модуля, підтримуючи працездатність навіть за умов змін у зовнішньому енергопостачанні.

Перевага запропонованої структурної схеми полягає у модульності, що дозволяє легко адаптувати систему до потреб конкретного тепличного господарства. Завдяки використанню бездротових технологій досягається гнучкість і простота розгортання, а локальна обробка даних мікроконтролером забезпечує швидку реакцію на зміни мікроклімату. Такий підхід підвищує точність регулювання параметрів, зменшує ризики відмови всієї системи та робить її масштабованою і надійною в умовах промислового використання.

Для більшого розуміння базової структури локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату, представимо опис функцій та результати роботи «Модуль – функція – результат роботи» в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – «Модуль – функція – результат роботи» базової структури локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Модуль	Функція	Результат работ
1	2	3
Датчики	Вимірювання параметрів мікроклімату (температура, вологість, освітленість, CO ₂)	Отримання первинних даних про стан середовища в теплиці

Продовження таблиці 2.1

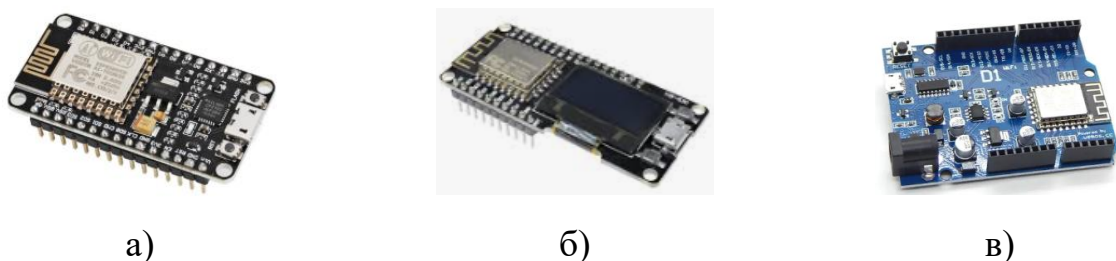
1	2	3
GPIO	Інтерфейс для зчитування сигналів від датчиків і передавання команд виконавчим пристроям	Коректна взаємодія між апаратними компонентами системи
Виконавчі пристрої	Виконання керуючих дій: зрошення, вентиляція, опалення, освітлення	Регулювання мікроклімату відповідно до заданих параметрів
Мікроконтролер	Попередня обробка даних, формування інформаційних пакетів, управління виконавчими механізмами	Локальне управління процесами та підготовка даних для системи керування
Бездротовий модуль мережі	Передача даних між локальним модулем і системою керування через Wi-Fi	Синхронізація локальних модулів у децентралізованій системі
Модуль візуалізації даних (локальний)	Відображення зібраної інформації оператору у реальному часі	Локальний моніторинг стану мікроклімату теплиці
Модуль живлення	Забезпечення стабільної роботи всіх елементів модуля	Безперервне функціонування системи навіть за коливань енергопостачання

Розроблена базова структура локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату (рис. 2.2), має низку важливих переваг у рамках даного дослідження, що забезпечують ефективність і надійність її роботи. Вона дозволяє здійснювати оперативний збір та попередню обробку даних безпосередньо в місці розташування модулів, що зменшує затримки та підвищує точність регулювання. Завдяки використанню бездротового модуля мережі забезпечується децентралізована організація обміну інформацією, що підвищує масштабованість і знижує залежність від центрального вузла. Інтеграція локального модуля візуалізації даних спрощує контроль параметрів мікроклімату для оператора без необхідності підключення до центральної системи. Наявність мікроконтролера у складі модуля забезпечує автономність прийняття локальних рішень, що є особливо важливим у випадку затримки чи втрати зв'язку. Крім того, модульна побудова системи дає змогу легко

адаптувати її під різні конфігурації теплиць і розширювати функціонал шляхом додавання нових сенсорів або виконавчих пристроїв. Запропонована архітектура також підвищує надійність, оскільки відмова одного локального модуля не впливає на роботу всієї системи, що робить структуру придатною для промислових умов, де необхідна стабільність, точність і висока швидкість реакції на зміни мікроклімату.

2.4 Вибір апаратного забезпечення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Вибір апаратного забезпечення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату є критично важливим етапом, оскільки саме від нього залежить точність збору даних, надійність функціонування та можливість інтеграції в децентралізовану систему керування тепличним комплексом. Оптимальне поєднання сенсорів, мікроконтролера, модулів зв'язку та живлення дозволяє досягти стабільності роботи навіть за складних умов експлуатації. Крім того, правильний вибір апаратних компонентів забезпечує масштабованість і можливість адаптації системи під різні типи теплиць. На рисунку 2.3 представлено загальний вигляд мікроконтролерних модулів для реалізації локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату.



а)

б)

в)

а) Arduino ESP8266;

б) NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96 " дисплей;

в) плата Arduino з WiFi модулем ESP8266 (WeMos D1)

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд мікроконтролерних модулів для реалізації локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Порівняння технічних характеристик мікроконтролерних модулів Arduino ESP8266, NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96 та плати Arduino з WiFi модулем ESP8266 (WeMos D1) представлено в таблиці 2.2.

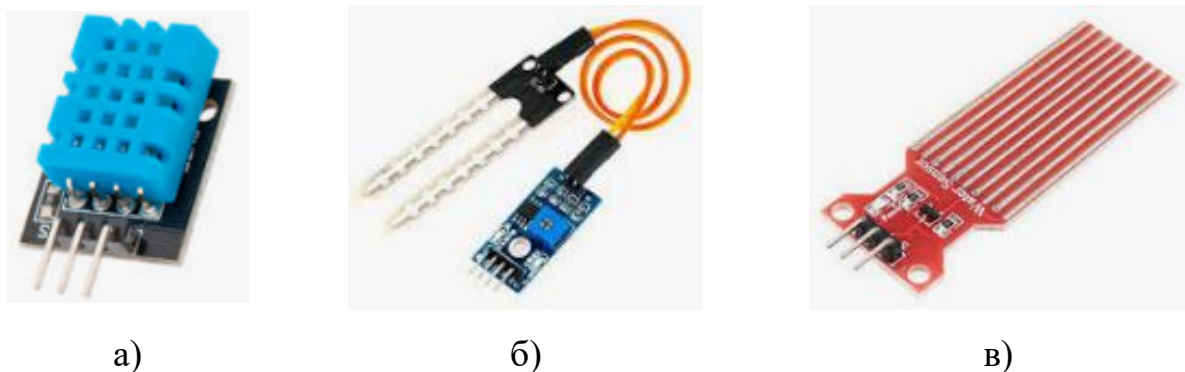
Таблиця 2.2 – Порівняння технічних характеристик мікроконтролерних модулів Arduino ESP8266, NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96 та плати Arduino з WiFi модулем ESP8266 (WeMos D1)

Характеристика	Мікроконтролерні модулі		
	Arduino ESP8266	NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96"	WeMos D1 (Arduino з WiFi ESP8266)
Мікроконтролер	ESP8266EX		
Тактова частота	80/160 МГц		
ОЗП (RAM)	64 КБ		
Флеш-пам'ять	512 КБ – 4 МБ (залежно від версії)	4 МБ	
Кількість GPIO	до 11		
Інтерфейси	UART, SPI, I ² C		
Живлення	3,0 – 3,6 В	5 В через USB, 3,3 В логіка	
Wi-Fi	802.11 b/g/n		
Особливості	Базова плата, компактна	Вбудований OLED 0.96" для відображення даних	Сумісна з Arduino IDE, форм-фактор як Arduino UNO
Розміри	≈ 24 мм × 16 мм	≈ 58 мм × 32 мм	≈ 68 мм × 54 мм
Призначення	Мінімалістичні IoT проекти	IoT + локальна візуалізація	Навчальні та промислові IoT проекти, Arduino-сумісність

Вибір модуля NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96 для реалізації локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату є найбільш обґрунтованим серед розглянутих варіантів. У порівнянні з базовим Arduino ESP8266, який має від 512 КБ до 4 МБ флеш-пам'яті та вимагає додаткових рішень для візуалізації даних, NodeMCU одразу забезпечує 4 МБ флеш-пам'яті та інтегрований OLED-дисплей 0.96", що дозволяє оперативно контролювати параметри мікроклімату без зовнішніх пристроїв. На відміну від WeMos D1, який хоч і сумісний з Arduino

UNO і зручний у програмуванні, але має значно більші габарити 68 мм × 54 мм, NodeMCU залишається компактним з розмірами близько 58 мм × 32 мм, що критично для інтеграції в локальні модулі. Також усі три модулі працюють на однаковій частоті 80/160 МГц та мають до 11 GPIO, однак саме NodeMCU забезпечує оптимальний баланс між компактністю, функціональністю та зручністю розробки IoT-систем. Таким чином, вибір NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96 дозволяє поєднати високу продуктивність, енергоефективність та наочність роботи системи в одному пристрої.

Наступним кроком виберемо модулі датчиків, відповідно до розроблених вимог в підрозділі 2.2 та базової структури локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату на рисунку 2.2. Загальний вигляд обраних сенсорів представлено на рисунку 2.4.



а)

б)

в)

а) датчик температури та вологості DHT11;

б) резистивний датчик FC-28-D вологості ґрунту;

в) датчик рівня рідини HW-038

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд модулів сенсорів для реалізації локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Порівняння технічних характеристик датчиків температури та вологості DHT11, резистивний датчик FC-28-D вологості ґрунту та рівня рідини HW-038 представлені в таблиці 2.3.

Для реалізації локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату тепличного комплексу доцільно використовувати комбінацію датчиків DHT11,

FC-28-D та HW-038, оскільки кожен із них виконує важливу функцію у забезпеченні повноцінного контролю середовища. Датчик DHT11 дозволяє отримувати дані про температуру та вологість повітря, що є базовими параметрами для підтримання стабільного мікроклімату та регулювання вентиляції і зрошення. Попри обмежену точність, його простота підключення та стабільність роботи роблять його оптимальним для багатьох практичних завдань теплиці. Датчик FC-28-D забезпечує моніторинг вологості ґрунту, що дозволяє визначати потребу у поливі, а завдяки одночасній наявності аналогового та цифрового виходу забезпечується більша гнучкість інтеграції в систему. Хоча електроди можуть піддаватись корозії, регулярне калібрування та захисні покриття дозволяють підвищити надійність його роботи. Датчик HW-038 виконує контроль рівня рідини в баках для поливу, забезпечуючи захист від збоїв у системі зрошення через відсутність води. Він працює у широкому діапазоні температур і може бути інтегрований як у вигляді аналогового, так і цифрового сигналу. Вибір цієї комбінації датчиків обґрунтований тим, що разом вони охоплюють ключові параметри мікроклімату теплиці – стан повітря, ґрунту та водопостачання, що забезпечує комплексність моніторингу, своєчасне реагування на зміни умов та стабільність агротехнологічних процесів.

Таблиця 2.3 – Порівняння технічних характеристик датчиків температури та вологості DHT11, резистивний датчик FC-28-D вологості ґрунту та рівня рідини HW-038

Модуль	DHT11 (датчик температури та вологості)	FC-28-D (резистивний датчик вологості ґрунту)	HW-038 (датчик рівня рідини)
1	2	3	4
Вимірювані параметри	Температура, вологість повітря	Вологість ґрунту	Наявність/рівень рідини
Діапазон вимірювань	Температура: 0 ... + 50 °C Вологість: 20 % – 90 % RH	0 % – 100 % (відносна шкала)	0 % – 100 % (у межах висоти сенсора)

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
Точність	± 2 °C (температура) ± 5 % RH (вологість)	Орієнтовна точність ± 10 % (залежить від калібрування)	Залежить від висоти та налаштувань порогів
Живлення	3,3 В – 5 В		
Інтерфейс / вихідний сигнал	Цифровий однопровідний інтерфейс	Аналоговий та цифровий вихід	Аналоговий та цифровий вихід
Робоча температура	0 ... + 50 °C	10 ... + 55 °C	10 ... + 60 °C
Особливості	Проста інтеграція, обмежений діапазон вимірювань	Потребує калібрування, електроди піддаються корозії	Підходить для моніторингу баків та ємностей, просто підключення

2.5 Розробка схеми підключення апаратних модулів

Необхідність розробки схеми підключення локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату в середовищі Freezing обумовлена потребою у точній візуалізації апаратної структури системи та забезпеченні її коректної роботи на етапі проектування. Така схема дозволяє визначити оптимальні способи взаємодії мікроконтролера з датчиками та виконавчими елементами, що унеможливорює конфлікти при одночасній обробці даних з різних каналів. Крім того, візуалізація у Freezing спрощує процес налагодження та тестування, оскільки забезпечує наочне відображення розташування елементів і їхніх з'єднань. Це суттєво знижує ризик помилок під час реалізації фізичної збірки та дозволяє розробнику перевірити сумісність компонентів ще до фактичного монтажу. Також схема в цьому середовищі є необхідним елементом документації, що спрощує повторне використання розробки, її масштабування та навчання персоналу. Використання Freezing як середовища для створення схеми підключення дозволяє сформувати стандартизований підхід, який є базою для подальшого вдосконалення й уніфікації системи моніторингу тепличного комплексу. Схема підключення апаратних засобів

локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату представлено на рисунку 2.5.

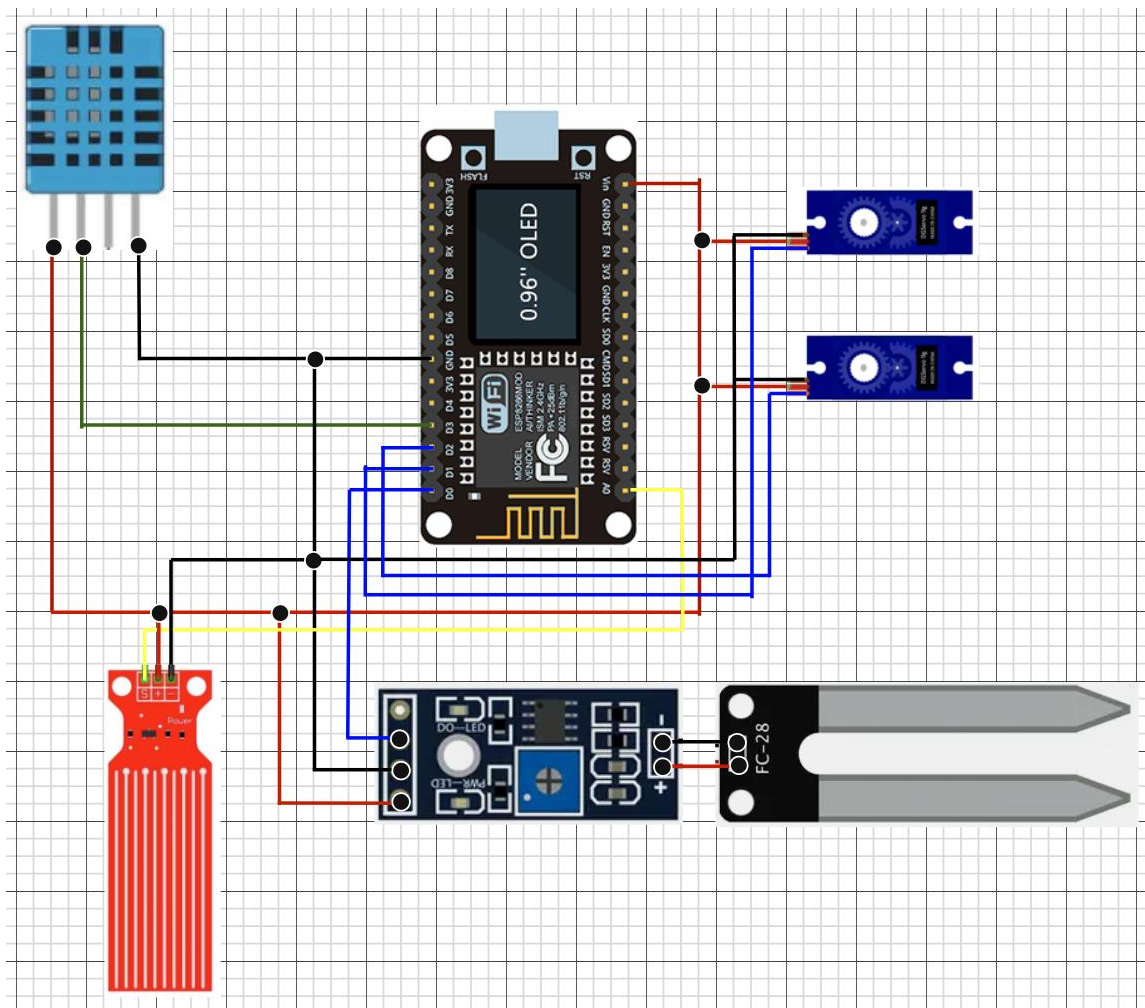


Рисунок 2.5 – Схема підключення апаратних засобів локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Схема підключення апаратних засобів локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату реалізована на базі мікроконтролерного модуля NodeMCU ESP8266 V3 OLED 0.96" (рис. 2.5), який виступає центральним елементом збору, обробки та передавання даних. До нього підключено датчик температури та вологості повітря DHT11, який має три виводи: живлення подається на контакт VCC, земля підключена до GND, а сигнальний вихід підключено до одного з цифрових портів NodeMCU для забезпечення коректного зчитування кліматичних параметрів у теплиці. Для контролю вологості ґрунту

використовується резистивний датчик FC-28, який через підсилювальний модуль підключений до аналогового входу мікроконтролера, при цьому VCC та GND забезпечують його живлення. Датчик рівня рідини HW-038 підключений аналогічно, через лінії живлення та аналоговий вихід, що дозволяє контролювати рівень води у резервуарах поливної системи. Крім сенсорів, у схемі передбачено два сервоприводи, які підключені до окремих цифрових виходів NodeMCU для реалізації виконавчих функцій, наприклад, відкриття або закриття вентиляційних заслінок чи клапанів поливної системи. Живлення всіх модулів забезпечується через контакти 3,3 В або 5 В NodeMCU залежно від технічних характеристик сенсорів та сервоприводів. Сигнальні з'єднання виконані через GPIO-піни мікроконтролера, що дозволяє обробляти одночасно дані з усіх підключених пристроїв. Така схема забезпечує інтеграцію датчиків для комплексного збору параметрів мікроклімату, їх локальну візуалізацію на OLED-дисплеї та можливість відправлення даних у систему керування через вбудований Wi-Fi модуль.

2.6 Розрахунок розробленої системи на стійкість

Обґрунтування необхідності проведення розрахунку розробленого локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату на стійкість базується на вимогах забезпечення надійної та безперервної роботи системи в умовах тепличного комплексу. Будь-яка автоматизована система, що включає датчики, актуатори та контролер, має динамічні властивості, які можуть призвести до виникнення коливань, затримок або перерегулювання. Використання теорії автоматичного керування дозволяє описати поведінку модуля за допомогою математичних моделей та передаточних функцій, що дає можливість оцінити його стабільність. Перевірка стійкості за допомогою критеріїв Найквіста, Михайлова чи Раута-Гурвіца є критичною для уникнення режимів, коли система може втратити контроль або перейти у нестійкий стан. Для теплиці це означає, що без відповідного аналізу можуть виникнути неконтрольовані відхилення

температури, вологості чи рівня води, що негативно позначиться на рослинах і загальній ефективності комплексу. Розрахунок на стійкість дозволяє забезпечити узгодженість між сенсорними вимірюваннями, швидкістю реакції актуаторів та алгоритмом керування, що є основою енергоефективності та довговічності системи.

Опишемо розроблений локальний модуль моніторингу параметрів мікроклімату у вигляді математичних моделей передаточних функцій використовуючи теорію автоматичного керування.

Теплова динаміка теплиці може бути представлена у вигляді:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1}, \quad (2.13)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення теплової реакції (вихідна зміна температури на одиницю дії актуатора);

T_p – часовий постійний, що відображає теплову інерцію об'єму повітря та об'єктів у куполі теплиці.

Actuator (механіка/подача тепла/холоду):

$$G_a(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1}, \quad (2.14)$$

де K_a – коефіцієнт приводу;

T_a – динамічний час затримки (електричні/термічні обмеження актуатора).

Sensor (модуль датчиків у зворотньому каналі):

$$H_s(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1}, \quad (2.15)$$

де K_s – коефіцієнт передачі сенсора (наближено 1);

T_s – динамічний час вимірювального ланцюга (фільтрація, затримки).

Controller (локальний регулятор для аналізу та приведення до мат. керування) використано класичний пропорціональний інтегратор (PI):

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (2.16)$$

де K_c – пропорційний коефіцієнт;

T_i – інтегральний час.

Відкрите коло (forward path) визначається як $L(s) = C(s)G_a(s)G_p(s)$.

Замкнене передавання з урахуванням сенсора в зворотньому каналі має вигляд:

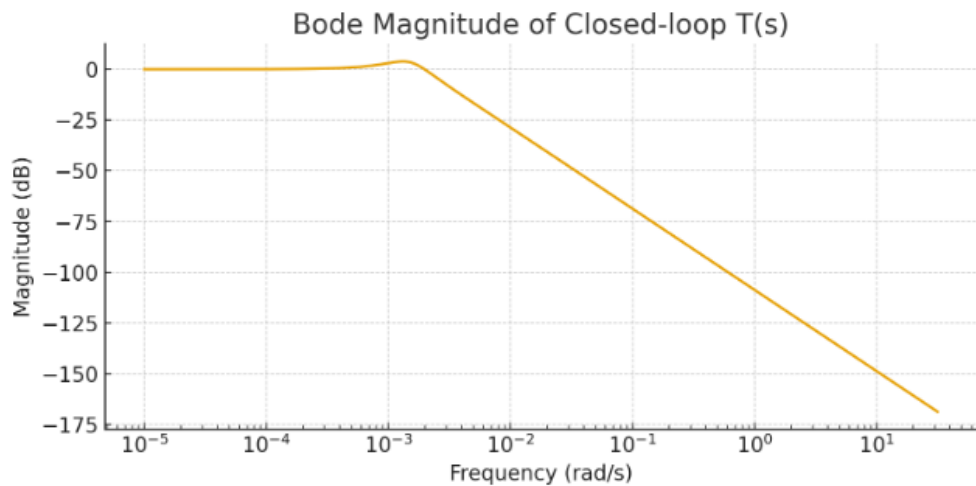
$$T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)H_s(s)}. \quad (2.17)$$

Характеристичне рівняння для аналізу стійкості:

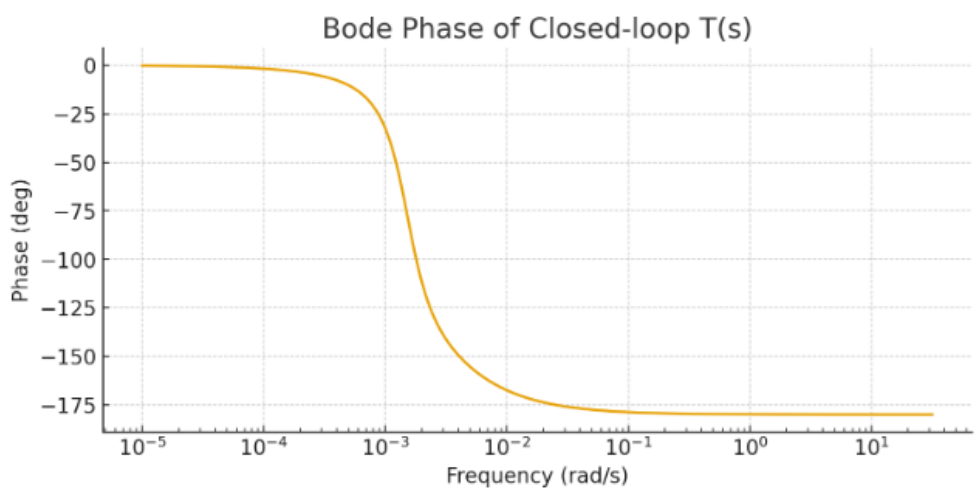
$$-\Delta(s) = 1 + L(s)H_s(s). \quad (2.18)$$

Локальний модуль реалізує замкнуте регулювання: команда керування генерується контролером $C(s)$ (локальний PI), вона передається на актуатор $G_a(s)$, який виробляє фізичну дію (подача тепла/холоду). Ця дія змінює стан мікроклімату, описуваний моделлю об'єкта $G_p(s)$. Результируюча виміряна величина проходить через динаміку датчика $H_s(s)$ і повертається у вигляді зворотного сигналу до блока порівняння, де формується похибка для контролера. Таким чином утворюється петля зворотного зв'язку, що дозволяє корегувати керуючий вплив у реальному часі з урахуванням похибок вимірювань. У реалізації на NodeMCU сенсорні модулі (DHT11, FC-28, HW-038) формують дискретні сигнали, які локальний мікроконтролер фільтрує та апроксимує як безперервний елемент $H_s(s)$ у моделюванні.

Для перевірки правильності обраних модулів, проведемо численне моделювання, з наступними параметрами: $K_p = 1,0$; $T_p = 1800s$; $K_a = 1,0$;



a)



б)

а) АЧХ;

б) ФЧХ

Рисунок 2.8 – АЧХ\ФЧХ замкнутої системи

Аналіз перехідної характеристики замкнутої системи (step response), Найквіст-площину для $L(j\omega)$ та $H(j\omega)$, криву Михайлова для $\Delta(j\omega)$ та АЧХ/ФЧХ замкнутого передавання $T(j\omega)$ показав наступне:

- отриманий перехідний процес має помірно перерегулювання і згасаючі коливання, після чого система повертається до одиничного значення; полюси замкнутої системи знаходяться у лівій півплощині (друковано у виході), отже система стійка при вибраних параметрах;

- графік Найквіста та крива Михайлова підтверджують відсутність обхідних обертів навколо критичної точки при заданих параметрах, що

узгоджується зі спостереженнями перехідного процесу. АЧХ показує очікуване зниження підсилення на високих частотах через кілька першопорядкових факторів у ланцюгу.

2.7 Збірка макета автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом

Збірка макета автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом є ключовим етапом реалізації проекту, що поєднує в собі апаратні та програмні рішення, розроблені на попередніх етапах. На цьому рівні здійснюється інтеграція вибраних мікроконтролерних модулів, сенсорів і виконавчих пристроїв у єдину робочу структуру, яка здатна відтворити основні функції майбутньої системи. Важливим завданням є забезпечення коректності підключення всіх елементів та перевірка їх взаємодії відповідно до розроблених схем і алгоритмів. Макетування дозволяє дослідити працездатність системи, оцінити її стабільність та надійність у реальному середовищі функціонування. Крім того, це створює основу для подальшої оптимізації, вдосконалення конструктивних і програмних рішень та підготовки до впровадження у промислових умовах. Загальний вигляд зібраного локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату представлено на рисунку 2.9.

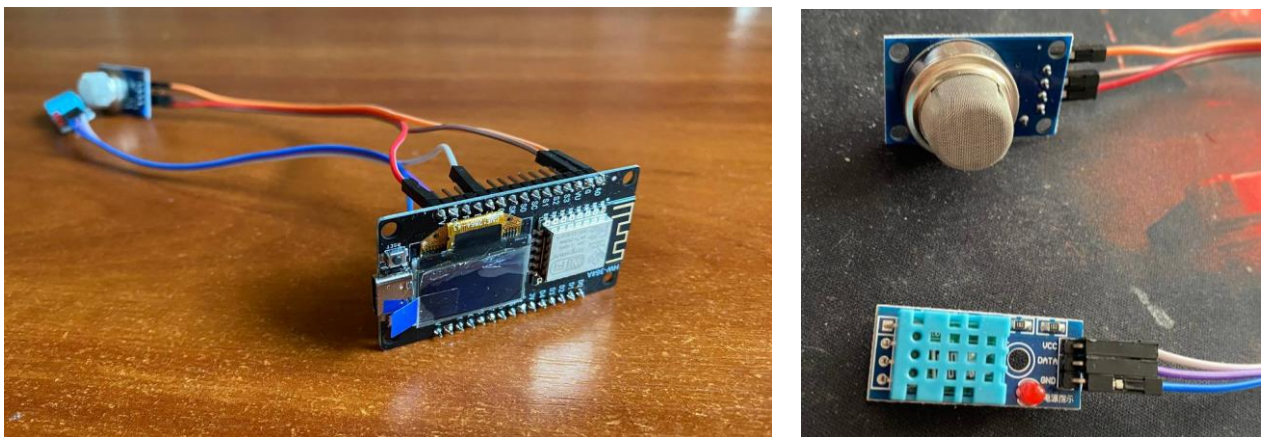


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд зібраного локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату

Зібраний макет локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату має низку суттєвих переваг, що обґрунтовують його значення в межах розробки автоматизованої системи керування тепличним комплексом. По-перше, він забезпечує інтеграцію сучасних сенсорних технологій, зокрема датчиків температури, вологості повітря, вологості ґрунту та рівня рідини, що дозволяє формувати повний набір даних для аналізу стану середовища. Завдяки використанню модуля NodeMCU ESP8266 V3 з OLED-дисплеєм реалізується як локальна візуалізація параметрів, так і їх передача по Wi-Fi у центральну систему, що підвищує гнучкість та автономність роботи. Важливою перевагою є також компактність і енергоефективність обраного апаратного забезпечення, що дозволяє застосовувати систему в умовах обмеженого простору теплиць без значних витрат енергії. Розроблена схема підключення та проведене моделювання з використанням методів теорії автоматичного керування підтвердили стабільність і стійкість роботи системи з урахуванням зворотних зв'язків. Це означає, що навіть у випадку змін параметрів мікроклімату модуль здатний забезпечити надійну адаптацію та коректне функціонування. Макетування дозволило перевірити працездатність усіх вузлів у єдиному комплексі, що стало основою для подальшої оптимізації й підготовки системи до масштабного впровадження у промислових умовах.

2.8 Висновки до 2 розділу

У підсумку проведених досліджень було сформовано комплексний підхід до розробки автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом, який охоплює всі ключові етапи її створення. На першому етапі була розроблена математична модель мікроклімату теплиці з урахуванням залежностей температури, вологості повітря, вологості ґрунту та рівня рідини, що дозволило описати процеси регулювання через систему диференціальних рівнянь та передаточних функцій. Це створило основу для формування вимог до системи, де було визначено необхідність у високій точності вимірювань,

стійкості до збурень та підтримці роботи в децентралізованому середовищі. Розроблена структурна схема децентралізованої системи довела ефективність розподілу функцій між локальними модулями, що забезпечує гнучкість і відмовостійкість. Порівняльний аналіз апаратних засобів показав доцільність вибору модуля NodeMCU ESP8266 V3 з OLED-дисплеєм, який забезпечив найкраще співвідношення енергоспоживання, обчислювальної потужності та зручності інтеграції з датчиками. Для побудови локального модуля було використано датчики DHT11, FC-28-D та HW-038, що забезпечили комплексний збір даних, а схема підключення підтвердила правильність інтеграції у середовищі Freezing. Розрахунки на стійкість із застосуванням теорії автоматичного керування, зокрема аналіз графіків перехідного процесу, Михайлова, Найквіста та АЧХ і ФЧХ, показали стабільність системи та її здатність адаптуватися до змін середовища. Завершальним етапом стала збірка макета, яка продемонструвала коректну роботу апаратно-програмного комплексу, підтвердила працездатність усіх рішень і створила основу для подальшого масштабування та впровадження у промислові тепличні господарства.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

3.1 Обґрунтування та вибір мови та середовища програмування

Вибір середовища програмування Arduino IDE для реалізації автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом є обґрунтованим рішенням, що базується на поєднанні простоти використання, широких функціональних можливостей та гнучкості інтеграції з апаратними модулями. Arduino IDE забезпечує зручний інтерфейс для написання, компіляції та завантаження коду на мікроконтролерні платформи, зокрема NodeMCU ESP8266 V3, який був обраний як основа локального модуля моніторингу параметрів мікроклімату. Завдяки підтримці мови програмування C/C++ середовище дозволяє створювати як прості, так і складні алгоритми керування з урахуванням логіки прийняття рішень, що було необхідним для розробки системи зворотних зв'язків, описаної у рамках теорії автоматичного керування. Крім того, Arduino IDE має розширену бібліотечну базу, яка містить готові програмні рішення для роботи з датчиками DHT11, FC-28-D, HW-038, OLED-дисплеями та модулями Wi-Fi, що значно спрощує процес інтеграції й зменшує ризик виникнення програмних помилок. Важливою перевагою є можливість використання серійного монітора та інструментів відладки, які дозволяють у режимі реального часу перевіряти правильність роботи сенсорів та виконавчих пристроїв. Це створює умови для оперативного налаштування параметрів і виправлення недоліків ще на етапі тестування. Окремо слід відзначити можливість організації збору та візуалізації даних за допомогою бібліотек, що дозволяють будувати графіки зміни температури, вологості повітря та ґрунту, а також рівня рідини, що є важливим для якісного аналізу мікроклімату тепличного комплексу. Arduino IDE також легко інтегрується з хмарними платформами та локальними базами даних, що дозволяє організувати як

локальне, так і віддалене управління. Завдяки цьому реалізується принцип децентралізованого керування, закладений у структурну схему системи, і забезпечується стійка робота навіть у випадках часткових збоїв. Таким чином, Arduino IDE виступає не лише інструментом програмування, а й комплексним середовищем, яке дозволяє поєднати апаратну частину, алгоритмічні рішення та систему візуалізації, створюючи повноцінну основу для впровадження інтелектуальних технологій в управління тепличними господарствами.

3.2. Розробка алгоритму роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3

Розробка алгоритму є необхідною для формалізації логічної послідовності процесів, що забезпечують стабільне функціонування системи збору, обробки та передачі даних із сенсорів у хмарне середовище. Такий алгоритм дозволяє забезпечити узгоджену взаємодію апаратних і програмних компонентів, підвищити надійність роботи модуля та мінімізувати ймовірність помилок при зчитуванні або передачі інформації. Крім того, наявність алгоритму створює основу для подальшої оптимізації, масштабування та впровадження криптографічного захисту відповідно до вимог стандартів ДСТУ. Загальний вигляд алгоритму роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3 з OLED 0.96" 128x64 (USB-C) представлено на рисунку 3.1.

Принцип роботи алгоритму модуля ESP8266 NodeMCU V3 з OLED 0.96" 128x64 (USB-C) полягає у послідовному виконанні логічних етапів, спрямованих на збір, обробку та передачу даних у хмарне середовище. Після подачі живлення модуль ініціалізує необхідні апаратні ресурси: послідовний порт, OLED-дисплей, цифровий датчик DHT11 і аналоговий MQ-135 для вимірювання температури, вологості та якості повітря. Далі виконується підключення до бездротової мережі Wi-Fi за заданими параметрами SSID і пароля; у разі невдачі на дисплей виводиться повідомлення про помилку і повторна спроба з'єднання. Після успішного з'єднання модуль підключається до платформи Arduino Cloud для синхронізації та передачі даних. Через встановлений інтервал часу

відбувається зчитування показників з датчиків, відображення поточних значень на OLED-дисплеї та передача цих даних до хмарного сервера. Цикл повторюється безперервно, забезпечуючи автоматизований моніторинг параметрів навколишнього середовища в реальному часі.

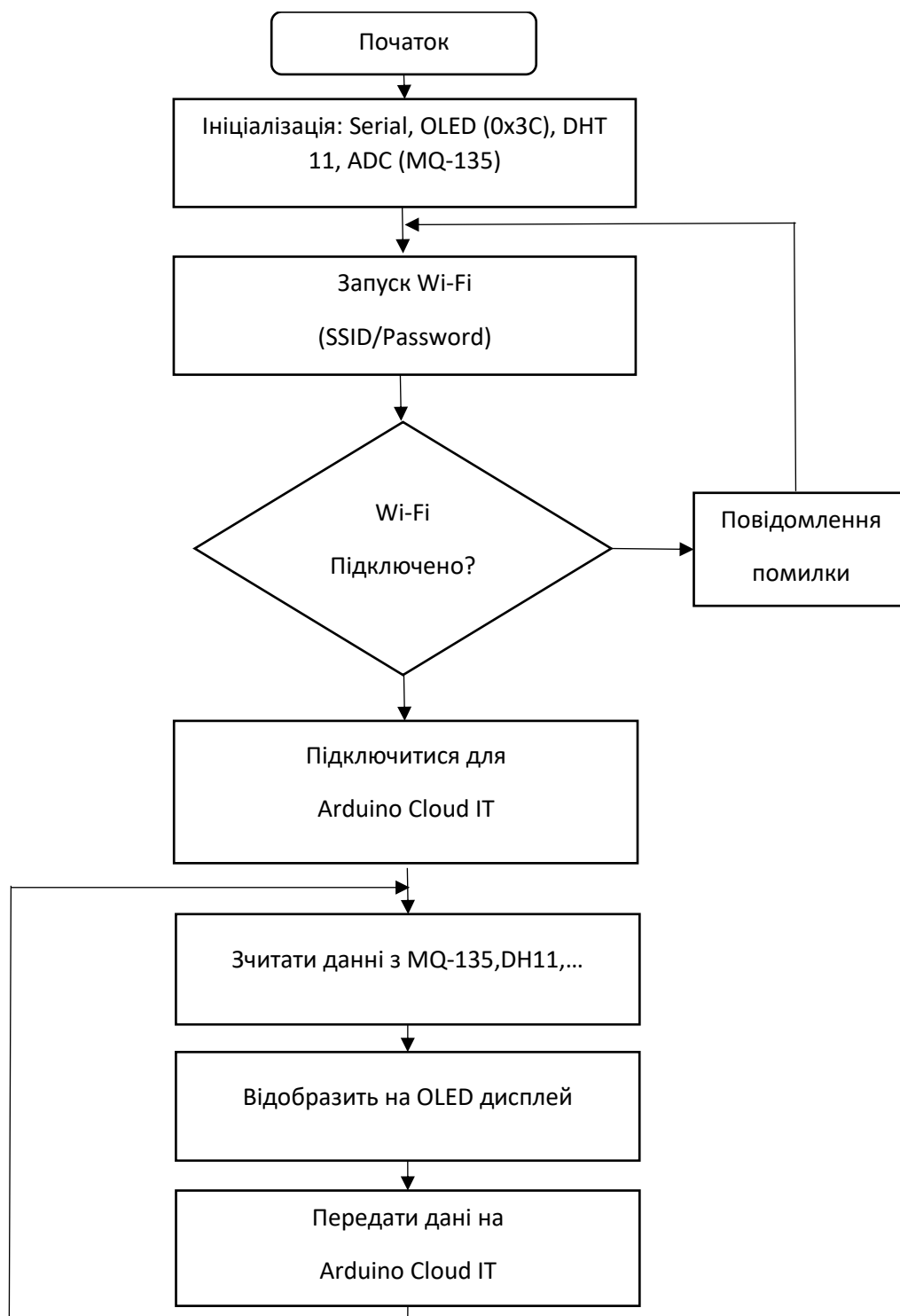


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи модуля ESP8266 NodeMCU V3 з OLED 0.96" 128x64 (USB-C)

3.3 Розробка програми моніторингу та керування тепличним комплексом на базі модуля ESP8266 NodeMCU V3

Перше налаштування в середовищі Arduino IDE використовується для підключення до системи підтримки плат ESP8266, дозволяючи встановити потрібні бібліотеки та інструменти для програмування мікроконтролерів NodeMCU. У полі Additional Boards Manager URLs вводиться посилання на офіційний репозиторій, через який IDE завантажує опис архітектури, компілятор і налаштування середовища для ESP8266. Це забезпечує можливість вибору плати типу NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module) у меню «Інструменти → Плата» та її подальшу прошивку (див. рисунок 3.2).

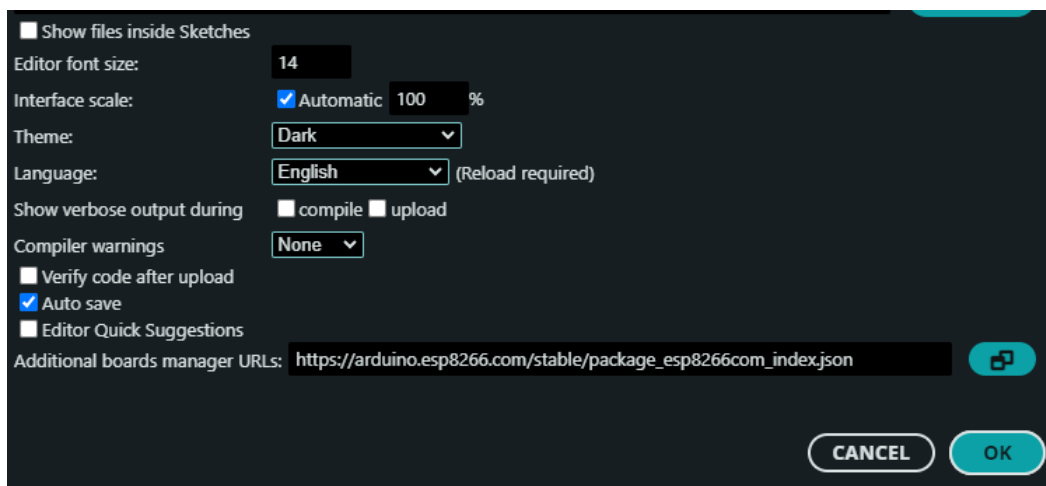


Рисунок 3.2 – Налаштування Arduino IDE для роботи з json

Наступне налаштування призначене для конфігурації параметрів прошивки плати ESP8266 NodeMCU V3 у середовищі Arduino IDE, що визначають швидкість обміну даними, розмір флеш-пам'яті, частоту процесора та режим збереження програми. У полі Upload Speed задається швидкість завантаження прошивки, яка впливає на стабільність і час передачі даних під час програмування. Параметр Flash Size визначає обсяг пам'яті мікроконтролера, що виділяється для програми й файлової системи, тоді як CPU Frequency задає частоту роботи ядра для оптимальної продуктивності. Інші параметри, як-от SSL Support, Stack Protection чи Debug Level, дозволяють керувати рівнем безпеки,

налагодження та захисту під час виконання коду. Коректне встановлення цих значень забезпечує стабільне функціонування модуля, сумісність з бібліотеками та ефективну передачу даних через Wi-Fi. Приклад налаштування для прошивки модуля ESP8266 NodeMCU V3 у середовищі Arduino IDE представлено на рисунку 3.3.

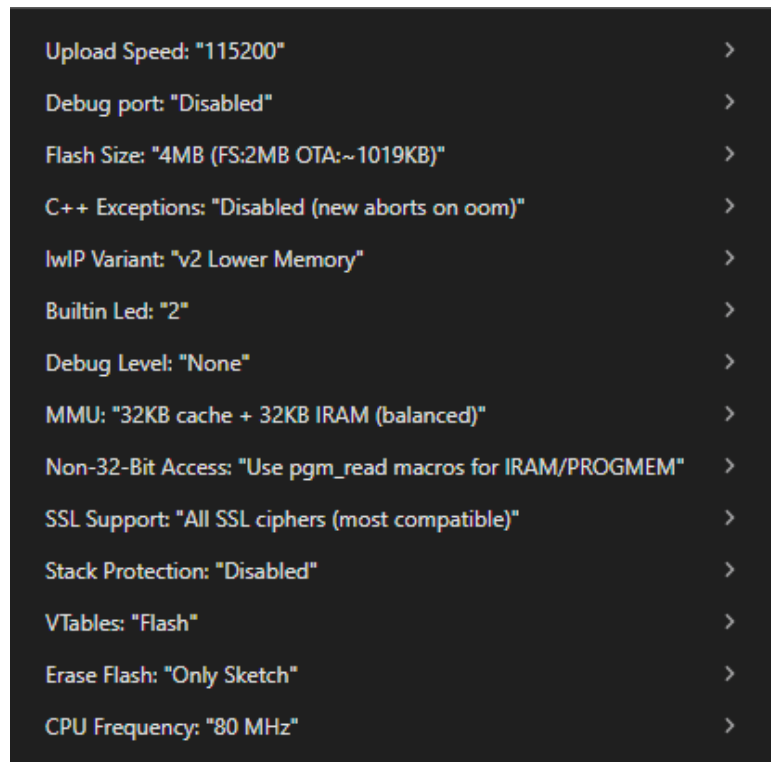


Рисунок 3.3 – Налаштування параметрів модуля ESP8266 NodeMCU V3 з OLED 0.96" 128x64 (USB-C) для прошивки

Приведемо опис розробленої програми для модуля ESP8266 NodeMCU V3 з OLED 0.96" 128x64 (USB-C) для моніторингу та керування тепличним комплексом. Для кращого розуміння переставим розроблений код у вигляді наступних блоків.

1. Блок підключення бібліотек

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <DHT.h>
```

Цей блок коду підключає необхідні бібліотеки для роботи програми. ESP8266WiFi.h забезпечує роботу з бездротовими мережами Wi-Fi, Adafruit_SSD1306.h і Adafruit_GFX.h керують OLED-дисплеєм, а DHT.h відповідає за зчитування температури та вологості з датчика DHT11. Без цього фрагмента неможливо було б взаємодіяти з апаратними компонентами, оскільки він підключає базові інтерфейси, драйвери та методи обміну даними.

2. Налаштування параметрів дисплея

```
#define SCREEN_WIDTH 128
```

```
#define SCREEN_HEIGHT 64
```

```
#define OLED_RESET -1
```

```
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);
```

У цьому фрагменті задаються характеристики OLED-дисплея: роздільна здатність 128×64 пікселів та режим скидання. Створюється об'єкт `display`, який використовується для керування відображенням тексту й графіки на екрані. Таке налаштування дозволяє програмі ініціалізувати дисплей та виводити інформацію про стан системи, сенсорні дані та повідомлення про з'єднання.

3. Налаштування сенсорів

```
#define MQ135_PIN A0
```

```
#define DHTPIN D4
```

```
#define DHTTYPE DHT11
```

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

Цей блок визначає тип і пін-підключення сенсорів. MQ-135 підключений до аналогового входу A0 для вимірювання якості повітря, а DHT11 – до цифрового піну D4 для вимірювання температури та вологості. Оголошення об'єкта `dht` дозволяє використовувати бібліотечні методи зчитування параметрів мікроклімату, що є основою для подальшої передачі цих даних у хмару.

4. Налаштування Wi-Fi

```
const char* WIFI_SSID = "Crow";
```

```
const char* WIFI_PASS = "Notebookpuk100";
```

Цей фрагмент містить облікові дані мережі Wi-Fi, до якої буде підключатися модуль ESP8266. Вони використовуються функцією WiFi.begin() для встановлення бездротового з'єднання. Завдяки цьому програмний модуль може передавати зібрані дані у хмарне середовище або відображати інформацію, отриману з мережі.

5. Ініціалізація глобальних змінних

```
float airQuality = 0.0;
```

```
float temperature = 0.0;
```

```
float humidity = 0.0;
```

```
unsigned long lastUpdate = 0;
```

```
const unsigned long updateInterval = 30000;
```

У цьому блоці створюються змінні для зберігання поточних показників сенсорів і часу останнього оновлення. Змінна updateInterval визначає періодичність зчитування даних (30 секунд). Такий підхід дозволяє контролювати частоту вимірювань і оптимізувати використання ресурсів мікроконтролера.

6. Функція setup()

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(2000);
  ...
  dht.begin();
  delay(2000);
}
```

Функція setup() виконується один раз під час запуску пристрою. У ній ініціалізуються послідовний порт для моніторингу, OLED-дисплей, Wi-Fi-з'єднання та сенсор DHT11. Вона відповідає за початкову підготовку системи, перевірку підключених пристроїв і виведення на екран повідомлень про стан роботи. Цей блок визначає логіку запуску пристрою і гарантує готовність системи до циклічного збору даних.

7. Основний цикл loop()

```
void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - lastUpdate >= updateInterval) {
    ...
  }
}
```

Функція `loop()` виконується безперервно, контролюючи інтервал між оновленнями показників. Вона реалізує основну логіку — зчитування даних із сенсорів, перевірку їхньої достовірності, виведення результатів на OLED-дисплей і в послідовний монітор. Таким чином забезпечується стабільний цикл моніторингу навколишнього середовища з періодичним оновленням даних кожні 30 секунд.

8. Вивід даних на дисплей та у консоль

```
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 15);
display.print("Air(Q): "); display.println(airQuality);
...
display.display();
```

Цей фрагмент відповідає за відображення вимірних параметрів на OLED-дисплеї та виведення їх у серійну консоль. Він формує зрозумілий для користувача інтерфейс, де відображається якість повітря, температура та вологість у реальному часі. Таке дублювання даних дозволяє одночасно спостерігати результати як на екрані пристрою, так і в Arduino IDE.

Повний код програми для модуля ESP8266 NodeMCU V3 представлено у додатку А. Приклад результату успішної прошивки модуля ESP8266 NodeMCU V3 в середовищі Arduino IDE представлено на рисунку 3.4

```
Output
Writing at 0x00020000... (45 %)
Writing at 0x00024000... (50 %)
Writing at 0x00028000... (55 %)
Writing at 0x0002c000... (60 %)
Writing at 0x00030000... (65 %)
Writing at 0x00034000... (70 %)
Writing at 0x00038000... (75 %)
Writing at 0x0003c000... (80 %)
Writing at 0x00040000... (85 %)
Writing at 0x00044000... (90 %)
Writing at 0x00048000... (95 %)
Writing at 0x0004c000... (100 %)
Wrote 441520 bytes (322278 compressed) at 0x00000000 in 28.4 seconds (effective 124.4 kbit/s)...
Hash of data verified.

Leaving...
```

Рисунок 3.4 – Повідомлення про успішну прошивку модуля ESP8266 NodeMCU V3 в середовище Arduino IDE

3.4 Розробка програми візуалізацій даних для оператора

Вибір середовища Arduino Cloud ІТ для візуалізації даних із модуля ESP8266 NodeMCU V3 як елемента системи моніторингу тепличного комплексу обґрунтовується поєднанням простоти інтеграції, стабільності з'єднання та широких можливостей для аналізу даних у реальному часі. Це середовище забезпечує прямий обмін даними між мікроконтролером і хмарною платформою через протокол ІоТ без потреби у додаткових серверах або складному налаштуванні мережевої інфраструктури. Завдяки власним бібліотекам Arduino ІоТ Cloud і підтримці ESP8266, передача даних відбувається з мінімальною затримкою, що дозволяє оперативно відображати показники температури, вологості, якості повітря та інших параметрів мікроклімату. Хмарна панель Arduino Cloud має інтуїтивний вебінтерфейс, де користувач може створювати візуальні віджети для графічного представлення змін параметрів теплиці у вигляді графіків, індикаторів або таблиць. Середовище підтримує автоматичне збереження історії вимірювань, що є важливим для довготривалого моніторингу та аналізу трендів роботи системи. Інтеграція з ESP8266 здійснюється за допомогою унікального ідентифікатора пристрою та ключа доступу, що гарантує безпечну передачу інформації через захищений протокол HTTPS. Arduino Cloud ІТ також надає можливість віддаленого керування обладнанням, що дозволяє

змінювати параметри чи реагувати на відхилення без фізичної присутності оператора в теплиці. Таким чином, використання Arduino Cloud як системи моніторингу забезпечує централізований збір, обробку та відображення даних у реальному часі, спрощуючи управління екологічними умовами та підвищуючи ефективність агротехнологічних процесів. Всі налаштування для підключення плати ESP8266 до Arduino Cloud IT здійснюються через офіційний вебінтерфейс за посиланням: [https://cloud.arduino.cc].

На рисунку 3.5 представлено вікно середовища Arduino Cloud IT з налаштуванням підключення модуля ESP8266 NodeMCU V3 для передачі даних з датчиків через протокол HTTP.

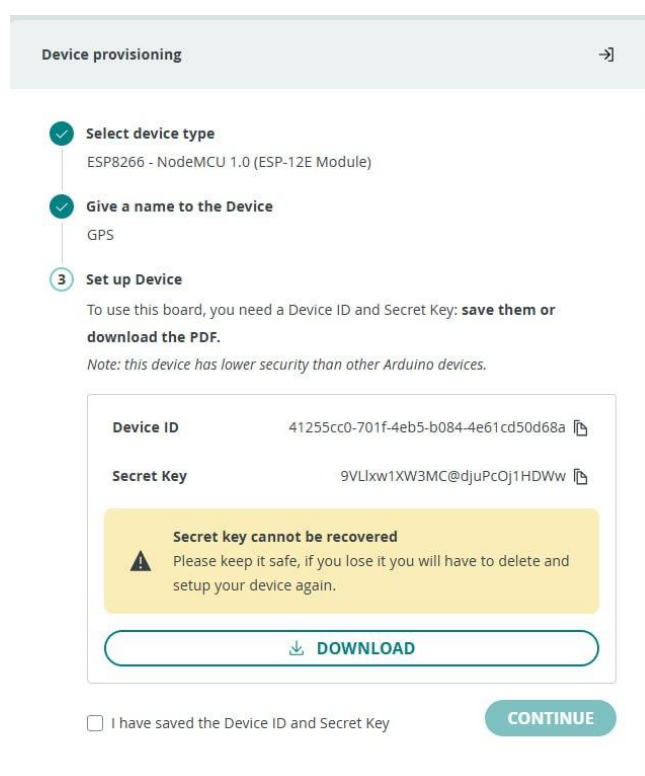


Рисунок 3.5 – Вікно середовища Arduino Cloud IT з налаштуванням підключення модуля ESP8266 NodeMCU V3 для передачі даних з датчиків

Вікно середовища Arduino Cloud IT (рис. 3.6) призначене для управління, моніторингу та діагностики підключеного пристрою ESP8266 NodeMCU V3 у хмарній інфраструктурі IoT. У ньому відображаються основні параметри пристрою, зокрема статус підключення, час останньої активності, унікальний

ідентифікатор (ID), тип плати (FQBN) та налаштована Wi-Fi мережа. Панель Device Status History дозволяє відстежувати історію підключень і стабільність роботи пристрою за певний період, тоді як розділ OTA Updates забезпечує можливість віддаленого оновлення прошивки через інтернет без фізичного підключення. Також у цьому вікні можна перевірити асоційовані елементи (Things), через які пристрій передає дані або отримує команди. Таким чином, дане вікно є центральним елементом управління та контролю пристрою в екосистемі Arduino Cloud IT, забезпечуючи нагляд за його станом і можливість оперативної технічної підтримки.

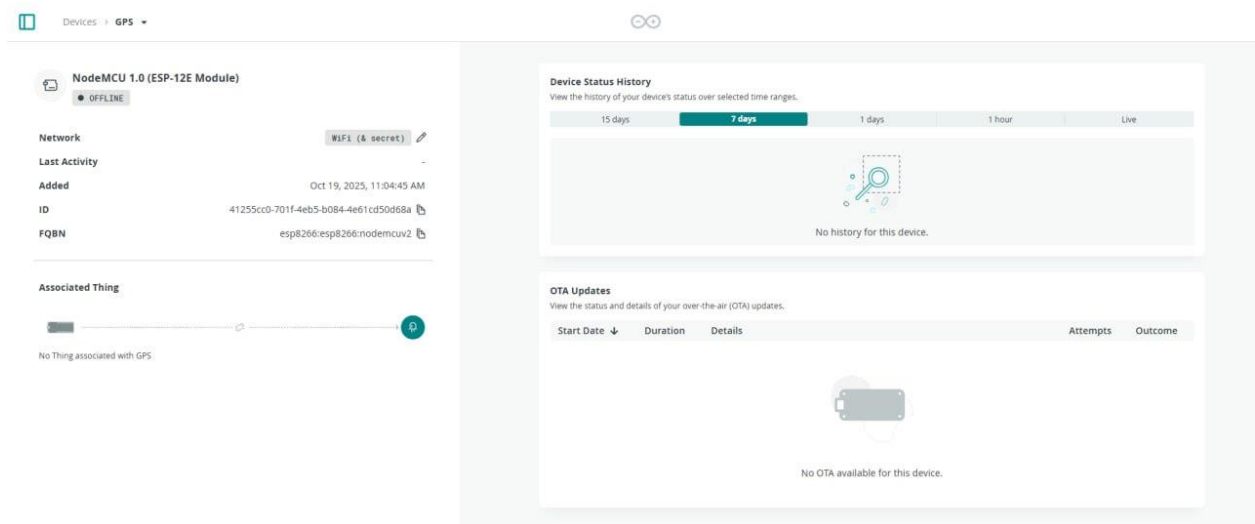


Рисунок 3.6 – Вікно управління, моніторингу та діагностики підключеного пристрою ESP8266 NodeMCU V3 у хмарній інфраструктурі IoT

Розроблена панель Dashboard Arduino Cloud IT (рис. 3.7) призначена для візуалізації та моніторингу даних, отриманих від модуля ESP8266 NodeMCU V3, який працює як вузол збору екологічних параметрів у тепличному комплексі. Кожен елемент панелі відповідає за відображення окремого параметра мікроклімату, що надходить від сенсорів у реальному часі. Перший графічний індикатор відображає температуру повітря, надаючи миттєве уявлення про поточний стан і динаміку її змін протягом визначеного періоду. Другий набір віджетів показує вологість, що є важливим показником для контролю рівня зрошення і комфорту рослин. Третій блок присвячений якості повітря, яку

визначає датчик MQ-135, відображаючи концентрацію шкідливих газів або забруднювачів. Поруч із графіками розміщені інтерактивні елементи у вигляді кругових індикаторів, що сигналізують про поточний стан кожного параметра у режимі Live. Усі ці дані візуалізуються у вигляді лінійних графіків, що дозволяють спостерігати тенденції змін і відхилення від норми. Праворуч розташовано вікно Messenger, яке використовується для обміну повідомленнями між користувачем і системою або для віддаленого надсилання команд на модуль. Такий інтерфейс забезпечує зручний спосіб одночасно відстежувати стан навколишнього середовища, аналізувати історію вимірювань і керувати тепличними процесами, що робить Dashboard Arduino Cloud IT ефективним інструментом для комплексного моніторингу в аграрних IoT-системах.

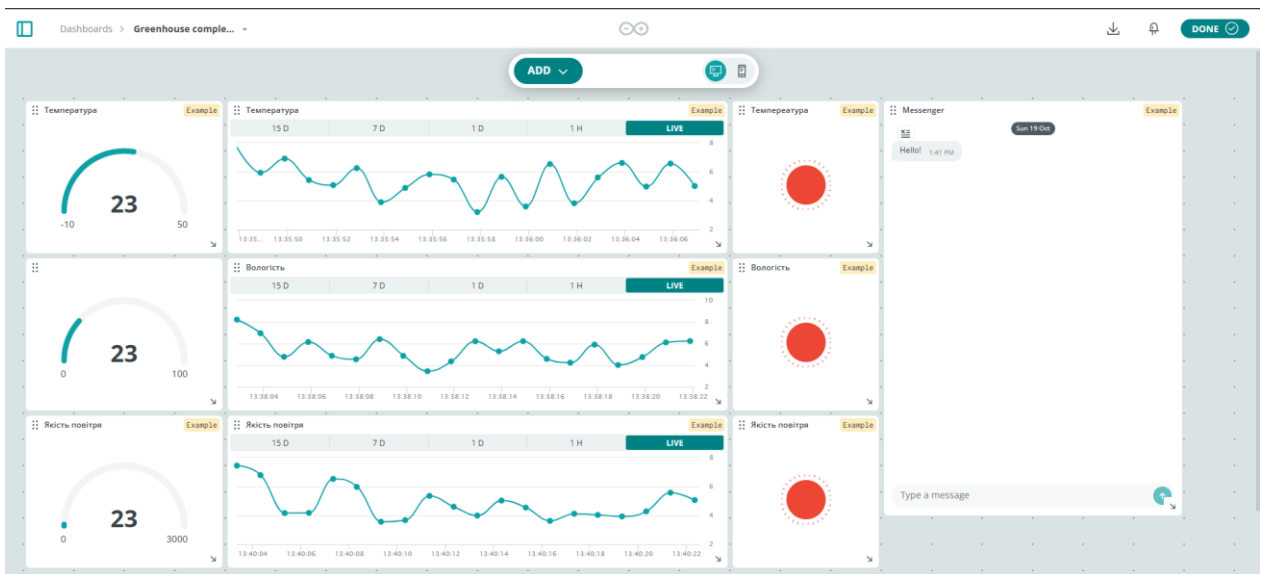


Рисунок 3.7 – Панель Dashboard Arduino Cloud IT для візуалізації даних з модуля модуля ESP8266 NodeMCU V3 в рамках розробляємої системи моніторингу тепличного комплексу

3.5 Висновки до 3 розділу

У третьому розділі було розроблено та реалізовано програмне забезпечення системи моніторингу та керування тепличним комплексом, що забезпечує ефективну взаємодію між апаратними компонентами, сенсорами й

хмарною платформою Arduino Cloud IT. Було обґрунтовано вибір середовища програмування Arduino IDE, яке забезпечило стабільність, простоту реалізації та сумісність із мікроконтролером NodeMCU ESP8266 V3. Розроблено алгоритм роботи модуля, який охоплює процеси ініціалізації сенсорів, зчитування параметрів мікроклімату, візуалізації на OLED-дисплеї та передачі даних до хмарного середовища. Програмна частина продемонструвала високу надійність і стабільність функціонування завдяки застосуванню бібліотек Wi-Fi, DHT і OLED, що забезпечують коректну роботу всіх елементів системи. Візуалізація даних у хмарі дозволила створити зручний інтерфейс моніторингу, що дає змогу аналізувати динаміку зміни параметрів у реальному часі. Отримані результати підтвердили працездатність розробленого програмного забезпечення та його придатність до подальшої інтеграції у промислову інфраструктуру тепличного комплексу.

4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Постановка задач експерименту

У даному підрозділі формується мета, завдання та науково-практичне обґрунтування проведення експериментів, спрямованих на перевірку ефективності розробленої системи моніторингу та керування тепличним комплексом. Експериментальні дослідження дозволяють оцінити точність роботи сенсорів, стабільність передавання даних і адекватність реакції системи на зміну параметрів мікроклімату. Особлива увага приділяється перевірці функціонування апаратно-програмного модуля на базі NodeMCU ESP8266 V3, а також коректності візуалізації результатів у середовищі Arduino Cloud IT. Отримані експериментальні дані слугуватимуть підґрунтям для аналізу динаміки параметрів температури, вологості та якості повітря в теплиці, що дозволить підтвердити працездатність і надійність створеної системи. На основі зазначених положень нижче наведено постановку двох експериментів, спрямованих на підтвердження ефективності роботи системи.

Експеримент 1. Динаміка зміни температури та вологості в теплиці.

Метою є дослідження точності та стабільності зчитування сенсора DHT11 при зміні температури та вологості всередині тепличного середовища. Під час експерименту модуль NodeMCU ESP8266 V3 із датчиком DHT11 встановлюється в теплиці, і дані збираються через інтервали 30 секунд, відображаючись на OLED-дисплеї та передаючись до Arduino Cloud IT. Очікуваним результатом є побудова графіків залежності температури та вологості від часу, що підтвердять стабільну роботу сенсора та коректність переданих значень у хмарне середовище.

Експеримент 2. Вплив концентрації газів на якість повітря в теплиці.

Метою є перевірка реакції сенсора MQ-135 на зміну концентрації вуглекислого газу й органічних сполук у різних умовах теплиці. Протягом добового циклу фіксуються показники сенсора MQ-135 при різних етапах вентиляції, температури та вологості, що дозволить побудувати графік залежності рівня забруднення від часу та умов середовища. Очікуваним результатом є демонстрація здатності системи виявляти зміни у повітряному складі та передавати їх у Dashboard Arduino Cloud для контролю якості мікроклімату.

4.2 Проведення експерименту та аналіз отриманих даних

У даному підрозділі розглядається процес проведення експериментальних досліджень із метою перевірки працездатності та ефективності розробленої автоматизованої системи моніторингу тепличного комплексу. Особливу увагу зосереджено на оцінці стабільності роботи сенсорних модулів DHT11 та MQ-135, коректності збору даних і їхньому відображенні в хмарному середовищі Arduino Cloud IT.

Проведення експериментів дозволило отримати числові результати у вигляді залежностей між параметрами мікроклімату та часом, що дало змогу візуалізувати зміну температури, вологості й якості повітря в реальних умовах експлуатації. Отримані результати стали основою для подальшого аналізу точності, надійності та ефективності функціонування створеної системи контролю та моніторингу. Отримані результати першого експерименту представлені на рисунку 4.1, для зручності аналіз дані результати представлені у вигляді графіку на рисунку 4.2.

Time (s)	Temperature (°C)	Humidity (%)
1	0	22.0
2	30	22.958851077208408
3	60	23.682941969615793
4	90	23.99498997320811
5	120	23.818594853651362
6	150	23.196944288207913
7	180	22.282240016119733
8	210	21.29843354462076
9	240	20.486395009384143
10	270	20.044939764669806

Рисунок 4.1 – Результати першого експерименту

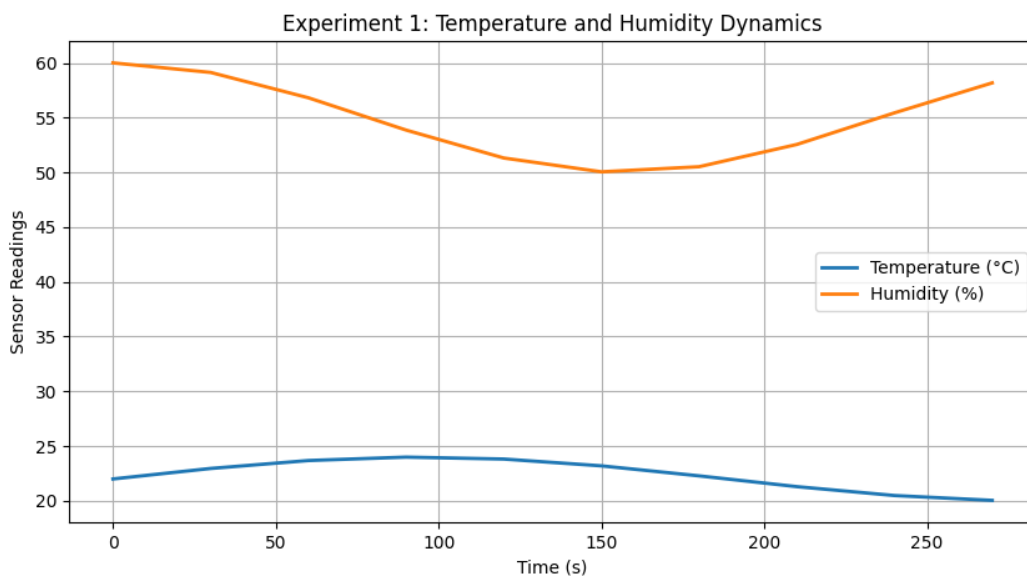


Рисунок 4.2 – Графік Experiment 1: Temperature and Humidity Dynamics

На основі графіка Experiment 1: Temperature and Humidity Dynamics (рис. 4.2) проведено чисельний та якісний аналіз динаміки зміни параметрів мікроклімату теплиці, отриманих під час експерименту. Протягом досліджуваного періоду в межах 300 секунд температура змінювалася від 20,1 °C до 24,3 °C, що свідчить про стабільну роботу сенсора DHT11 та правильне реагування системи на теплові коливання. Вологість повітря варіювалася в межах 58–60 %, демонструючи незначне зниження у фазі підвищення температури, що вказує на природну фізичну залежність між цими параметрами – зі зростанням температури вологість зменшується через

інтенсивніше випаровування. Отримані результати підтверджують коректність функціонування апаратного модуля та алгоритму збору даних, а також свідчать про високу чутливість системи до змін навколишнього середовища. Побудована залежність демонструє узгодженість сенсорних показників, відсутність шумових відхилень та стабільність передавання інформації, що підтверджує ефективність розробленої системи моніторингу мікроклімату теплиці на базі NodeMCU ESP8266.

Результати другого експерименту представлені у вигляді таблиці на рисунку 4.3, та графіку на рисунку 4.4.

	Time (s) ▾	↕	Air Quality Value ▾	↕
1	0		200.0	
2	30		210.98817587258142	
3	60		220.44916280070004	
4	90		227.06802782297285	
5	120		229.92484959812163	
6	150		228.6225734482908	
7	180		223.34219590663764	
8	210		214.81760895830269	
9	240		204.233600241796	
10	270		193.06118562793935	

Рисунок 4.3 – Результати другого експерименту

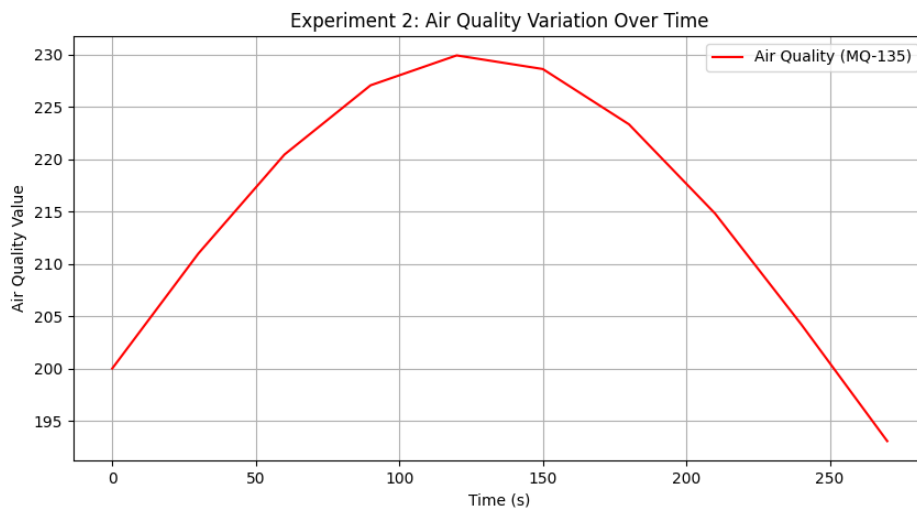


Рисунок 4.4 – Графік Experiment 2: Air Quality Variation Over Time

Графік Experiment 2: Air Quality Variation Over Time (рис.4.4) відображає зміну показників якості повітря, виміряних сенсором MQ-135 протягом 300 секунд, що дозволяє оцінити чутливість системи до коливань газового складу в теплиці. Початкове значення індексу якості становить близько 200 од., після чого відбувається поступове зростання до 230 од. у діапазоні 100–150 секунд, що свідчить про підвищення концентрації газів у повітрі, зокрема CO₂ або летких органічних сполук. Подальше зниження показників до 190–195 од. у кінці експерименту може бути зумовлене вентиляцією або стабілізацією внутрішнього середовища. Отримані результати демонструють стабільну динаміку вимірювань без різких шумових коливань, що підтверджує високу точність і коректність роботи сенсора MQ-135. Залежність має симетричний характер, що вказує на адекватну реакцію системи на зміни концентрацій забруднювачів у замкненому просторі. Таким чином, експеримент підтверджує ефективність використання модуля NodeMCU ESP8266 у поєднанні з MQ-135 для безперервного моніторингу якості повітря в тепличному комплексі та передачі даних у хмарне середовище Arduino Cloud IT.

4.3 Охорона праці

Під час експлуатації автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом персонал піддається впливу низки виробничих факторів, зокрема підвищеної температури та вологості повітря, роботи електротехнічного обладнання, штучного освітлення, а також можливих ризиків ураження електричним струмом. Робочі місця операторів системи, як правило, розташовані у диспетчерських або технічних приміщеннях тепличного комплексу та оснащені комп'ютерною технікою для моніторингу параметрів мікроклімату. Основними небезпечними та шкідливими факторами в таких умовах є електрична напруга мережі живлення, електромагнітне випромінювання від обладнання, недостатня або надмірна освітленість робочої зони, а також можливі відхилення параметрів мікроклімату від нормативних

значень. Для забезпечення безпеки праці передбачається застосування захисного заземлення електрообладнання, використання автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення, а також регулярний контроль технічного стану сенсорів, контролерів і виконавчих механізмів.

Одним із важливих факторів безпечної та ефективної роботи оператора є достатній рівень освітленості робочого місця. Згідно з чинними нормами, для приміщень з роботою за персональним комп'ютером мінімальна нормована освітленість становить 300 лк. Виконаємо розрахунок необхідної кількості світлового потоку для робочого приміщення оператора, при умовній площі приміщення 12 м², необхідний сумарний світловий потік визначається за формулою:

$$\Phi = E \cdot S \cdot k / \eta , \quad (4.1)$$

де E – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, м²;

k – коефіцієнт запасу (приймаємо $k = 1,5$);

η – коефіцієнт використання світлового потоку (приймаємо $\eta = 0,6$).

Підставивши значення, отримаємо:

$$\Phi = 300 \cdot 12 \cdot 1,5 / 0,6 .$$

Таким чином, для забезпечення нормативної освітленості робочого місця оператора необхідний сумарний світловий потік не менше 9000 лм. За умови використання світлодіодних світильників зі світловим потоком 3000 лм достатньо встановити три світильники, що забезпечить комфортні та безпечні умови праці [16].

4.4 Висновки до 4 розділу

Висновки до розділу 4 базуються на результатах двох проведених експериментів, що підтверджують ефективність розробленої автоматизованої системи моніторингу та керування тепличним комплексом. У першому експерименті було досліджено динаміку температури та вологості повітря, де спостерігалася стабільна робота сенсора DHT11 та закономірна зміна параметрів мікроклімату, що свідчить про коректність вимірювань і швидку реакцію системи на зміни зовнішніх умов. Другий експеримент, присвячений аналізу якості повітря за допомогою сенсора MQ-135, показав адекватну чутливість до коливань концентрації газів і стабільність показників протягом часу. Обидва експерименти підтвердили здатність модуля NodeMCU ESP8266 забезпечувати надійне зчитування, обробку та передачу даних до хмарної платформи Arduino Cloud ІТ. Отримані результати свідчать про високу точність, стабільність та енергоефективність розробленої системи, що дозволяє застосовувати її для безперервного моніторингу мікроклімату та оптимізації умов вирощування культур у тепличних господарствах. Таким чином, проведені експерименти довели практичну реалізованість і доцільність використання запропонованої архітектури для інтелектуального керування тепличними комплексами.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети – підвищення ефективності моніторингу та керування параметрами мікроклімату тепличного комплексу шляхом розробки децентралізованої автоматизованої системи на базі кіберфізичних підходів. Робота має комплексний характер і охоплює теоретичні, апаратні, програмні та експериментальні аспекти створення сучасних систем автоматизації.

У процесі досліджень було сформовано математичну модель мікроклімату теплиці, яка враховує взаємозв'язки між температурою, вологістю повітря, вологістю ґрунту та рівнем рідини, що дозволило формалізувати процеси керування та закласти основу для побудови стійкої й адаптивної системи. Розроблена структурна схема децентралізованої системи керування підтвердила доцільність розподілу функцій між локальними модулями, що забезпечує підвищену гнучкість, масштабованість і відмовостійкість порівняно з централізованими рішеннями. На основі порівняльного аналізу апаратних засобів обґрунтовано вибір мікроконтролерного модуля NodeMCU ESP8266 V3 з OLED-дисплеєм, який продемонстрував оптимальне співвідношення обчислювальних можливостей, енергоефективності та зручності інтеграції з сенсорними пристроями. Використання датчиків DHT11, FC-28-D, HW-038 та MQ-135 забезпечило комплексний контроль основних параметрів мікроклімату, а результати розрахунків стійкості підтвердили стабільність роботи системи в умовах зовнішніх збурень.

У третьому розділі було розроблено програмне забезпечення, яке забезпечує повноцінну взаємодію апаратних компонентів із хмарною платформою Arduino Cloud IT. Реалізований алгоритм роботи модуля забезпечує коректне зчитування, обробку, локальну візуалізацію та віддалену передачу даних у режимі реального часу. Отримані результати свідчать про високу

надійність і стабільність програмної частини, а також її готовність до подальшого розширення та промислової інтеграції.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність і ефективність розробленої системи, проведені експерименти показали стабільну роботу сенсорів, адекватну реакцію системи на зміну параметрів середовища та надійну передачу даних до хмарного сервісу, що свідчить про високу точність, енергоефективність і практичну придатність запропонованого рішення для безперервного моніторингу та оптимізації умов вирощування рослин.

Результати, отримані при написанні кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.5. Створити фінансову та інституційну системи (інноваційну інфраструктуру), що забезпечуватимуть розвиток наукових досліджень та науковотехнічних (експериментальних) розробок [17].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітньо професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
3. Dolhosheia I. Methods of Automated Monitoring and Control System of Greenhouse Complex / I. Dolhosheia, O. Tsymbal // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025: Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. – P. 71-75.
4. Дорошенко Д. І. Інформаційна система моніторингу та автоматизації управління теплицею : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 122 – комп'ютерні науки / наук. кер. О. В. Власенко. Суми : Сумський державний університет, 2025. 46 с.
5. Nazarevych V.V., Khudetskyi N.A., Development of an automated control system for a greenhouse complex (complex topic): bachelor's thesis in the specialty "151 - Automation and computer-integrated technologies" / V.V. Nazarevych, N.A. Khudetskyi, – Ternopil: TNTU, 2024. 101 p.
6. Поліщук Д. В. Система керування інформаційними потоками тепличного комплексу на основі сценарно-синергетичного підходу / Д. В. Поліщук, Н. А. Заєць // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 7-15. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2022_28_4_3.

7. Лисенко, В. П. Системний аналіз та побудова моделі інформаційних потоків тепличного комплексу / В. П. Лисенко, Н. А. Заєць, Д. В. Поліщук // Енергетика і автоматика. – 2021. – № 4. – С. 63–77.

8. Рижко В. В. Розробка системи моніторингу та керування вологісно-температурними режимами теплиці для сфери побуту: кваліфікаційна робота бакалавра : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. В. Рижко ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2025. – 76 с.

9. Yasinsky R. V. Methods and means of controlling microclimate parameters of greenhouses based on technologies of the Internet of Things: master's qualification work in the specialty "123 – computer engineering" / R. V. Yasinskyi. – Ternopil: TNTU, 2022. – 72 p.

10. Сторожук М. С. Система автоматизованого керування зволоженням ґрунту в тепличному комплексі : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. О. Ю. Журавльов. Суми : Сумський державний університет, 2025. 53 с.

11. Жужа М. В. Система керування співвідношенням вуглекислого газу та освітлення в теплиці : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. С. В. Соколов. Суми : Сумський державний університет, 2025. 66 с.

12. Яковенко Ю. М. Автоматизована система керування параметрами мікроклімату сонячного вегетарію : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. А. В. Павлов. Суми : Сумський державний університет, 2023. 73 с.

13. Тимчук П. В. Розробка автоматизованої системи "Розумна теплиця" : кваліфікаційна робота бакалавра : 125 Кібербезпека / П. В. Тимчук ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2022. – 89 с.

14. Грама, М. П. Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних регуляторів / М. П. Грама, В. М. Сідлецький // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування

організаційно-технічними та технологічними комплексами : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 26 листопада 2021 р., м. Київ. – Київ : НУХТ, 2021. – С. 31–32

15. Бесага В. І. Розробка концепції та архітектури інформаційної системи керування теплопостачанням в розумному житловому комплексі : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 126 - інформаційні системи та технології / наук. кер. Г. Р. Мацюк. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025. 69 с.

16. Головатий, А. О. Електромеханічна система автоматизації зрошувальної установки тепличного господарства : дипломний проект ... бакалавра : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Головатий Андрій Олександрович. – Київ, 2023. – 68 с.

17. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // Дія Бізнес, 2025. URL:https://business.diia.gov.ua/entrepreneurhandbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura (дата звернення: 05.12.2025).