

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32
Назва теми

КВРКІ 210114.21.01.71 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент IV курсу, група KI2-21-1


Підпис

Віктор КРАВЧУК
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Ігор МИХАЛЬЧУК
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«19» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень БАКАЛАВР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

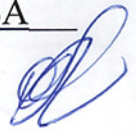
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.



ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Віктору КРАВЧУКУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32

Керівник проекту (роботи) Ігор МИХАЛЬЧУК, асистент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз вимог та технологій системи контролю мікроклімату в тераріумі

Розробка апаратної частини системи контролю мікроклімату

Програмно-апаратна реалізація та тестування системи контролю мікроклімату

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

Схема електрична принципова

Схема функціональна

Схема структурна

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прий
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КПС		
Антиплагиат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примі
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	викона
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	викон
3	Робота над розділом 1 – аналіз вимог до мікроклімату для різних видів тварин, порівняння існуючих систем керування, постановка задачі	01.03.2025	викон
4	Робота над розділом 2 – вибір апаратних компонентів, проєктування апаратної частини системи автоматизації	01.04.2025	викон
15	Робота над розділом 3 – розробка алгоритмів керування, складання прототипу, аналіз роботи та оптимізація системи.	29.04.2025	викон
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	викон
7	Попередній захист ВКР	23.05.2025	викон
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Віктор КРАВЧУК
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Ігор МИХАЛЬЧУК
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32».

Автор роботи: Віктор КРАВЧУК.

Керівник роботи: Михальчук Ігор Володимирович.

Пояснювальна записка: 58 с., 7 рис., 4 табл., 4 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

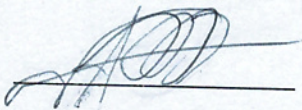
ADC, BLE, ESP32, IDE, SRAM, UART, PWM, LED.

Мета роботи полягає в розробці, реалізації та тестуванні системи контролю мікроклімату в тераріумі на базі мікроконтролера ESP32, яка забезпечує автоматичне регулювання температури, вологості та освітлення, а також підтримує моніторинг і керування через інтерфейс користувача.

Об'єкт дослідження – процеси контролю та регулювання мікроклімату в тераріумах для забезпечення оптимальних умов утримання тварин.

Предмет дослідження – система автоматизованого контролю мікроклімату в тераріумі, побудована на базі мікроконтролера ESP32 із використанням сенсорів і виконавчих пристроїв.

Методи дослідження включають: аналіз наукової та технічної літератури, порівняльний аналіз апаратних і програмних засобів, системний підхід до проектування схем і алгоритмів, експериментальне тестування системи в симуляторі та на апаратній платформі, а також аналіз результатів для оптимізації роботи системи.



Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ВИМОГ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕРАРІУМІ	6
1.1 Аналіз потреб мікроклімату для різних видів тварин у тераріумах..	6
1.2 Огляд існуючих систем контролю мікроклімату та їх функціональності.....	10
1.3 Вивчення можливостей мікроконтролера ESP32 для реалізації системи	14
1.4 Аналіз сенсорів і модулів для вимірювання температури, вологості та освітлення.....	18
1.5 Висновки до першого розділу.....	23
2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ	25
2.1 Визначення функціональних вимог до системи	25
2.2 Розробка функціональної та структурної схем системи.....	30
2.3 Розробка принципової електричної схеми системи	35
2.4 Висновки до другого розділу	41
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ	43
3.1 Розробка алгоритмів управління мікрокліматом.....	43
3.2 Налаштування середовища Arduino IDE для роботи з ESP32.....	50
3.3 Складання апаратного прототипу системи	53
3.4 Тестування системи на симуляторі Wokwi та апаратній платформі	55
3.5 Аналіз стійкості системи до збоїв та оптимізація роботи	58
3.6 Висновки до третього розділу	60

КвРКІ.210114.21.01.71 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Віктор КРАВЧУК		30.05.21
Перевір.		Ігор МИХАЛЬЧУК		19.06.21
Н.КОНТР.		Тетяна КИСЛІЬ		19.06.21
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		19.06.21
Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32 Пояснювальна записка				
		Літера	Арк.ш	Арк.шів
		у	2	74
ХНУ КІ2-21-1				

ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	62
ДОДАТОК А.....	69
ДОДАТОК Б	70
ДОДАТОК В.....	71
ДОДАТОК Г	72

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій відкриває нові можливості для автоматизації процесів у різних сферах, зокрема у догляді за екзотичними тваринами, що утримуються в тераріумах. Забезпечення оптимального мікроклімату, включаючи температуру, вологість і освітлення, є критично важливим для здоров'я та комфорту рептилій, амфібій, комах та інших видів, які потребують специфічних умов. Недостатня або нестабільна регуляція цих параметрів може призвести до стресу, хвороб або навіть загибелі тварин. Традиційні методи контролю мікроклімату, такі як ручне регулювання обігрівачів чи зволожувачів, є трудомісткими, ненадійними та не дозволяють забезпечити високий рівень точності й автоматизації.

Розвиток мікроконтролерних технологій, зокрема поява доступних і потужних платформ, таких як ESP32, дозволяє створювати ефективні системи автоматизації з можливістю віддаленого моніторингу та керування. ESP32 вирізняється високою продуктивністю, підтримкою бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth), низьким енергоспоживанням і широкими можливостями інтеграції з різноманітними сенсорами та виконавчими пристроями. Це робить його ідеальним вибором для реалізації системи контролю мікроклімату в тераріумах, що може значно спростити догляд за тваринами та підвищити якість їх утримання.

Актуальність теми зумовлена зростаючим інтересом до утримання екзотичних тварин як у приватних, так і в професійних умовах (зоопарки, наукові лабораторії), а також потребою в доступних, гнучких і енергоефективних рішеннях для автоматизації тераріумів. Більшість комерційних систем контролю мікроклімату є дорогими, мають обмежений функціонал або не дозволяють користувачу адаптувати їх до специфічних потреб. Розробка власної системи на базі ESP32 дає змогу створити економічно вигідне рішення з відкритим кодом, яке можна налаштувати під різні види тварин і умови утримання.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна полягає в розробці гнучкої та доступної системи контролю мікроклімату, яка інтегрує сучасні технології ESP32, забезпечує адаптивне керування параметрами мікроклімату та підтримує віддалений моніторинг через користувацький інтерфейс. На відміну від комерційних аналогів, запропонована система має відкритий код і може бути легко модифікована для різних сценаріїв використання.

Практична цінність роботи полягає в створенні економічно вигідного рішення для автоматизації тераріумів, яке може бути використано як приватними власниками екзотичних тварин, так і в професійних установах. Система забезпечує стабільне підтримання мікроклімату, знижує ризик людських помилок і зменшує витрати часу на догляд за тваринами. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем автоматизації в інших сферах, таких як акваріумістика чи тепличне господарство.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 АНАЛІЗ ВИМОГ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕРАРІУМІ

1.1 Аналіз потреб мікроклімату для різних видів тварин у тераріумах

Тераріуми є спеціалізованими середовищами, створеними для утримання екзотичних тварин, таких як рептилії, амфібії, павукоподібні, комахи та деякі дрібні ссавці. Забезпечення оптимального мікроклімату в тераріумах є ключовим фактором для здоров'я, добробуту та довголіття тварин, оскільки кожен вид має унікальні вимоги до температури, вологості, освітлення та вентиляції. Ці параметри впливають на фізіологічні процеси, такі як терморегуляція, травлення, линька та репродукція. Недотримання відповідних умов може призвести до стресу, хвороб або навіть загибелі тварин.

Температура є одним із найважливіших параметрів мікроклімату, оскільки більшість тераріумних тварин є ектотермами, тобто їхня температура тіла залежить від зовнішнього середовища. Наприклад, пустельні рептилії, такі як бородата агама (*Pogona vitticeps*), потребують денної температури в зоні прогріву від 35 до 40°C, тоді як у прохолодній зоні температура може бути в межах 25–30°C. Нічна температура для цього виду не повинна опускатися нижче 20°C. Водночас тропічні види, такі як червоноока деревна жаба (*Agalychnis callidryas*), потребують стабільної температури в межах 24–28°C без значних коливань, щоб уникнути теплового стресу.

Для змій, таких як королівський пітон (*Python regius*), рекомендовано підтримувати градієнт температур: зона прогріву – 30–32°C, прохолодна зона – 24–26°C. Такий градієнт дозволяє тварині самостійно вибирати комфортну температуру залежно від її фізіологічних потреб. Наприклад, після прийому їжі пітони часто переміщуються в зону прогріву для прискорення травлення. Павукоподібні, такі як павук-птахоїд (*Theraphosa blondi*), менш вимогливі до температурного градієнта, але потребують стабільної температури в межах 25–28°C для нормальної активності та линьки.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим аспектом є підтримання нічних і денних температурних режимів. Наприклад, для пустельних видів необхідно знижувати температуру вночі, щоб імітувати природні умови, тоді як для тропічних видів різке зниження температури може бути шкідливим. Таким чином, система контролю мікроклімату повинна забезпечувати точне регулювання температури з можливістю програмування денних і нічних циклів, а також підтримання температурного градієнта в межах тераріуму.

Вологість є ще одним критично важливим параметром, особливо для тропічних і напівтропічних видів. Наприклад, червоноока деревна жаба потребує високої вологості на рівні 70–90%, що імітує умови тропічних лісів. Для цього виду недостатня вологість може призвести до проблем із линькою та диханням через шкіру. Тропічні змії, такі як королівський пітон, потребують вологості в межах 50–60%, але під час линьки цей показник необхідно підвищувати до 70–80%, щоб полегшити скидання шкіри.

Пустельні види, такі як бородата агама, краще почуваються при низькій вологості (30–40%), оскільки надмірна вологість може спричинити грибкові інфекції або проблеми з диханням. Водночас павуки-птахоїди, попри тропічне походження, можуть адаптуватися до вологості в межах 60–80%, але потребують регулярного зволоження субстрату для підтримання комфортного середовища.

Для забезпечення відповідного рівня вологості в тераріумах використовуються зволожувачі, системи туману або ручне обприскування. Однак ручні методи є ненадійними через нестабільність параметрів, тому автоматизована система контролю вологості з використанням сенсорів і виконавчих пристроїв є більш ефективною. Система повинна мати можливість підтримувати заданий рівень вологості, а також реагувати на різкі зміни, наприклад, після провітрювання тераріуму.

Освітлення в тераріумах виконує кілька функцій: забезпечує фотоперіод (імітацію дня і ночі), підтримує синтез вітаміну D3 у рептилій і створює комфортне середовище для активності тварин. Наприклад, бородаті агами потребують 12–14

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

годин ультрафіолетового (UVB) освітлення на день для синтезу вітаміну D3, який необхідний для засвоєння кальцію та запобігання метаболічним захворюванням кісток. Відсутність UVB-освітлення може призвести до рахіту або деформації скелета.

Тропічні види, такі як червоноока деревна жаба, менш залежні від UVB-освітлення, але потребують м'якого світла з фотоперіодом 12 годин для підтримання природного ритму активності.

Для нічних видів, таких як павуки-птахоїди, пряме яскраве освітлення може бути стресовим, тому рекомендовано використовувати слабке розсіяне світло або імітацію місячного світла вночі. Змії, такі як королівський пітон, не потребують UVB-освітлення, але для них важливий чіткий фотоперіод (12 годин світла і 12 годин темряви), щоб підтримувати природний біоритм.

Система контролю мікроклімату повинна забезпечувати програмоване керування освітленням, включаючи регулювання інтенсивності, тривалості фотоперіоду та, за потреби, імітацію природних циклів (наприклад, поступовий схід і захід сонця). Використання світлодіодних стрічок або ламп із підтримкою димування дозволяє гнучко налаштувати освітлення для різних видів тварин.

Вентиляція в тераріумах необхідна для підтримання якості повітря, запобігання накопиченню вуглекислого газу та контролю рівня вологості. Надмірна вентиляція може призвести до швидкої втрати вологості, що є проблемою для тропічних видів, тоді як недостатня вентиляція сприяє розвитку грибків і бактерій. Наприклад, для бородатих агам рекомендовано використовувати тераріуми з сітчастими кришками для хорошої циркуляції повітря, тоді як для червонооких деревних жаб потрібні закриті тераріуми з обмеженою вентиляцією для збереження високої вологості.

Автоматизована система контролю мікроклімату може включати вентилятори або клапани для регулювання повітряного потоку, синхронізовані з вимірюваннями вологості та температури. Це дозволяє уникнути різких змін параметрів і забезпечити стабільне середовище для тварин.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі аналізу потреб різних видів тварин можна зробити висновок, що система контролю мікроклімату в тераріумі повинна бути гнучкою та адаптивною.

Система має забезпечувати точне регулювання температури із підтримкою теплового градієнта між зоною прогріву та прохолодною зоною, а також програмовані денні й нічні режими.

Вона повинна контролювати рівень вологості з можливістю оперативного реагування на його відхилення від заданих значень. Освітлення має керуватись з урахуванням фотоперіоду, з можливістю регулювання яскравості та, за потреби, використанням UVB-випромінювання. Крім того, система повинна виконувати регулювання вентиляції для забезпечення належної якості повітря без надмірної втрати вологості.

Крім того, система повинна мати інтерфейс для моніторингу параметрів у реальному часі та віддаленого керування, що спрощує догляд за тваринами. Наприклад, власник може отримувати сповіщення про критичні відхилення температури чи вологості через мобільний додаток. Такий підхід підвищує надійність системи та знижує ризик людських помилок.

Аналіз потреб мікроклімату для різних видів тварин у тераріумах показав, що температура, вологість, освітлення та вентиляція є ключовими параметрами, які необхідно контролювати для забезпечення здоров'я та комфорту тварин.

Кожен вид має специфічні вимоги: пустельні рептилії потребують високих температур і низької вологості, тропічні амфібії – високої вологості та стабільної температури, а нічні види – мінімального освітлення.

Система контролю мікроклімату повинна бути гнучкою, автоматизованою та здатною адаптуватися до різних умов утримання, що робить мікроконтролер ESP32 перспективною платформою для її реалізації завдяки його універсальності та можливостям інтеграції з сенсорами й виконавчими пристроями.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд існуючих систем контролю мікроклімату та їх функціональності

Системи контролю мікроклімату в тераріумах призначені для автоматизації процесів регулювання температури, вологості, освітлення та вентиляції, що забезпечує оптимальні умови для утримання екзотичних тварин. На сучасному ринку представлено як комерційні рішення від відомих виробників, так і саморобні системи, створені ентузіастами на базі мікроконтролерів, таких як Arduino, Raspberry Pi чи ESP32. Огляд існуючих систем дозволяє визначити їхні сильні та слабкі сторони, а також обґрунтувати доцільність розробки нової системи на базі ESP32.

Комерційні системи, такі як продукція компаній ZooMed, Echo Terra та Microclimate, є популярними серед власників тераріумів завдяки їх надійності та простоті використання. Наприклад, пристрій ZooMed HygroTherm забезпечує контроль температури та вологості, дозволяючи підключати нагрівачі, зволожувачі та вентилятори. Цей контролер підтримує задану температуру в межах 10–49°C і вологість від 15 до 95%, а також має вбудований таймер для імітації денних і нічних циклів. Проте система не підтримує віддалений моніторинг і має обмежену гнучкість у налаштуваннях, що ускладнює адаптацію до специфічних потреб тварин.

Інший приклад – Echo Terra Thermostat з серії 3000, який дозволяє регулювати температуру з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$ і має два виходи для підключення нагрівачів або охолоджувачів. Деякі моделі підтримують керування освітленням, зокрема UVB-лампами, для створення фотоперіоду. Однак такі системи часто дорогі (ціна становить 50–150 доларів США залежно від моделі), а їх функціонал обмежений базовими налаштуваннями без можливості інтеграції з іншими пристроями чи створення користувацького інтерфейсу.

Компанія Microclimate пропонує більш просунуті рішення, такі як контролер Microclimate Evo Connected, який забезпечує віддалений моніторинг і керування через мобільний додаток. Ця система підтримує кілька зон нагріву, регулювання

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вологості та освітлення, а також має функцію сповіщень про критичні відхилення параметрів. Незважаючи на розширений функціонал, висока вартість (понад 200 доларів США) та складність налаштування роблять її менш доступною для приватних користувачів. Крім того, система є закритою, що обмежує можливості модифікації чи інтеграції з нестандартними сенсорами.

Розвиток мікроконтролерних платформ, таких як Arduino, Raspberry Pi та ESP32, сприяв появі саморобних систем контролю мікроклімату, які часто є більш доступними та гнучкими порівняно з комерційними аналогами. Наприклад, проект ESP32 Powered Smart Terrarium, описаний на платформі Instructables, використовує ESP32 для керування температурою, вологістю та освітленням у тераріумі. Система включає сенсор DHT22 для вимірювання температури та вологості, світлодіодну стрічку WS2812B для імітації фотоперіоду та OLED-дисплей для відображення параметрів. Завдяки підтримці Wi-Fi, користувач може моніторити дані через веб-інтерфейс. Основною перевагою є низька вартість (близько 20–30 доларів США) та відкритий код, що дозволяє модифікувати систему. Однак проект потребує значних знань у програмуванні та електроніці, а також не включає функцію автоматичного регулювання вентиляції.

Інший приклад – система terraesp, доступна на GitHub, яка базується на ESP32 і підтримує керування кількома зонами нагріву, зволожувачем і освітленням. Система використовує сенсори DHT22 і BH1750 (для вимірювання освітленості), а також реле для керування виконавчими пристроями. Користувач може налаштувати параметри через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Перевагою є можливість інтеграції з платформами автоматизації, такими як Home Assistant, але система має обмежену документацію, що ускладнює її відтворення для новачків.

Проект Smart Terrarium Run By ESP32, описаний на Hackaday, демонструє використання ESP32 для керування ультразвуковим зволожувачем, нагрівачем і світлодіодами. Система підтримує віддалений доступ через Wi-Fi і сповіщення про відхилення параметрів. Однак вона не включає підтримку UVB-освітлення, що є

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичним для деяких видів рептилій, а також має обмежену точність регулювання вологості через використання лише одного сенсора.

Для порівняння комерційних і саморобних систем розглянемо їх за ключовими параметрами: підтримувані функції, точність регулювання, можливості віддаленого моніторингу, гнучкість налаштувань, вартість і складність реалізації. Таблиця 1.1 узагальнює характеристики п'яти систем, включаючи три комерційні (ZooMed HygroTherm, Echo Terra Thermostat, Microclimate Evo Connected) та дві саморобні (ESP32 Powered Smart Terrarium, terraesр).

Таблиця 1.1 – Порівняння існуючих систем контролю мікроклімату в тераріумах

Система	Температура	Вологість	Освітлення	Вентиляція	Віддалене керування	Гнучкість
ZooMed	±1°C	±5%	Таймер	Нема	Ні	Низька
HydroTh. even	±1°C	Нема	UVB, таймер	Нема	Ні	Середня
Microclimate Evo Connected	±0.5°C	±3%	Повне	Так	Так	Висока
ESP32 Powered Smart Terrarium	±1°C	±5%	LED, таймер	Так	Так	Висока
terrasen	±1°C	±4%	LED, UVB	Так	Так	Висока

Аналіз таблиці показує, що комерційні системи, такі як ZooMed HygroTherm і Echo Terra Thermostat, є простими у використанні, але мають обмежений функціонал і не підтримують віддалений моніторинг. Microclimate Evo Connected пропонує розширений функціонал, але її висока вартість і закрита архітектура

обмежують доступність. Саморобні системи на базі ESP32 є економічно вигідними та гнучкими, але потребують значних зусиль для реалізації та налаштування.

Комерційні системи вирізняються надійністю, простотою встановлення та гарантійним обслуговуванням, але їхні недоліки включають високу вартість, обмежену гнучкість і відсутність підтримки віддаленого доступу в більшості моделей. Наприклад, ZooMed HygroTherm не дозволяє користувачу змінювати алгоритми управління чи додавати нові сенсори, що робить його менш універсальним. Microclimate Evo Connected є винятком, але її ціна робить її недоступною для багатьох користувачів.

Саморобні системи, такі як ESP32 Powered Smart Terrarium і terraesp, мають переваги у вигляді низької вартості, відкритої архітектури та можливості інтеграції з сучасними технологіями, такими як Wi-Fi і мобільні додатки. Проте вони мають недоліки, пов'язані з необхідністю глибоких знань у програмуванні та електроніці, а також потенційною нестабільністю через відсутність професійного тестування. Крім того, більшість саморобних систем не підтримують регулювання вентиляції, що є важливим для тропічних видів.

Огляд існуючих систем контролю мікроклімату в тераріумах показав, що комерційні рішення, такі як ZooMed HygroTherm, Echo Terra Thermostat і Microclimate Evo Connected, забезпечують базовий або розширений функціонал, але мають високу вартість і обмежену гнучкість. Саморобні системи на базі ESP32, такі як ESP32 Powered Smart Terrarium і terraesp, є економічно вигідними та підтримують віддалений моніторинг, але потребують значних зусиль для реалізації. Жодна з розглянутих систем не поєднує низьку вартість, високу гнучкість, повний набір функцій (температура, вологість, освітлення, вентиляція) і простоту використання, що обґрунтовує необхідність розробки нової системи на базі ESP32. Така система може усунути недоліки існуючих рішень, пропонуючи доступне, гнучке та автоматизоване рішення для контролю мікроклімату в тераріумах.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Вивчення можливостей мікроконтролера ESP32 для реалізації системи

Мікроконтролер ESP32, розроблений компанією Espressif Systems, є універсальною платформою для створення вбудованих систем завдяки своїм технічним характеристикам, підтримці бездротових технологій і доступній ціні. Його можливості роблять його перспективним вибором для реалізації системи контролю мікроклімату в тераріумах, яка вимагає точного збору даних із сенсорів, керування виконавчими пристроями, віддаленого моніторингу та гнучкого програмування. У цьому підпункті розглянуто технічні характеристики ESP32, його апаратні та програмні можливості, а також переваги й обмеження для використання в системі контролю мікроклімату.

ESP32 базується на двоядерному 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує високу обчислювальну потужність для обробки даних із кількох сенсорів і виконання складних алгоритмів управління. Мікроконтролер має 520 КБ оперативної пам'яті SRAM і підтримує підключення зовнішньої флеш-пам'яті об'ємом до 16 МБ, що дозволяє зберігати програми, конфігурації та журнали даних. Наявність двох ядер дає змогу розподіляти завдання, наприклад, одне ядро може обробляти дані сенсорів, а інше – керувати Wi-Fi-з'єднанням.

ESP32 оснащений вбудованими модулями Wi-Fi (802.11 b/g/n) і Bluetooth (v4.2 BR/EDR і BLE), що забезпечує бездротове підключення до мережі для віддаленого моніторингу та керування системою через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Це особливо важливо для тераріумів, де власник може бути відсутнім і потребує сповіщень про відхилення параметрів мікроклімату, таких як температура чи вологість.

Мікроконтролер має 34 програмовані піни GPIO, які підтримують різні інтерфейси, зокрема I2C, SPI, UART і PWM. Це дозволяє підключати широкий спектр сенсорів (наприклад, DHT22 для температури та вологості, BH1750 для освітленості) і виконавчих пристроїв (реле, світлодіодні стрічки WS2812B,

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зволожувачі). Наявність 12-бітного аналогово-цифрового перетворювача (ADC) забезпечує точне зчитування аналогових сигналів, хоча для високоточних сенсорів, таких як DHT22, частіше використовується цифровий інтерфейс.

ESP32 підтримує низьке енергоспоживання завдяки режимам Deep Sleep (споживання до 5 мкА) і Light Sleep, що є важливим для енергоефективності системи, особливо якщо вона працює від акумулятора. Наприклад, у режимі Deep Sleep мікроконтролер може періодично прокидатися для зчитування даних із сенсорів, що знижує загальне енергоспоживання.

Для реалізації системи контролю мікроклімату в тераріумах ESP32 пропонує кілька ключових апаратних можливостей. По-перше, підтримка інтерфейсів I2C і SPI дозволяє підключати сенсори температури (DHT22), вологості (AM2302) і освітленості (BH1750) із високою точністю. Наприклад, сенсор DHT22 забезпечує вимірювання температури з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ і вологості $\pm 2-5\%$, а його цифровий інтерфейс сумісний із пінами GPIO ESP32.

По-друге, піни PWM дають змогу керувати виконавчими пристроями, такими як нагрівачі, вентилятори чи світлодіодні стрічки. Наприклад, світлодіодна стрічка WS2812B, яка використовується для імітації фотоперіоду, керується через єдиний пін GPIO за допомогою протоколу однопровідного зв'язку, що спрощує підключення та зменшує кількість необхідних проводів.

По-третє, вбудовані модулі Wi-Fi і Bluetooth дозволяють реалізувати віддалений моніторинг і керування. Наприклад, ESP32 може виступати як веб-сервер, надаючи доступ до даних про температуру, вологість і стан освітлення через браузер. Альтернативно, Bluetooth LE може використовуватися для сполучення з мобільним додатком для локального керування. Проект ESP32 based terrarium controller, описаний на Reddit, демонструє реалізацію веб-інтерфейсу для моніторингу параметрів мікроклімату, що підтверджує практичність таких рішень.

Крім того, ESP32 підтримує підключення дисплеїв (наприклад, OLED SSD1306 через I2C) для локального відображення параметрів, що є корисним для користувачів, які не покладаються на віддалений доступ. Наявність кількох пінів

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

GPIO дозволяє одночасно керувати кількома зонами нагріву, зволожувачем і вентилятором, що відповідає вимогам до створення температурного градієнта та регулювання вологості в тераріумах.

ESP32 підтримує кілька середовищ розробки, зокрема Arduino IDE, PlatformIO, MicroPython і ESP-IDF (власний фреймворк Espressif). Для системи контролю мікроклімату Arduino IDE є найпоширенішим вибором завдяки простоті використання, великій кількості бібліотек і активній спільноті. Наприклад, бібліотека Adafruit_DHT забезпечує зручну роботу з сенсором DHT22, а бібліотека FastLED – керування світлодіодними стрічками WS2812B.

Програмування ESP32 дозволяє реалізувати складні алгоритми управління мікрокліматом. Наприклад, система може періодично зчитувати дані з сенсора DHT22, порівнювати їх із заданими порогоми та вмикати/вимикати нагрівач чи зволожувач через реле. Використання багатозадачності (завдяки двоядерному процесору) дає змогу одночасно обробляти дані сенсорів, оновлювати веб-інтерфейс і керувати виконавчими пристроями. Проект terraesp на GitHub демонструє використання ESP32 для створення системи з веб-інтерфейсом, яка підтримує кілька сенсорів і виконавчих пристроїв, що підтверджує гнучкість програмного забезпечення.

Wi-Fi-модуль ESP32 дозволяє інтегрувати систему з платформами автоматизації, такими як Home Assistant, для створення сповіщень або автоматичних сценаріїв. Наприклад, якщо температура в тераріумі падає нижче 24°C, система може надіслати повідомлення користувачу через Telegram або автоматично увімкнути нагрівач.

Перевагами мікроконтролера ESP32 для системи контролю мікроклімату є його висока продуктивність завдяки двоядерному процесору з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує швидку обробку даних і підтримку багатозадачності. Завдяки вбудованим модулям Wi-Fi та Bluetooth він дозволяє організувати віддалений моніторинг і керування без потреби в додатковому обладнанні. Підтримка інтерфейсів I2C, SPI, UART і PWM забезпечує широку сумісність із

різноманітними сенсорами та виконавчими пристроями, що робить систему гнучкою у налаштуванні. Додатковою перевагою є доступна вартість ESP32 – приблизно 5–10 доларів США, що суттєво вигідніше за більшість комерційних рішень. Завдяки відкритій екосистемі, наявності великої кількості бібліотек і прикладів з відкритим кодом, цей контролер також значно спрощує розробку та адаптацію системи під конкретні потреби.

Незважаючи на численні переваги, ESP32 має певні обмеження. По-перше, 12-бітний ADC має нелінійність і шум, що може впливати на точність аналогових вимірювань. Для високоточних сенсорів, таких як DHT22, рекомендується використовувати цифрові інтерфейси. По-друге, Wi-Fi-з'єднання може бути нестабільним у середовищах із сильними електромагнітними перешкодами, що вимагає ретельного тестування системи. По-третє, для новачків програмування ESP32 може бути складним через необхідність налаштування середовища розробки та роботи з бібліотеками. Однак використання Arduino IDE значно спрощує цей процес завдяки готовим прикладам коду.

Ще одним обмеженням є енергоспоживання в активному режимі (до 1.1 Вт із увімкненим Wi-Fi), що може бути проблематичним для систем із батарейним живленням. Використання режимів Deep Sleep і оптимізація коду дозволяють зменшити споживання, але потребують додаткових зусиль під час розробки.

Вивчення можливостей мікроконтролера ESP32 показало, що він є оптимальною платформою для реалізації системи контролю мікроклімату в тераріумах завдяки високій продуктивності, підтримці бездротових технологій, гнучкості підключення та низькій вартості. ESP32 дозволяє підключати сенсори (DHT22, BH1750), керувати виконавчими пристроями (нагрівачі, світлодіодні стрічки) і реалізувати віддалений моніторинг через Wi-Fi або Bluetooth. Програмні можливості, зокрема використання Arduino IDE і бібліотек, спрощують розробку складних алгоритмів управління. Обмеження, такі як нелінійність ADC і енергоспоживання, можна компенсувати правильним вибором компонентів і

оптимізацією коду. Таким чином, ESP32 відповідає вимогам до створення економічно вигідної, гнучкої та автоматизованої системи контролю мікроклімату.

1.4 Аналіз сенсорів і модулів для вимірювання температури, вологості та освітлення

Система контролю мікроклімату в тераріумах потребує точного вимірювання температури, вологості та освітлення для забезпечення оптимальних умов утримання тварин. Вибір сенсорів і модулів для цих параметрів є ключовим етапом розробки, оскільки від їхньої точності, надійності, сумісності з мікроконтролером ESP32 і вартості залежить ефективність системи. У цьому підпункті проаналізовано популярні сенсори температури, вологості та освітлення, їхні технічні характеристики, переваги, недоліки та придатність для використання в системі контролю мікроклімату.

Для вимірювання температури та вологості в тераріумах найчастіше використовуються комбіновані сенсори, які забезпечують одночасне зчитування обох параметрів. Найпоширенішими є сенсори серії DHT (DHT11, DHT22/AM2302) і BME280, які сумісні з ESP32 і широко застосовуються в автоматизованих системах.

DHT11 це бюджетний цифровий сенсор, який вимірює температуру в діапазоні 0–50°C із точністю $\pm 2^\circ\text{C}$ і вологість у діапазоні 20–80% із точністю $\pm 5\%$. Сенсор використовує однопровідний цифровий інтерфейс, що спрощує підключення до ESP32 (потрібен лише один пін GPIO). Його перевагами є низька ціна (близько 1–2 доларів США) і простота використання завдяки бібліотекам, таким як Adafruit_DHT для Arduino IDE. Однак DHT11 має низьку точність і повільний час відгуку (близько 2 секунд), що робить його менш придатним для тропічних тераріумів, де потрібен точний контроль вологості.

DHT22 (AM2302) є більш просунутим сенсором порівняно з DHT11. Він вимірює температуру в діапазоні -40–80°C із точністю $\pm 0.5^\circ\text{C}$ і вологість у діапазоні

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

0–100% із точністю $\pm 2\text{--}5\%$. Як і DHT11, DHT22 використовує однопровідний інтерфейс, що забезпечує легке підключення до ESP32. Його перевагами є вища точність, ширший діапазон вимірювань і краща стабільність у вологих умовах, що робить його ідеальним для тропічних тераріумів, таких як для червонооких деревних жаб чи королівських пітонів. Недоліки включають вищу ціну (3–5 доларів США) і чутливість до перепадів напруги, що вимагає стабільного живлення на рівні 3.3–5 В.

BME280 це багатофункціональний сенсор, який вимірює температуру ($-40\text{--}85^\circ\text{C}$, $\pm 1^\circ\text{C}$), вологість (0–100%, $\pm 3\%$) і атмосферний тиск (300–1100 гПа). Він підключається до ESP32 через інтерфейси I2C або SPI, що дозволяє одночасно використовувати кілька сенсорів на одній шині. BME280 вирізняється високою точністю, швидким часом відгуку (близько 1 секунди) і компактними розмірами. Бібліотека Adafruit_BME280 для Arduino IDE спрощує роботу з сенсором. Основним недоліком є вища ціна (5–10 доларів США) і складніша процедура калібрування порівняно з DHT22. Крім того, вимірювання тиску не є необхідним для тераріумів, що робить BME280 менш економічно виправданим для цієї задачі.

Для системи контролю мікроклімату в тераріумах DHT22 є оптимальним вибором завдяки високій точності, достатньому діапазону вимірювань і доступній ціні. Його цифровий інтерфейс і підтримка бібліотеками Arduino IDE забезпечують легку інтеграцію з ESP32, а точність $\pm 0.5^\circ\text{C}$ для температури та $\pm 2\text{--}5\%$ для вологості відповідає вимогам більшості видів тварин, таких як бородаті агами чи павуки-птахоїди.

Освітлення в тераріумах відіграє важливу роль для імітації фотоперіоду, синтезу вітаміну D3 у рептилій і створення комфортного середовища. Для вимірювання рівня освітленості використовуються сенсори, такі як BH1750, TSL2561 і фоторезистори, які дозволяють контролювати інтенсивність світла та налаштовувати фотоперіод.

BH1750 це цифровий сенсор освітленості, який вимірює інтенсивність світла в діапазоні 0–65535 люкс із роздільною здатністю 1 люкс. Він підключається до

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ESP32 через інтерфейс I2C, що дозволяє інтегрувати його разом із іншими сенсорами, такими як BME280. BH1750 вирізняється високою точністю, низьким енергоспоживанням (близько 0.12 мА) і підтримкою бібліотеки Adafruit_BH1750 для Arduino IDE. Його ціна становить 2–4 долари США, що робить його доступним для використання в системах контролю мікроклімату. BH1750 підходить для моніторингу як природного, так і штучного освітлення, наприклад, для перевірки інтенсивності UVB-ламп чи світлодіодних стрічок у тераріумах для бородатих агам.

TSL2561 це ще один цифровий сенсор освітленості з діапазоном вимірювань 0.1–40000 люкс і роздільною здатністю до 0.1 люкс. Він також використовує інтерфейс I2C і підтримує бібліотеки для Arduino IDE, такі як Adafruit_TSL2561. TSL2561 має вищу чутливість у низькоосвітлених умовах порівняно з BH1750, що може бути корисним для нічних видів, таких як павуки-птахоїди. Однак його ціна (5–7 доларів США) є вищою, а складніша процедура калібрування може ускладнити використання для новачків.

Фоторезистор (LDR) це аналоговий сенсор, який змінює опір залежно від інтенсивності світла. Він є найдешевшим варіантом (менше 1 долара США) і легко підключається до ESP32 через аналоговий пін ADC. Однак фоторезистори мають низьку точність, сильну залежність від типу освітлення (наприклад, лампи розжарювання чи LED) і потребують додаткового калібрування. Їхня чутливість також знижується в умовах високої вологості, що є проблематичним для тропічних тераріумів.

Для системи контролю мікроклімату BH1750 є кращим вибором завдяки високій точності, простоті підключення через I2C і доступній ціні. Він дозволяє точно вимірювати інтенсивність освітлення для налаштування фотоперіоду та перевірки роботи світлодіодних стрічок чи UVB-ламп, що відповідає вимогам до автоматизації тераріумів.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприклад, DHT22 підключається до одного піна GPIO, а BH1750 – до шини I2C, що дозволяє використовувати їх одночасно без конфліктів. Бібліотеки для Arduino IDE, такі як Adafruit_DHT, Adafruit_BME280 і Adafruit_BH1750, забезпечують готові функції для зчитування даних, що спрощує програмування. Проект ESP32 with DHT11/DHT22 Temperature and Humidity Sensor демонструє успішну інтеграцію DHT22 з ESP32, де сенсор зчитує дані кожні 2 секунди та передає їх на веб-сервер.

Для забезпечення надійності в умовах тераріуму (висока вологість, перепади температури) сенсори, такі як DHT22 і BH1750, можуть потребувати захисту від конденсату, наприклад, використання герметичних корпусів або гідроізоляційних покриттів. Крім того, для точного вимірювання температури в різних зонах тераріуму (зона прогріву та прохолодна зона) можна використовувати два сенсори DHT22, підключені до різних пінів GPIO.

Аналіз сенсорів і модулів для вимірювання температури, вологості та освітлення показав, що DHT22 є оптимальним вибором для вимірювання температури та вологості завдяки високій точності ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 2-5\%$), широкому діапазону вимірювань і доступній ціні (3–5 доларів США). Для вимірювання освітленості BH1750 є кращим через точність (± 1 люкс), простий інтерфейс I2C і низьку ціну (2–4 долари США). Обидва сенсори легко інтегруються з ESP32 через цифрові інтерфейси та підтримуються бібліотеками Arduino IDE, що спрощує їх використання в системі контролю мікроклімату. Інші сенсори, такі як DHT11 і фоторезистори, є менш точними, а BME280 і TSL2561 – дорогими та надлишковими для задачі. Використання DHT22 і BH1750 забезпечує надійне вимірювання параметрів мікроклімату, необхідних для автоматизації тераріумів.

1.5 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз вимог і технологій для створення системи контролю мікроклімату в тераріумах дозволив визначити ключові аспекти, необхідні для

					КвРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розробки ефективного рішення на базі мікроконтролера ESP32. Аналіз потреб мікроклімату для різних видів тварин показав, що температура, вологість, освітлення та вентиляція є критично важливими параметрами, які варіюються залежно від виду. Наприклад, пустельні рептилії, такі як бородаті агами, потребують температурного градієнта 25–40°C і низької вологості (30–40%), тоді як тропічні амфібії, як-от червоноокі деревні жаби, потребують стабільної температури 24–28°C і високої вологості (70–90%). Освітлення, зокрема UVB, є необхідним для синтезу вітаміну D3 у рептилій, а вентиляція забезпечує якість повітря без значних втрат вологості. Система повинна бути гнучкою, автоматизованою та підтримувати віддалений моніторинг для спрощення догляду за тваринами.

Огляд існуючих систем контролю мікроклімату виявив, що комерційні рішення, такі як ZooMed HygroTherm і Microclimate Evo Connected, забезпечують базовий або розширений функціонал, але мають високу вартість (50–300 доларів США) і обмежену гнучкість через закриту архітектуру. Саморобні системи на базі ESP32, як-от ESP32 Powered Smart Terrarium і terraesp, є економічно вигідними (20–50 доларів США) і підтримують віддалений доступ, але потребують знань у програмуванні та електроніці. Жодна з розглянутих систем не поєднує низьку ціну, повний набір функцій (температура, вологість, освітлення, вентиляція) і простоту використання, що обґрунтовує розробку нової системи.

Вивчення можливостей мікроконтролера ESP32 показало, що він є оптимальною платформою завдяки двоядерному процесору (до 240 МГц), підтримці Wi-Fi і Bluetooth, 34 пінам GPIO та низькому енергоспоживанню (до 5 мкА в режимі Deep Sleep). ESP32 дозволяє підключати сенсори через інтерфейси I2C, SPI і PWM, керувати виконавчими пристроями та реалізовувати віддалений моніторинг через веб-інтерфейс. Обмеження, такі як нелінійність ADC і енергоспоживання в активному режимі, можна компенсувати оптимізацією коду та вибором цифрових сенсорів.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз сенсорів і модулів показав, що DHT22 є оптимальним для вимірювання температури ($-40-80^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) і вологості ($0-100\%$, $\pm 2-5\%$) завдяки високій точності та доступній ціні (3–5 доларів США). Для вимірювання освітленості BH1750 ($0-65535$ люкс, ± 1 люкс) є кращим через точність, інтерфейс I2C і ціну (2–4 долари США). Обидва сенсори легко інтегруються з ESP32 через бібліотеки Arduino IDE, що спрощує розробку системи.

Розробка системи на базі ESP32 із використанням сенсорів DHT22 і BH1750 є обґрунтованою, оскільки дозволяє створити економічно вигідне, гнучке та автоматизоване рішення для контролю мікроклімату в тераріумах, яке усуває недоліки комерційних і саморобних аналогів. Отримані результати створюють основу для подальшого проектування, реалізації та тестування системи.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ

2.1 Визначення функціональних вимог до системи

Розробка системи контролю мікроклімату в тераріумах на базі мікроконтролера ESP32 потребує чіткого визначення функціональних вимог, які забезпечать її ефективність, надійність і зручність використання. Функціональні вимоги визначають, які завдання система повинна виконувати, щоб відповідати потребам різних видів тварин, таких як рептилії, амфібії чи павукоподібні, а також очікуванням користувача щодо автоматизації та моніторингу. Ці вимоги базуються на аналізі потреб мікроклімату, проведеному в розділі 1, та можливостях ESP32, що дозволяють реалізувати гнучке та економічно вигідне рішення .

Система контролю мікроклімату в тераріумах повинна забезпечувати автоматизоване регулювання ключових параметрів – температури, вологості, освітлення та вентиляції – з урахуванням специфічних потреб різних видів тварин. Наприклад, для бородатих агам необхідний температурний градієнт 25–40°C і UVB-освітлення, тоді як для червонооких деревних жаб потрібна висока вологість 70–90% і стабільна температура 24–28°C . Крім того, система має бути зручною для користувача, підтримувати віддалений доступ і забезпечувати захист від збоїв, таких як перегрів або вихід сенсорів із ладу.

Функціональні вимоги поділяються на кілька категорій: вимірювання параметрів, регулювання мікроклімату, моніторинг і керування, а також безпека та енергоефективність. Кожна категорія включає конкретні завдання, які система повинна виконувати для досягнення поставленої мети.

Система контролю мікроклімату повинна забезпечувати точне вимірювання параметрів навколишнього середовища, зокрема температури, вологості та рівня освітленості, у реальному часі. Для цього використовуються спеціалізовані сенсори: DHT22 для фіксації температури з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ та вологості з точністю $\pm 2\text{--}5\%$, а також BH1750 для вимірювання освітленості з похибкою близько ± 1

					КвРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

люкс. Частота зчитування даних повинна становити не менше одного разу на дві секунди, щоб своєчасно виявляти будь-які відхилення від норми. Наприклад, для підтримання температурного градієнта у тераріумі необхідно вимірювати температуру як у зоні прогріву, так і в прохолодній зоні, що передбачає використання щонайменше двох датчиків температури.

Важливою функцією є автоматичне регулювання мікроклімату на основі заданих користувачем параметрів. Так, при зниженні температури нижче 24°C для таких тварин, як королівський пітон, система має вмикати нагрівальний елемент, а при зменшенні вологості нижче 70% – активувати зволожувач, що особливо актуально для тропічних видів. Освітлення повинно працювати відповідно до програмованого фотоперіоду (наприклад, 12–14 годин світла), а також мати можливість змінювати інтенсивність. Для цього використовуються світлодіодні стрічки типу WS2812B. Система вентиляції також відіграє важливу роль, забезпечуючи рух повітря без істотних втрат вологості, і керується вентиляторами.

Для зручності та ефективності експлуатації система має забезпечувати постійний моніторинг стану середовища. Користувач повинен мати змогу переглядати поточні параметри мікроклімату як на локальному дисплеї (наприклад, OLED SSD1306), так і через веб-інтерфейс, доступний за допомогою Wi-Fi-з'єднання. Завдяки цьому інтерфейсу можна задавати цільові значення температури, вологості, тривалості освітлення, а також отримувати повідомлення про критичні відхилення. Наприклад, якщо температура перевищує 40°C або вологість опускається нижче 50%. Для реалізації такого функціоналу використовується модуль ESP32, який підтримує як локальний веб-сервер, так і інтеграцію з платформами типу Home Assistant.

Не менш важливою складовою є безпека та енергоефективність системи. Вона повинна мати захист від можливих збоїв, зокрема перегріву нагрівача, короткого замикання або відмови сенсорів. У випадках, коли температура перевищує 45°C, система повинна автоматично вимикати нагрівальний елемент та інформувати користувача про проблему. Для зниження енергоспоживання

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінець таблиці 2.1

7	Регулювання вентиляції	Активація вентиляторів для підтримання якості повітря	Частота вмикання 1 раз/30 хв, збереження вологості в заданому діапазоні
8	Локальний моніторинг	Відображення параметрів на OLED-дисплеї	Оновлення даних кожні 2 с, відображення температури, вологості, освітленості
9	Віддалений моніторинг і керування	Доступ до параметрів і налаштувань через веб-інтерфейс	Доступ через Wi-Fi, оновлення даних кожні 5 с, підтримка мобільних пристроїв
10	Сповіщення про відхилення	Надсилання повідомлень при критичних змінах параметрів	Сповіщення через веб-інтерфейс або додаток при відхиленнях $>5^{\circ}\text{C}$ або $>10\%$ вологості
11	Захист від збоїв	Відключення пристроїв при перегріві чи несправності сенсорів	Автоматичне відключення при $T > 45^{\circ}\text{C}$, виявлення несправності сенсорів
12	Енергоефективність	Зменшення енергоспоживання в режимі очікування	Споживання <5 мкА в режимі Deep Sleep, періодичне зчитування даних кожні 10 с

Примітка: Критерії виконання базуються на технічних характеристиках сенсорів DHT22, BH1750 та можливостях ESP32.

Функціональні вимоги враховують потреби різних видів тварин, визначені в підпункті 1.1. Наприклад, підтримка температурного градієнта (вимога №4) відповідає вимогам бородатих агам, а висока точність регулювання вологості (вимога №5) – потребам тропічних амфібій . Використання сенсорів DHT22 і BH1750 забезпечує точне вимірювання параметрів (вимоги №1–3), а Wi-Fi-модуль ESP32 дозволяє реалізувати віддалений моніторинг і керування (вимоги №9–10) .

Регулювання освітлення (вимога №6) передбачає використання світлодіодних стрічок WS2812B, які підтримують програмоване керування інтенсивністю та імітацію природних циклів, що є важливим для фотоперіоду рептилій . Механізми безпеки (вимога №11) включають програмні алгоритми для виявлення несправностей сенсорів і апаратні запобіжники для захисту від перевантажень, що підвищує надійність системи .

Енергоефективність (вимога №12) досягається завдяки режиму Deep Sleep ESP32, який дозволяє системі працювати від акумулятора в разі відключення основного живлення. Це особливо актуально для користувачів, які прагнуть мінімізувати витрати електроенергії .

Визначено функціональні вимоги до системи контролю мікроклімату в тераріумах, які охоплюють вимірювання температури, вологості та освітленості, автоматичне регулювання цих параметрів, локальний і віддалений моніторинг, а також забезпечення безпеки та енергоефективності. Система повинна підтримувати температурний градієнт (20–40°C), вологість (30–90%), програмований фотоперіод і регулювання вентиляції, що відповідає потребам різних видів тварин. Використання ESP32, сенсорів DHT22 і BH1750, а також світлодіодних стрічок WS2812B дозволяє реалізувати ці вимоги економічно вигідно та з високою гнучкістю. Таблиця 2.1 деталізує вимоги та критерії їх виконання, створюючи основу для подальшого проектування апаратної та програмної частин системи.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Розробка функціональної та структурної схем системи

Розробка функціональної та структурної схем системи контролю мікроклімату в тераріумах є ключовим етапом, який визначає взаємозв'язки між компонентами та принципи їхньої роботи. Функціональна схема відображає логіку взаємодії між сенсорами, мікроконтролером, виконавчими пристроями та інтерфейсом користувача, тоді як структурна схема деталізує фізичне підключення компонентів до ESP32. Ці схеми базуються на функціональних вимогах, визначених у підпункті 2.1, та враховують можливості ESP32 і вибраних сенсорів (DHT22, BH1750), виконавчих пристроїв (нагрівач, зволожувач, світлодіодна стрічка WS2812B, вентилятор) і дисплея OLED SSD1306 .

Функціональна схема системи контролю мікроклімату описує основні блоки та їхню взаємодію для виконання задач вимірювання, регулювання, моніторингу та забезпечення безпеки. Система складається з декількох функціональних блоків.

Описана система складається з кількох взаємопов'язаних функціональних блоків, кожен з яких виконує свою ключову роль у забезпеченні стабільного мікроклімату в тераріумі.

Блок вимірювання параметрів відповідає за фіксацію основних фізичних характеристик середовища. Для цього використовуються два сенсори DHT22, що встановлені в зоні прогріву та в прохолодній зоні тераріуму. Вони зчитують температуру з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ та вологість із похибкою $\pm 2-5\%$, оновлюючи дані кожні 2 секунди через однопровідний інтерфейс. Освітленість вимірюється сенсором BH1750 у діапазоні 0–65535 люкс з точністю ± 1 люкс, що дозволяє точно контролювати інтенсивність освітлення та тривалість фотоперіоду. Усі отримані дані надсилаються на мікроконтролер ESP32 для подальшої обробки.

У блоці обробки даних мікроконтролер ESP32, оснащений двоядерним процесором із частотою до 240 МГц, аналізує показники з сенсорів і порівнює їх із заданими користувачем параметрами, наприклад: температурою в межах $25-40^{\circ}\text{C}$ чи вологістю від 30% до 90%. На основі аналізу система приймає рішення щодо

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

активації відповідних виконавчих пристроїв. Висока продуктивність ESP32 дозволяє виконувати ці операції швидко і водночас підтримувати багатозадачність.

Блок керування виконавчими пристроями реалізує прямий контроль над обладнанням, яке впливає на мікроклімат. Нагрівач, підключений через реле, вмикається для підтримки температури в зоні прогріву, наприклад, на рівні 35–40°C, що важливо для таких тварин, як бородаті агами. У разі падіння вологості нижче порогового значення (наприклад, 70%) активується ультразвуковий зволожувач. Світлодіодна стрічка WS2812B, керована через пін GPIO, дозволяє створити програмований фотоперіод тривалістю 12–14 годин, а також змінювати інтенсивність світла для імітації природних умов. Для забезпечення вентиляції повітря вмикається вентилятор, зазвичай раз на 30 хвилин, що дозволяє зберігати якість повітря без надмірної втрати вологості.

Моніторинг та взаємодія з користувачем реалізуються через окремий блок. Дисплей OLED SSD1306, підключений по інтерфейсу I2C, показує актуальні значення температури, вологості та освітленості з частотою оновлення кожні 2 секунди. Водночас Wi-Fi-функціональність ESP32 забезпечує створення веб-інтерфейсу, який дозволяє користувачу віддалено переглядати параметри, змінювати цільові значення, а також отримувати сповіщення про критичні ситуації, наприклад, коли температура перевищує 45°C.

Останній важливий компонент – блок безпеки. Система оснащена програмними алгоритмами для виявлення відмов сенсорів, зокрема, коли DHT22 перестає відповідати. При виявленні критичних відхилень або потенційно небезпечних ситуацій, таких як перегрів чи коротке замикання, спрацьовують апаратні запобіжники та реле, що автоматично відключають нагрівач. Це гарантує безпеку як для тварин, так і для всієї системи в цілому.

Функціональна схема системи зображена на рисунку 2.1, де показано взаємодію між блоками: сенсори передають дані до ESP32, який обробляє їх, керує виконавчими пристроями та виводить інформацію на дисплей і веб-інтерфейс.

Схема враховує багатозадачність ESP32, де одне ядро обробляє дані сенсорів, а інше забезпечує роботу веб-сервера .

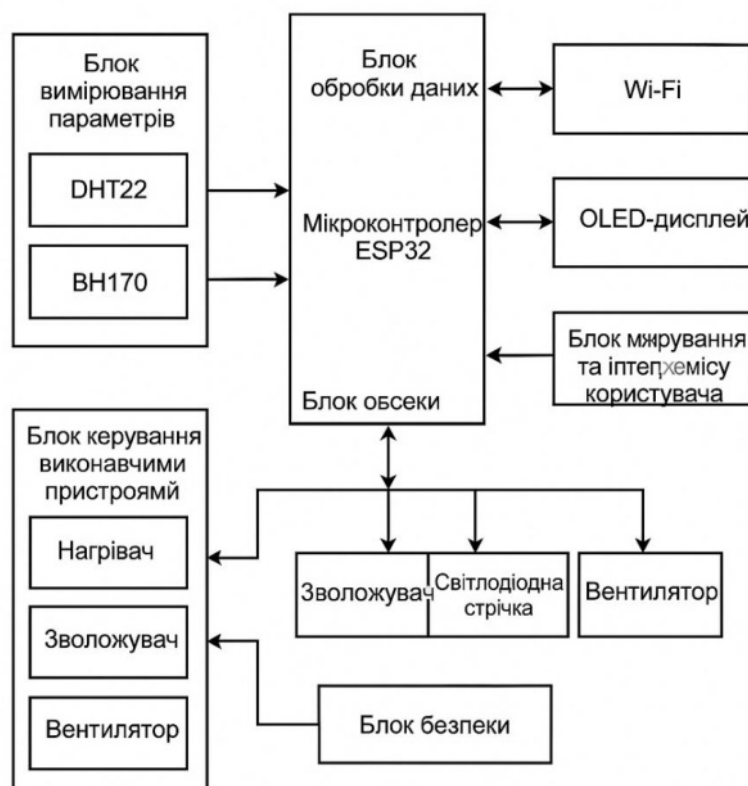


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи

Структурна схема деталізує фізичне підключення компонентів до мікроконтролера ESP32, включаючи піни GPIO, джерела живлення та інтерфейси зв'язку. Система базується на модулі ESP32-WROOM-32, який має 34 програмовані піни GPIO, підтримку I2C, SPI, PWM і вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth. Структурна схема також включає різні компоненти.

У системі догляду за тваринами на базі ESP32 мікроконтролер відіграє ключову роль, забезпечуючи не лише обробку даних і керування пристроями, а й організацію зв'язку з користувачем. Живлення ESP32 подається від стабільного джерела напругою 3.3 В або 5 В, що може здійснюватися через USB або зовнішній блок живлення (наприклад, адаптер на 5 В, 2 А).

Для вимірювання параметрів мікроклімату використовуються кілька сенсорів. Сенсори DHT22, розташовані в зоні прогріву та прохолодній зоні, підключаються відповідно до пінів GPIO 4 і GPIO 5 через однопровідний інтерфейс. Кожен з них має резистор підтягування на 4.7 кОм між лінією даних і живленням, що забезпечує стабільну роботу. Сенсор освітленості BH1750 працює по інтерфейсу I2C, використовуючи піни GPIO 21 (SDA) та GPIO 22 (SCL), і живиться від 3.3 В. Ці ж піни також використовуються для підключення OLED-дисплея SSD1306 роздільною здатністю 128x64 пікселі, який відображає поточні показники.

Керування виконавчими пристроями здійснюється через окремі GPIO-піни ESP32 із застосуванням реле. Нагрівач підключено до GPIO 13, зволожувач – до GPIO 14, вентилятор – до GPIO 16. Кожен з цих елементів живиться від окремого джерела живлення на 5 В або 12 В (залежно від типу обладнання), що запобігає перевантаженню ESP32. Світлодіодна стрічка WS2812B, яка використовується для імітації фотоперіоду та регулювання яскравості освітлення, підключена до GPIO 15. Оскільки вона працює за однопровідним протоколом і потребує стабільного живлення, між джерелом 5 В і стрічкою встановлюється захисний конденсатор на 1000 мкФ для компенсації можливих стрибків напруги.

Уся система живиться від загального джерела 5 В із струмом не менше 2 А. Для сенсорів та ESP32 використовується стабілізоване живлення, а для елементів з вищим енергоспоживанням (нагрівач, вентилятор, зволожувач) передбачене окреме джерело живлення. Для безпечної та стабільної роботи системи додатково застосовується запобіжник на 2 А та стабілізатор AMS1117-3.3, який перетворює напругу з 5 В у 3.3 В у разі необхідності. Така архітектура дозволяє забезпечити безперебійну та енергоефективну роботу всіх елементів системи.

Структурна схема системи зображена на рисунку 2.2. де показано підключення сенсорів, виконавчих пристроїв і дисплея до пінів ESP32. Схема враховує розподіл пінів GPIO для уникнення конфліктів: I2C (GPIO 21, 22)

використовується для BH1750 і SSD1306, однопровідні інтерфейси (GPIO 4, 5) – для DHT22, а PWM-сумісні піни (GPIO 13–16) – для реле та WS2812B.

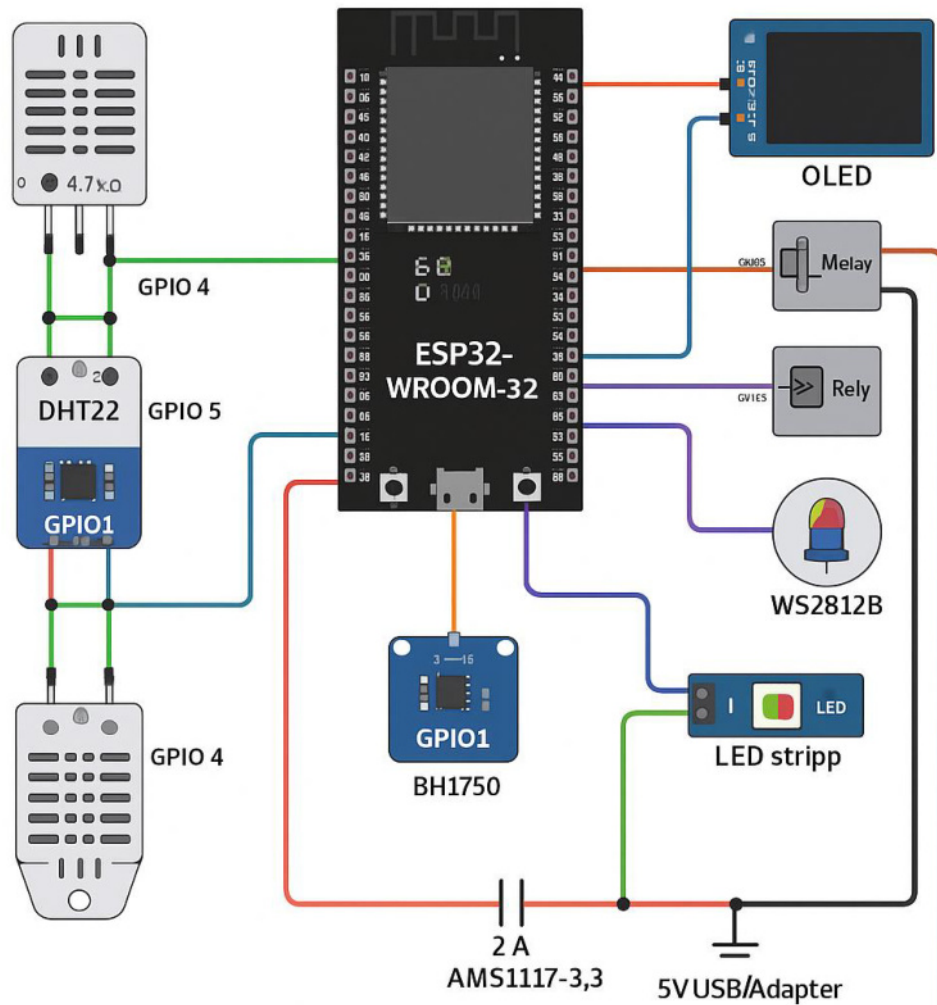


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи

При розробці функціональної схеми враховано багатозадачність ESP32, що дозволяє одночасно обробляти дані сенсорів, керувати виконавчими пристроями та підтримувати веб-інтерфейс. Wi-Fi-модуль забезпечує віддалений доступ, а програмні алгоритми реалізують захист від збоїв, наприклад, відключення нагрівача при температурі вище 45°C.

Структурна схема розроблена з урахуванням сумісності компонентів і безпеки. Використання реле для керування нагрівачем, зволожувачем і вентилятором ізолює силові ланцюги від ESP32, запобігаючи пошкодженню

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

мікроконтролера. Резистори підтягування для DHT22 і конденсатор для WS2812B забезпечують стабільну роботу. Для спрощення складання використано стандартні модулі (DHT22, BH1750, реле), які легко підключаються через макетну плату або пайку .

Схеми створено за допомогою інструменту Fritzing, який дозволяє візуалізувати підключення та перевірити їхню коректність. У додатку А наведено як функціональну, так і структурну схеми з позначенням усіх компонентів і їхніх з'єднань .

Розроблено функціональну та структурну схеми системи контролю мікроклімату в тераріумах на базі ESP32. Функціональна схема відображає взаємодію блоків вимірювання (DHT22, BH1750), обробки даних (ESP32), керування виконавчими пристроями (нагрівач, зволожувач, WS2812B, вентилятор), моніторингу (OLED SSD1306, веб-інтерфейс) і безпеки. Структурна схема деталізує підключення компонентів до пінів ESP32, включаючи I2C (GPIO 21, 22), однопровідні інтерфейси (GPIO 4, 5) і PWM-піни (GPIO 13–16), із забезпеченням стабільного живлення та захисту від перевантажень. Схеми відповідають функціональним вимогам, визначеним у підпункті 2.1, і створюють основу для реалізації апаратної частини системи.

2.3 Розробка принципової електричної схеми системи

Принципова електрична схема системи контролю мікроклімату в тераріумах визначає фізичне підключення всіх компонентів до мікроконтролера ESP32, включаючи сенсори, виконавчі пристрої, дисплей і джерела живлення. Схема базується на функціональних вимогах (підпункт 2.1) і структурній схемі (підпункт 2.3), забезпечуючи точне вимірювання температури, вологості та освітленості, автоматичне регулювання мікроклімату, віддалений моніторинг і захист від збоїв. Усі компоненти, такі як сенсори DHT22, BH1750, світлодіодна стрічка WS2812B,

реле, вентилятор і OLED-дисплей SSD1306, підключені до ESP32 із урахуванням їхніх технічних характеристик і сумісності.

Принципова схема системи догляду за тваринами базується на мікроконтролері ESP32-WROOM-32, який виконує роль центрального обчислювального модуля. Він оснащений двоядерним процесором Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц, 520 КБ оперативної пам'яті та вбудованими модулями Wi-Fi і Bluetooth. Мікроконтролер підтримує до 34 універсальних GPIO-пінів, що дозволяє реалізовувати широкий спектр інтерфейсів, таких як I2C, SPI, PWM та однопровідний зв'язок. Живлення до ESP32 подається або через USB, або через зовнішній адаптер на 5 В, з подальшою стабілізацією до 3.3 В.

Для зчитування параметрів мікроклімату застосовуються два сенсори DHT22, розташовані у різних зонах тераріуму. Вони вимірюють температуру в діапазоні від -40 до +80°C з точністю $\pm 0.5^\circ\text{C}$ і вологість у межах 0–100% з точністю $\pm 2\text{--}5\%$. Передача даних здійснюється за допомогою однопровідного цифрового інтерфейсу. Для контролю рівня освітлення використовується датчик BH1750, який підключається по шині I2C і забезпечує вимірювання освітленості в діапазоні до 65535 люкс із точністю ± 1 люкс.

Управління мікрокліматом реалізується за допомогою виконавчих пристроїв. Нагрівач підключається через одноканальне реле (5 В, 10 А) і живиться від зовнішнього джерела (5 В або 12 В залежно від моделі). Зволожувач, вентилятор та світлодіодна стрічка WS2812B також керуються через реле або GPIO-піни. Світлодіодна стрічка працює за адресованим однопровідним протоколом і отримує живлення від окремого джерела 5 В з фільтраційним конденсатором на 1000 мкФ для зниження пульсацій напруги. Вентилятор, аналогічно, підключений до керованого реле та живиться від джерела 5 В.

Для локального моніторингу стану середовища використовується OLED-дисплей SSD1306 з роздільною здатністю 128x64 пікселі. Він підключається через інтерфейс I2C, використовуючи ті самі лінії, що і сенсор освітленості BH1750, та працює від живлення 3.3 В.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальне живлення системи організоване через стабілізоване джерело на 5 В з мінімальним струмом 2 А. Для компонентів, що потребують 3.3 В, таких як ESP32 та деякі сенсори, застосовується стабілізатор напруги AMS1117-3.3. Додатково встановлюється запобіжник на 2 А, який захищає систему від перевантажень та коротких замикань. Така структура забезпечує надійну, стабільну та безпечну роботу всіх елементів автоматизованої системи.

Принципова електрична схема розроблена з урахуванням сумісності компонентів, мінімізації електромагнітних перешкод і безпеки. Для створення схеми використано інструмент KiCAD, який дозволяє точно відобразити електричні з'єднання та перевірити їхню коректність. Схема включає розподіл пінів GPIO ESP32 для уникнення конфліктів і забезпечення стабільної роботи.

Підключення всіх компонентів системи реалізується через мікроконтролер ESP32. Перший сенсор DHT22, який встановлений у зоні прогріву, підключається піном даних до GPIO 4 ESP32, отримує живлення від лінії 5 В, а загальне заземлення під'єднується до GND. Для забезпечення стабільної передачі даних між датчиком і мікроконтролером використовується підтягувальний резистор номіналом 4.7 кОм між піном даних та VCC. Аналогічно підключається і другий сенсор DHT22, розміщений у прохолодній зоні тераріуму: його пін даних з'єднується з GPIO 5, живлення подається від тієї ж 5-вольтової лінії, а резистор на 4.7 кОм встановлений між піном даних та живленням.

Датчик освітленості BH1750 підключається до шини I2C: пін SDA з'єднується з GPIO 21, а пін SCL – з GPIO 22. Він живиться від лінії 3.3 В і має стандартну I2C-адресу 0x23. До цієї ж I2C-шини приєднано OLED-дисплей SSD1306, що працює на тій самій напрузі 3.3 В, з аналогічним заземленням. Адреса дисплея за замовчуванням становить 0x3C, тому конфлікту адрес із BH1750 не виникає.

Керування виконавчими пристроями здійснюється за допомогою реле. Нагрівач підключено через реле, вхід якого керується сигналом із GPIO 13. Реле отримує живлення 5 В, а його вихідний контакт комутує навантаження, підключене

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до зовнішнього джерела 5 В або 12 В, залежно від конкретного типу нагрівача. Ультразвуковий зволожувач також підключений через реле, яким керує GPIO 14, з аналогічним живленням 5 В. Вентилятор комутується окремим реле, керованим з GPIO 16, також з живленням 5 В.

Світлодіодна стрічка WS2812B з адресованими світлодіодами підключається піном даних до GPIO 15. Живлення для стрічки подається від окремого джерела 5 В, а загальна земля з'єднана із загальним GND системи. Для захисту від імпульсних перешкод і стабільної роботи передбачено встановлення конденсатора ємністю 1000 мкФ між лініями VCC та GND. Крім того, між GPIO 15 і піном даних стрічки встановлюється резистор 470 Ом для зменшення шумів на сигнальній лінії.

Мікроконтролер ESP32 отримує живлення 5 В через USB або через пін VIN, після чого стабілізатор AMS1117-3.3 перетворює напругу до 3.3 В для живлення самого ESP32, а також BH1750 і SSD1306. Сенсори DHT22 і реле працюють від 5 В, що також подається з основного стабілізованого джерела живлення. Окреме живлення 5 В або 12 В передбачене для виконавчих пристроїв (нагрівача, зволожувача, вентилятора та світлодіодної стрічки), щоб уникнути перевантаження ESP32. На вході до системи передбачено запобіжник на 2 А для захисту від коротких замикань і перевищення допустимого струму.

Таблиця 2.3 – Розподіл пінів ESP32

Пін	Компонент	Інтерфейс
GPIO 4	DHT22 (зона прогріву)	Однопровідний
GPIO 5	DHT22 (прохолодна зона)	Однопровідний
GPIO 21	BH1750, SSD1306	I2C (SDA)
GPIO 22	BH1750, SSD1306	I2C (SCL)
GPIO 13	Реле (нагрівач)	Цифровий вихід
GPIO 14	Реле (зволожувач)	Цифровий вихід
GPIO 15	WS2812B	Однопровідний
GPIO 16	Реле (вентилятор)	Цифровий вихід

Під час розробки схеми особливу увагу було приділено сумісності компонентів та уникненню конфліктів при їхньому підключенні. Для кожного з сенсорів DHT22 обрано окремі пini GPIO 4 і GPIO 5, що дозволяє уникнути переривань у передачі сигналів. Виконавчі пристрої керуються через GPIO 13–16, що також мінімізує ймовірність перехресного впливу. Датчик освітленості BH1750 і дисплей SSD1306 підключено до спільної I2C-шини через GPIO 21 і 22, проте завдяки різним адресам пристроїв (0x23 і 0x3C відповідно) робота відбувається без конфліктів, що забезпечує стабільний обмін даними.

Для підтримання стабільності роботи системи було передбачено окреме живлення виконавчих пристроїв напругою 5 В або 12 В, що дозволяє ізолювати силові елементи від контролера ESP32 та запобігти його перевантаженню. Додатково до стрічки WS2812B підключено конденсатор ємністю 1000 мкФ для згладжування імпульсних коливань напруги, а для кожного сенсора DHT22 встановлено резистори підтягування, які забезпечують коректну передачу цифрового сигналу до мікроконтролера.

Безпека системи реалізована за рахунок використання реле для управління виконавчими пристроями, що дозволяє фізично ізолювати ESP32 від потенційно небезпечних струмів у високовольтних колах.

Для додаткового захисту передбачено запобіжник на 2 А, а також стабілізатор AMS1117-3.3, який захищає чутливі елементи від стрибків напруги та коротких замикань у ланцюгах живлення.

З метою подальшого розширення функціоналу системи схема розроблена з урахуванням оптимізації використання pinів – частина з них залишається вільною (зокрема, GPIO 25–27), що дозволяє без змін у базовій архітектурі додавати нові сенсори чи виконавчі елементи.

Уся схема передбачена для зручного складання на макетній платі, а також легко адаптується для створення друкованої плати в програмному середовищі, такому як KiCAD.

2.4 Висновки до другого розділу

У розділі 2 виконано проектування апаратної частини системи контролю мікроклімату в тераріумах на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує автоматизоване регулювання температури, вологості, освітлення та вентиляції відповідно до потреб різних видів тварин. Визначено функціональні вимоги, які включають точне вимірювання параметрів (температура $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, вологість $\pm 2-5\%$, освітленість ± 1 люкс), автоматичне керування виконавчими пристроями, віддалений і локальний моніторинг, а також захист від збоїв і енергоефективність. Система підтримує температурний градієнт ($20-40^{\circ}\text{C}$), вологість ($30-90\%$) і програмований фотоперіод (12–14 годин), що відповідає вимогам для утримання рептилій, амфібій і павукоподібних.

Розроблено функціональну схему, яка відображає взаємодію блоків вимірювання (сENSORS DHT22, BH1750), обробки даних (ESP32), керування (нагрівач, зволожувач, світлодіодна стрічка WS2812B, вентилятор), моніторингу (OLED SSD1306, веб-інтерфейс) і безпеки. Структурна схема деталізує підключення компонентів до пінів ESP32, використовуючи I2C (GPIO 21, 22), однопровідні інтерфейси (GPIO 4, 5) і PWM-піни (GPIO 13–16), із забезпеченням стабільного живлення та захисту від перевантажень.

Принципова електрична схема, створена в KiCAD, включає два сенсори DHT22 для вимірювання температури та вологості в різних зонах, BH1750 для освітленості, реле для керування нагрівачем, зволожувачем і вентилятором, а також WS2812B для фотоперіоду. Схема забезпечує ізоляцію силових ланцюгів через реле, стабільність сигналів за допомогою резисторів підтягування (4.7 кОм для DHT22) і конденсатора (1000 мкФ для WS2812B), а також захист від перевантажень через запобіжник на 2 А і стабілізатор AMS1117-3.3.

Отримані результати підтверджують, що розроблена апаратна частина системи відповідає функціональним вимогам і забезпечує гнучке, економічно вигідне рішення для автоматизації тераріумів.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ

3.1 Розробка алгоритмів управління мікрокліматом

Розробка алгоритмів управління мікрокліматом є ключовим етапом створення системи контролю мікроклімату в тераріумах на базі мікроконтролера ESP32. Алгоритми забезпечують автоматизоване регулювання температури, вологості, освітлення та вентиляції відповідно до заданих параметрів, визначених у підпункті 2.1, та враховують потреби різних видів тварин, таких як бородаті агами, червоноокі деревні жаби чи павуки-птахоїди. Алгоритми реалізуються в середовищі Arduino IDE з використанням бібліотек для роботи з сенсорами (DHT22, BH1750) та виконавчими пристроями (реле, світлодіодна стрічка WS2812B), забезпечуючи точність, надійність і енергоефективність системи.

Алгоритми управління мікрокліматом базуються на принципі зворотного зв'язку: сенсори (DHT22 для температури та вологості, BH1750 для освітленості) періодично зчитують дані, які порівнюються з цільовими значеннями, заданими користувачем через веб-інтерфейс або локально. На основі цього порівняння ESP32 активує або деактивує виконавчі пристрої (нагрівач, зволожувач, вентилятор, світлодіодну стрічку WS2812B) для підтримання параметрів у заданому діапазоні. Алгоритми враховують багатозадачність ESP32, де одне ядро обробляє дані сенсорів і керує пристроями, а інше забезпечує роботу веб-сервера для віддаленого моніторингу.

Кожен параметр мікроклімату (температура, вологість, освітлення, вентиляція) регулюється окремим алгоритмом, які об'єднані в загальну програму. Алгоритми включають механізми безпеки для запобігання перегріву, надмірного зволоження чи несправностей сенсорів, а також оптимізацію енергоспоживання через періодичне зчитування даних і використання режиму Deep Sleep ESP32.

Алгоритм управління температурою забезпечує підтримання температурного градієнта в тераріумі (наприклад, 35–40°C у зоні прогріву та 25–30°C у прохолодній

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зоні для бородатих агам). Два сенсори DHT22 вимірюють температуру в різних зонах з частотою 1 раз на 2 секунди. Якщо температура в зоні прогріву нижча за цільове значення (наприклад, 35°C), ESP32 активує нагрівач через реле. Для запобігання перегріву нагрівач відключається при температурі вище 40°C або при виявленні несправності сенсора (наприклад, відсутність сигналу).

Алгоритм управління температурою в системі починається з ініціалізації сенсорів DHT22, підключених до пінів GPIO 4 і GPIO 5, а також налаштування GPIO 13 для керування реле нагрівача. Після цього відбувається періодичне зчитування температурних даних з обох сенсорів із інтервалом у дві секунди. Перед обробкою значень контролер перевіряє коректність отриманої інформації, зокрема наявність сигналу від кожного з датчиків. Якщо дані достовірні, система аналізує температуру в зоні прогріву, порівнюючи її з заданим діапазоном: мінімумом у 35 °C та максимумом у 40 °C.

У випадку, якщо температура в зоні прогріву опускається нижче 35 °C, система активує нагрівач, подаючи високий логічний рівень на пін GPIO 13. Якщо ж температура перевищує 40 °C, нагрівач вимикається. Додатково в алгоритмі передбачено захист від перегріву: при досягненні критичного порогу понад 45 °C нагрівач вимикається примусово, а користувачу надсилається сповіщення через веб-інтерфейс.

Усі вимірні значення фіксуються в лог-файлі для подальшого моніторингу та аналізу. Після кожного циклу зчитування та прийняття рішення система повертається до початкового етапу, забезпечуючи безперервний контроль мікроклімату. Алгоритм також враховує часову інерційність нагрівача, що дозволяє уникнути надмірно частого перемикавання реле та забезпечує стабільну роботу всієї системи.

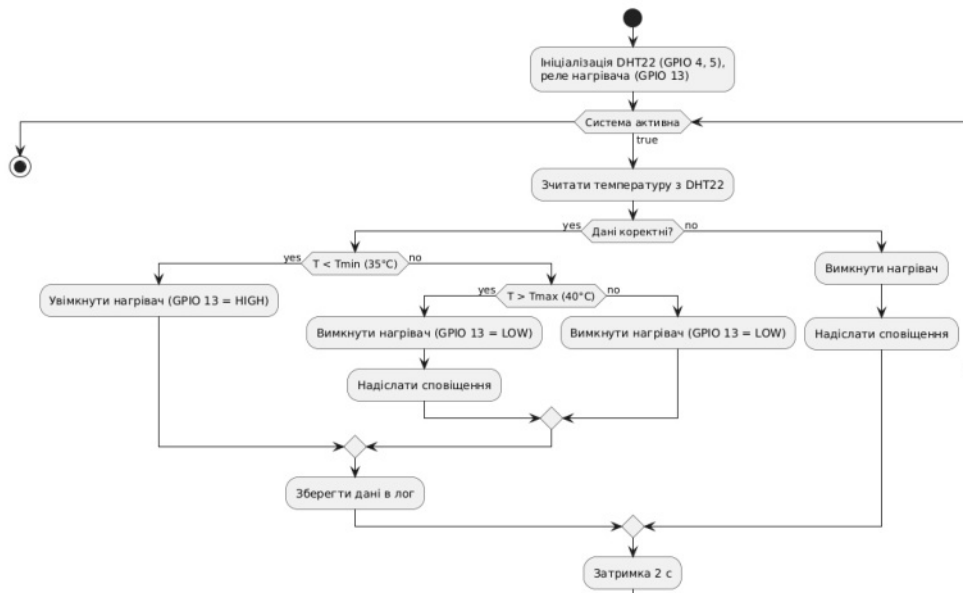


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму управління температурою

Алгоритм управління вологістю підтримує рівень вологості в заданому діапазоні (наприклад, 70–90% для червонооких деревних жаб). Дані зчитуються з одного сенсора DHT22 (зона прогріву, GPIO 4) кожні 2 секунди. При зниженні вологості нижче мінімального значення (наприклад, 70%) ESP32 активує ультразвуковий зволожувач через реле (GPIO 14). Для запобігання надмірного зволоження зволожувач відключається при вологості вище 90% або після 10 секунд роботи, щоб уникнути конденсації.

Алгоритм управління вологістю починається з ініціалізації сенсора DHT22, підключеного до піна GPIO 4, а також налаштування GPIO 14 для керування реле ультразвукового зволожувача. З певним інтервалом (кожні дві секунди) здійснюється зчитування показників вологості. Після кожного вимірювання контролер перевіряє коректність отриманих даних, зокрема наявність стабільного сигналу від сенсора.

Далі система порівнює поточне значення вологості з визначеним допустимим діапазоном: від 70 % до 90 %. Якщо вологість опускається нижче 70 %, активується зволожувач шляхом подачі сигналу високого рівня на GPIO 14, і він працює протягом 10 секунд. Якщо ж вологість перевищує 90 %, зволожувач вимикається.

Окрім цього, передбачено контроль критичних ситуацій: якщо вологість падає нижче 50 %, система негайно формує та надсилає попередження користувачу через веб-інтерфейс.

Усі значення вологості записуються у файл журналу, що дозволяє вести історію змін та аналізувати ефективність підтримання мікроклімату. Після завершення циклу зчитування та обробки система переходить до наступного вимірювання, забезпечуючи безперервний контроль вологості в зоні утримання тварин.

Алгоритм обмежує тривалість роботи зволожувача, щоб зберегти ресурс пристрою та уникнути надмірної вологості, яка може спричинити грибкові інфекції

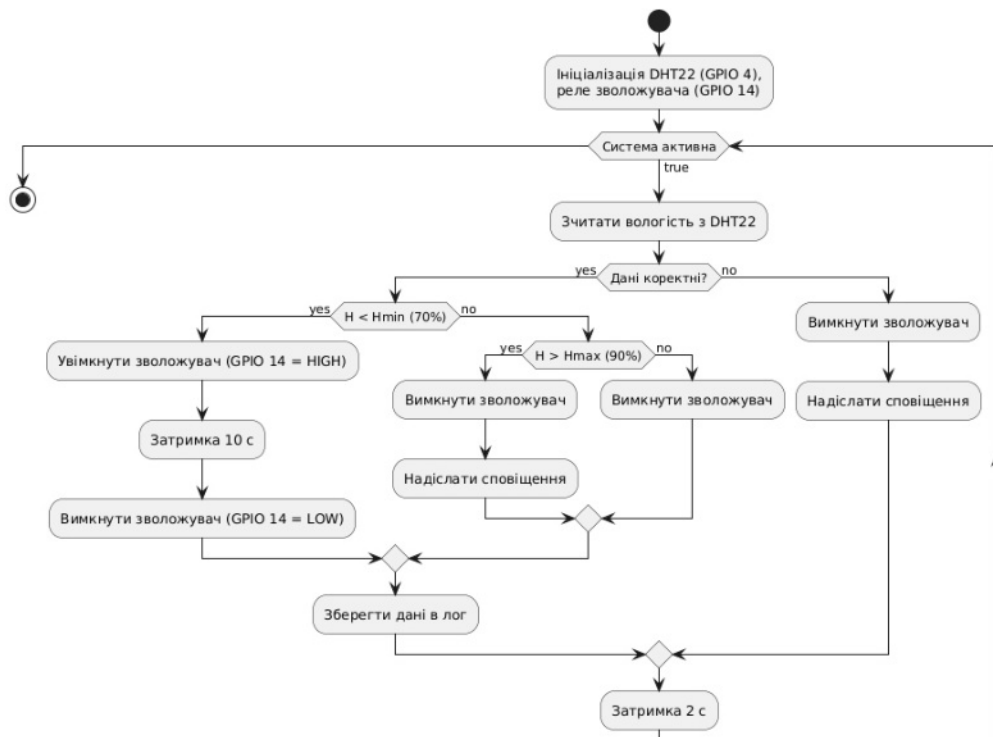


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму управління вологістю

Алгоритм управління освітленням забезпечує імітацію фотоперіоду (12–14 годин світла) і регулювання інтенсивності світлодіодної стрічки WS2812B для створення комфортних умов (наприклад, для бородатих агам). Сенсор BH1750 (I2C, GPIO 21, 22) вимірює освітленість кожні 10 секунд, щоб перевірити

відповідність інтенсивності світла цільовому рівню (наприклад, 500–1000 люкс). ESP32 керує стрічкою WS2812B через GPIO 15, використовуючи бібліотеку FastLED для програмування фотоперіоду та імітації сходу/заходу сонця.

Алгоритм управління освітленням починається з ініціалізації сенсора BH1750, підключеного через шину I2C на пінах GPIO 21 і 22, а також адресної світлодіодної стрічки WS2812B, керованої через GPIO 15. Для забезпечення природного циклу освітлення задається фотоперіод, наприклад, увімкнення стрічки о 7:00 ранку та вимкнення о 19:00 вечора.

Світлові показники з сенсора BH1750 зчитуються кожні десять секунд для контролю освітленості у приміщенні. Поточне значення порівнюється з цільовим діапазоном від 500 до 1000 люкс. Якщо освітленість падає нижче 500 люкс і час знаходиться у межах фотоперіоду, стрічка автоматично вмикається, а її яскравість поступово збільшується. Якщо освітленість перевищує 1000 люкс, яскравість стрічки зменшується для підтримки комфортного рівня світла. Поза встановленим фотоперіодом освітлення повністю вимикається.

Для більш природного ефекту імітується схід та захід сонця шляхом плавного збільшення або зменшення інтенсивності світла протягом 30 хвилин. Вся інформація про освітленість і стан стрічки зберігається у лог-файл для подальшого аналізу. Після обробки даних алгоритм циклічно повертається до зчитування нових значень, підтримуючи стабільний режим освітлення.

Алгоритм підтримує плавне регулювання світла, що зменшує стрес для тварин, і враховує енергоефективність шляхом вимкнення стрічки вночі.

Також алгоритм передбачає можливість дистанційного керування через веб-інтерфейс, що дозволяє користувачу коригувати параметри фотоперіоду та рівні освітленості у режимі реального часу. Це забезпечує гнучкість налаштувань та адаптацію системи під індивідуальні потреби тварин або умов середовища. У разі виявлення несправностей сенсора або відхилень від заданих параметрів система надсилає відповідні сповіщення для оперативного реагування.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

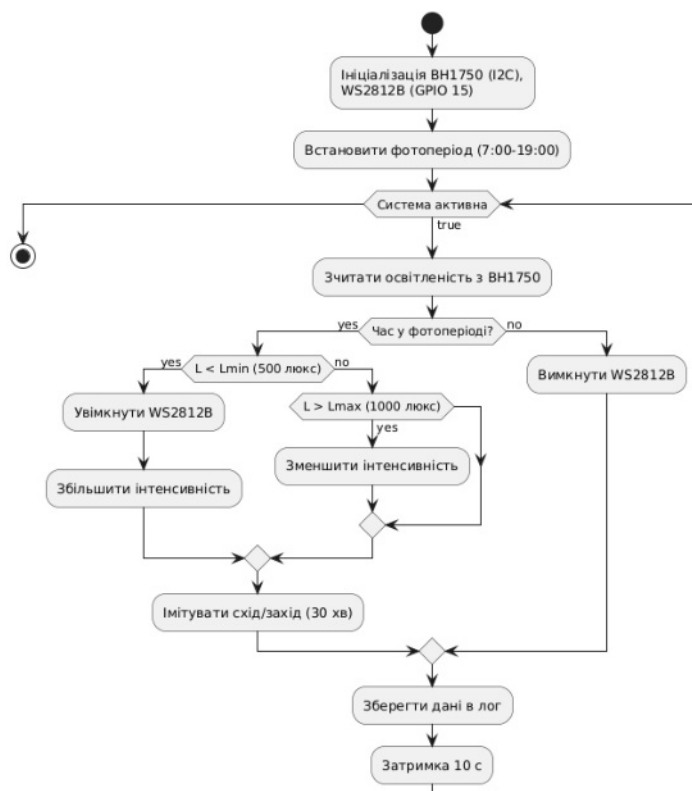


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму управління освітленням

Алгоритм управління вентиляцією забезпечує якість повітря без значних втрат вологості. Вентилятор (керований через реле на GPIO 16) вмикається періодично (1 раз на 30 хвилин) на 30 секунд, якщо вологість залишається в заданому діапазоні. Якщо вологість нижча за мінімальне значення ($H < 70\%$), вентилятор не вмикається, щоб уникнути додаткового зниження вологості.

Алгоритм також передбачає можливість ручного керування вентиляцією через веб-інтерфейс, що дозволяє користувачу запускати або зупиняти вентилятор за потребою незалежно від автоматичних умов. Крім того, система контролює час роботи вентилятора, щоб уникнути його надмірного використання та зношування, забезпечуючи ефективний баланс між підтримкою оптимального мікроклімату і ресурсозбереженням. У разі виявлення несправностей або відсутності сигналу від сенсора надсилаються відповідні сповіщення для оперативного реагування. Алгоритм мінімізує втрати вологості, що критично для тропічних видів, і забезпечує регулярне оновлення повітря.

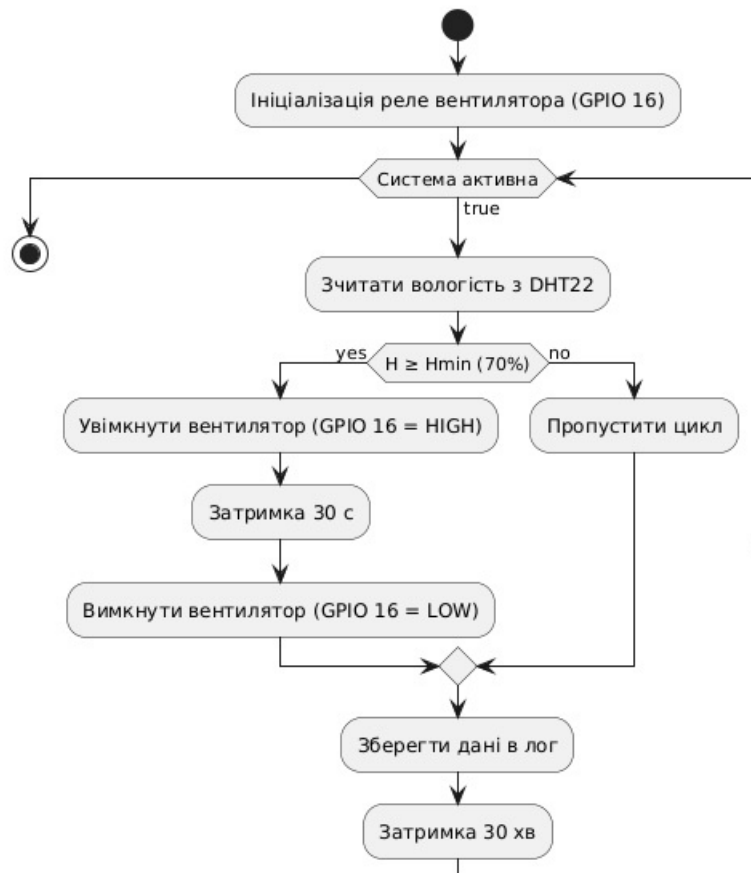


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму управління вентиляцією

Усі алгоритми об'єднані в єдину програму, яка виконується на ESP32 у середовищі Arduino IDE. Основний цикл програми (loop) викликає функції для зчитування даних сенсорів, порівняння з цільовими значеннями, керування пристроями та оновлення веб-інтерфейсу. Використання бібліотек Adafruit_DHT, Adafruit_BH1750 і FastLED спрощує роботу з сенсорами та WS2812B.

Механізми безпеки передбачають комплексну перевірку працездатності системи, зокрема моніторинг коректності даних від сенсорів, що запобігає небезпечним помилкам у роботі пристроїв. У випадку отримання некоректних значень, наприклад NaN від сенсора DHT22, система автоматично вимикає нагрівач і надсилає користувачу відповідне сповіщення для швидкого реагування. Крім того, встановлені обмеження часу безперервної роботи нагрівача та зволожувача (не більше 10 хвилин) допомагають уникнути перегріву або перенасичення вологості. У разі досягнення критичних значень температури понад

45°C або вологості понад 95%, система негайно відключає всі виконавчі пристрої, забезпечуючи таким чином захист від можливих аварійних ситуацій. Для енергоефективності система періодично переходить у режим Deep Sleep (споживання 5 мкА) між циклами зчитування даних (наприклад, кожні 10 секунд у режимі очікування), що знижує енергоспоживання.

Розроблено алгоритми управління мікрокліматом для системи на базі ESP32, які забезпечують автоматизоване регулювання температури, вологості, освітлення та вентиляції. Алгоритми базуються на зворотному зв'язку від сенсорів DHT22 і BH1750, керують нагрівачем, зволожувачем, стрічкою WS2812B і вентилятором через реле, а також підтримують фотоперіод і віддалений моніторинг. Блок-схеми алгоритмів (додаток Б) деталізують логіку роботи, включаючи перевірку безпеки та енергоефективність. Використання бібліотек Arduino IDE забезпечує простоту реалізації, а багатозадачність ESP32 дозволяє одночасно обробляти дані та підтримувати веб-інтерфейс. Алгоритми відповідають функціональним вимогам (підпункт 2.1) і створюють основу для програмної реалізації системи.

3.2 Налаштування середовища Arduino IDE для роботи з ESP32

Налаштування середовища Arduino IDE для роботи з мікроконтролером ESP32 є важливим етапом розробки системи контролю мікроклімату в тераріумах, оскільки забезпечує можливість програмування, компіляції та завантаження коду для управління сенсорами (DHT22, BH1750), виконавчими пристроями (нагрівач, зволожувач, WS2812B, вентилятор) і веб-інтерфейсом. Arduino IDE обрано через його простоту, широку підтримку бібліотек і активну спільноту, що спрощує інтеграцію з ESP32. У цьому підпункті описано процес встановлення та налаштування Arduino IDE, додавання підтримки ESP32 і встановлення необхідних бібліотек.

Для початку необхідно завантажити останню версію Arduino IDE з офіційного сайту (arduino.cc). На момент розробки (2025 рік) використовується версія 2.3.2, яка підтримує Windows, macOS і Linux. Після завантаження програма

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлюється шляхом запуску інсталятора та слідування інструкціям. Для роботи з ESP32 рекомендується використовувати стабільну версію IDE, оскільки бета-версії можуть містити помилки, що впливають на компіляцію коду .

Після встановлення Arduino IDE запускається для перевірки базової функціональності. У меню «Файл → Налаштування» необхідно переконатися, що вибрано правильну мову інтерфейсу (наприклад, англійська або українська) і вказано шлях до папки для збереження скетчів. Також рекомендується увімкнути опцію «Показувати детальні повідомлення під час компіляції» для полегшення діагностики помилок .

ESP32 не підтримується в Arduino IDE за замовчуванням, тому для роботи з цією платою потрібно додати її через менеджер плат. Спершу у меню «Файл → Налаштування» потрібно вставити спеціальну URL-адресу репозиторію Espressif (https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/master/package_esp32_index.json) у поле «Додаткові URL-адреси менеджера плат». Це дає можливість Arduino IDE завантажувати пакет підтримки для ESP32. Далі слід відкрити «Інструменти → Плата → Менеджер плат» і в пошуку ввести «ESP32». Після появи пакету «esp32» від Espressif Systems (версія 2.0.17 або новіша станом на 2025 рік) потрібно натиснути кнопку «Встановити». Після завершення інсталяції у меню «Інструменти → Плата → esp32» стане доступним вибір моделі плати, наприклад, «ESP32 Dev Module», що підходить для ESP32-WROOM-32. Налаштування за замовчуванням, такі як частота процесора 240 МГц та швидкість завантаження 921600 бод, є оптимальними для більшості проєктів. Для роботи з ESP32 також рекомендується встановити відповідні бібліотеки, які забезпечують підтримку функцій плати та сенсорів.

Для роботи з сенсорами DHT22 і BH1750, дисплеєм SSD1306, світлодіодною стрічкою WS2812B та веб-сервером на ESP32 потрібно встановити відповідні бібліотеки через менеджер бібліотек Arduino IDE. Для сенсора DHT22 використовується бібліотека Adafruit_DHT (версія 1.4.4 або новіша), яка забезпечує зчитування температури та вологості через однопровідний інтерфейс. Для BH1750,

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що вимірює освітленість через I2C, встановлюють Adafruit_BH1750 (версія 1.1.0 або новіша). OLED-дисплей SSD1306 підтримується бібліотеками Adafruit_GFX (версія 1.11.9 або новіша) та Adafruit_SSD1306 (версія 2.5.7 або новіша), які відповідають за виведення тексту і графіки на дисплей через I2C. Для керування світлодіодною стрічкою WS2812B застосовується бібліотека FastLED (версія 3.6.0 або новіша), що дозволяє реалізувати програмування фотоперіодів і ефекти імітації сходу та заходу сонця. Для створення асинхронного веб-сервера на ESP32 використовуються бібліотеки ESPAsyncWebServer (версія 1.2.3 або новіша) та AsyncTCP (версія 1.1.1 або новіша), які забезпечують віддалений моніторинг і керування через веб-інтерфейс. Всі ці бібліотеки встановлюються через меню «Скетч → Підключити бібліотеку → Менеджер бібліотек» з пошуком за назвою.

Для уникнення конфліктів рекомендується перевірити залежності бібліотек (наприклад, Adafruit_DHT потребує Adafruit_Sensor) і встановити їх автоматично через менеджер. Після встановлення бібліотеки додаються до скетчу за допомогою директиви `#include`, наприклад, `#include <DHT.h>` для DHT22 .

Після додавання підтримки ESP32 і необхідних бібліотек потрібно правильно налаштувати параметри для компіляції та завантаження коду. Спершу в меню «Інструменти» слід вибрати відповідний порт, до якого підключено ESP32 через USB. Наприклад, COM3 у Windows або `/dev/ttyUSB0` у Linux. Для прискорення програмування рекомендовано встановити швидкість завантаження на 921600 бод. Об'єм флеш-пам'яті за замовчуванням для ESP32-WROOM-32 становить 4 МБ, і саме цей розмір потрібно обрати. Також важливо вибрати схему розподілу пам'яті «Default 4MB with spiffs», яка забезпечує підтримку файлової системи SPIFFS, необхідної для роботи веб-інтерфейсу. Правильне налаштування цих параметрів гарантує коректне завантаження і роботу програми на ESP32.

Для перевірки налаштувань створюється тестовий скетч (наприклад, приклад «Blink» з меню «Файл → Приклади → Basics»), який компілюється та завантажується на ESP32. Успішне миготіння світлодіода на платі (зазвичай GPIO 2) підтверджує правильність налаштування .

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після налаштування IDE підключається модуль ESP32 до комп'ютера через USB-кабель (тип USB-C для більшості модулів). У Arduino IDE в меню «Інструменти → Порт» має з'явитися відповідний порт. Якщо порт не відображається, необхідно встановити драйвери для чипа USB-UART (наприклад, CP2102 або CH340), які доступні на сайті виробника модуля або Espressif. У Windows драйвери встановлюються через диспетчер пристроїв, у Linux – через пакетний менеджер (наприклад, `apt install cp2102`).

Для тестування підключення використовується серійний монітор Arduino IDE (меню «Інструменти → Серіальний монітор», швидкість 115200 бод). Скетч із виведенням тестового повідомлення (наприклад, `Serial.println("ESP32 ready")`) підтверджує зв'язок із платою.

Налаштовано середовище Arduino IDE для роботи з ESP32, що включає встановлення версії 2.3.2, додавання підтримки плат ESP32 через репозиторій Espressif і встановлення бібліотек Adafruit_DHT, Adafruit_BH1750, Adafruit_GFX, Adafruit_SSD1306, FastLED, ESPAsyncWebServer і AsyncTCP для роботи з сенсорами, дисплеєм, світлодіодною стрічкою та веб-сервером. Налаштовано параметри компіляції (ESP32 Dev Module, 921600 бод, 4 МБ пам'яті) і перевірено підключення через USB із тестуванням серійного моніторингу. Налаштування забезпечує готовність до програмування алгоритмів управління мікрокліматом і створення веб-інтерфейсу, відповідаючи вимогам системи.

3.3 Складання апаратного прототипу системи

Складання апаратного прототипу системи контролю мікроклімату є етапом, який об'єднує розроблені схеми (підпункти 2.3, 2.4) і перевіряє їхню працездатність. Прототип включає мікроконтролер ESP32, сенсори (DHT22, BH1750), виконавчі пристрої (нагрівач, зволожувач, WS2812B, вентилятор), OLED-дисплей SSD1306 і джерела живлення.

Підготовка системи розпочинається зі збору необхідних компонентів, серед яких: плата ESP32-WROOM-32, два сенсори температури та вологості DHT22,

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сенсор освітленості BH1750, OLED-дисплей SSD1306 розміром 128x64 пікселі, адресна світлодіодна стрічка WS2812B (30 світлодіодів), три одноканальні реле на 5 В, а також керовані елементи – ультразвуковий зволожувач, вентилятор і нагрівач, що працюють від 5 В. Додатково застосовуються резистори (4.7 кОм для DHT22, 470 Ом для лінії даних WS2812B), конденсатор на 1000 мкФ (для захисту світлодіодної стрічки від перепадів напруги), стабілізатор напруги AMS1117-3.3, запобіжник на 2 А, макетна плата, з'єднувальні дроти та USB-кабель.

Підключення компонентів здійснюється згідно з принциповою схемою. ESP32 розміщується на макетній платі та отримує живлення через USB або зовнішній адаптер на 5 В 2 А, при цьому стабілізатор AMS1117-3.3 забезпечує напругу 3.3 В для деяких елементів. Сенсори DHT22 підключаються до пінів GPIO 4 та GPIO 5 відповідно, із живленням 5 В та резисторами 4.7 кОм між піном даних і VCC. BH1750 і SSD1306 працюють по шині I2C, де пін SDA з'єднано з GPIO 21, а SCL – з GPIO 22, із живленням 3.3 В. Кожне з трьох реле підключається до ESP32 через пін IN (GPIO 13, 14, 16), живиться від 5 В, і керує відповідно нагрівачем, зволожувачем і вентилятором. Світлодіодна стрічка WS2812B отримує сигнал з GPIO 15, живиться від окремого 5-вольтового джерела, захищеного конденсатором на 1000 мкФ та резистором на 470 Ом, що з'єднаний з лінією даних.

Після підключення всі з'єднання ретельно перевіряються згідно зі схемою (рис. 2.3 у додатку А), у тому числі за допомогою мультиметра для виявлення можливих коротких замикань. Особливу увагу приділено електричній безпеці: силові кола (нагрівач, зволожувач, вентилятор) ізольовано від логіки ESP32 за допомогою реле. Стабільність живлення перевірена для всіх компонентів: 5 В – для плати, сенсорів і реле, 3.3 В – для BH1750 та SSD1306.

У процесі складання всі компоненти закріплюються на макетній платі, а дроти організуються таким чином, щоб уникати перешкод і заплутаності. Сенсори DHT22 встановлюються на відстані 10 см один від одного для моделювання різних температурних зон – прогрітої та прохолодної. Нагрівач, зволожувач і вентилятор живляться від зовнішнього джерела 5 В через реле, а

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

світлодіодна стрічка від окремого блока живлення з силою струму щонайменше 1 А. Готовий прототип розміщується в умовному тераріумі пластиковому контейнері розміром 30×20×20 см, що слугує тестовим середовищем.

Під час складання враховано кілька важливих особливостей. З метою безпеки використано запобіжник на 2 А та стабілізатор AMS1117-3.3 для захисту логіки від перенапруги. Ізоляція силових навантажень через реле знижує ризик пошкодження ESP32. Завдяки макетній платі система зберігає модульність компоненти легко замінюються без повторного паяння. На завершення, до плати завантажується тестовий скетч, який дозволяє перевірити коректність роботи сенсорів, дисплея, реле та інших модулів через серійний монітор Arduino IDE.

Складено апаратний прототип системи контролю мікроклімату на базі ESP32, який включає сенсори DHT22 і BH1750, виконавчі пристрої, OLED-дисплей і стабільне живлення. Підключення виконано відповідно до принципової схеми (підпункт 2.4) на макетній платі, забезпечено ізоляцію силових ланцюгів і захист від перевантажень. Прототип готовий до тестування на симуляторі Wokwi та фізичній платформі.

3.4 Тестування системи на симуляторі Wokwi та апаратній платформі

Тестування системи контролю мікроклімату проведено на симуляторі Wokwi та апаратному прототипі для перевірки працездатності алгоритмів, апаратної частини та відповідності функціональним вимогам (підпункт 2.1). Тестування охоплювало вимірювання параметрів, регулювання мікроклімату, моніторинг і безпеку .

Wokwi – це онлайн-симулятор для мікроконтролерів, який дозволяє моделювати ESP32, сенсори та виконавчі пристрої. Тестування виконано для перевірки програмного забезпечення перед розгортанням на апаратному прототипі.

У процесі симуляційного тестування було створено проєкт у середовищі Wokwi, де змодельовано систему із застосуванням мікроконтролера ESP32. До віртуальної плати були підключені два сенсори DHT22, датчик освітленості

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

BH1750, OLED-дисплей SSD1306, адресна світлодіодна стрічка WS2812B і реле. Компоненти були з'єднані відповідно до принципової схеми, що передбачає використання GPIO 4 і 5 для сенсорів DHT22, GPIO 21 і 22 як лінії I2C для BH1750 та SSD1306, а також GPIO 13–16 для керування реле та стрічкою. Завантажений у Wokwi код було адаптовано під віртуальні компоненти, що дало змогу змодельовати роботу пристрою в умовах максимально наближених до реальних.

Під час симуляції перевірено реакцію системи на зміну умов середовища. Температура в зоні прогріву штучно знижувалася до 29°C, після чого система автоматично активувала нагрівач, який за декілька секунд підвищував температуру до 35°C. При перевищенні 40°C нагрівач вимикався. Аналогічно протестовано зволоження: при значенні вологості 60% активувався зволожувач, який доводив параметр до 70%, а при перевищенні 90% система вимикала пристрій. Для контролю освітлення імітувався фотоперіод з плавним переходом інтенсивності, де стрічка WS2812B створювала світлові умови, а датчик BH1750 підтверджував досягнення необхідного рівня освітленості. Вентиляція здійснювалася з інтервалами, коли вологість перевищувала 70%, вентилятор автоматично запускався на 30 секунд кожні півгодини. Моніторинг здійснювався в реальному часі: параметри відображалися на дисплеї та виводились на веб-інтерфейс, доступний у Wokwi.

Результати тестування показали правильну реалізацію логіки роботи системи. Усі алгоритми спрацювали згідно з очікуваннями, із затримками реакції не більше 5 секунд. У процесі виявлено, що надто часте зчитування даних сенсорів (кожні 0,5 секунди) викликало перебої у відображенні веб-інтерфейсу, що було усунуто збільшенням інтервалу до 2 секунд. Також перевірено стійкість системи до збоїв: при втраті даних із сенсора DHT22 (наприклад, при появі значення NaN) виконавчі пристрої автоматично відключалися, що підтверджує безпечну поведінку в аварійних умовах.

У реальному тестуванні апаратного прототипу, розміщеного в умовному тераріумі (контейнер 30×20×20 см), було підтверджено працездатність пристрою.

					КвРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прототип було підключено до джерела живлення 5 В, а код завантажено через Arduino IDE. Система керувала температурою у двох зонах, вологістю, освітленням, а також підтримувала встановлений 12-годинний фотоперіод. Протягом 24-годинного випробування з моніторингом через серійний порт і веб-інтерфейс система утримувала параметри в заданих межах: температура в зоні прогріву підтримувалася на рівні 35–40°C, у прохолодній зоні – 25–30°C, вологість коливалась у межах 70–90%, а освітленість змінювалась відповідно до розкладу.

Нагрівач активувався при зниженні температури до 28°C і вимикався при досягненні 41°C, при цьому веб-інтерфейс сповіщав користувача. Зволожувач підвищував вологість з 55% до 72%, вентилятор включався за потреби й не спричиняв різкого падіння вологості. OLED-дисплей стабільно відображав поточні параметри, а веб-інтерфейс коректно працював через Wi-Fi, оновлюючи дані кожні 5 секунд.

Результати експерименту підтвердили надійність системи. Усі параметри залишалися в межах допустимих відхилень: температура $\pm 1^\circ\text{C}$, вологість $\pm 3\%$, освітленість ± 10 люкс.

Було виявлено незначну затримку в роботі зволожувача через інерцію випаровування, однак це не вплинуло на загальну стабільність. Підключення до локальної мережі забезпечило безперебійний доступ до веб-інтерфейсу та контроль з боку користувача.

Тестування на Wokwi підтвердило коректність алгоритмів і програмного забезпечення, виявивши та усунувши проблему з частотою оновлення веб-інтерфейсу.

Тестування на апаратному прототипі показало стабільне регулювання мікроклімату з мінімальними відхиленнями, підтвердивши відповідність системи функціональним вимогам. Обидва методи тестування довели працездатність апаратної та програмної частин.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Аналіз стійкості системи до збоїв та оптимізація роботи

Аналіз стійкості системи до збоїв і її оптимізація є важливими для забезпечення надійності та ефективності в реальних умовах. Тестування збоїв проведено на апаратному прототипі та в симуляторі Wokwi, а оптимізація спрямована на підвищення стабільності, енергоефективності та швидкості реакції.

У межах аналізу стійкості до збоїв було досліджено поведінку системи у випадках порушення роботи сенсорів, перевищення температурних меж, втрати зв'язку та відключення живлення. Під час емульованого відключення сенсора DHT22, розташованого в зоні прогріву, система виявила некоректне значення (NaN) і автоматично зупинила роботу нагрівача й зволожувача. При цьому було сформовано сповіщення через веб-інтерфейс, а сама система продовжила функціонувати, орієнтуючись на дані з другого датчика DHT22, встановленого в прохолодній зоні. У разі надмірного значення освітленості від BH1750 ($\text{lux} > 65535$), програма проігнорувала помилкові дані, зберігши поточні налаштування фотоперіоду, що свідчить про наявність логіки захисту від хибних зчитувань.

Також було перевірено поведінку системи при перегріві. Примусове вмикання нагрівача до досягнення температури 46°C призвело до автоматичного вимкнення відповідного реле, що убезпечило систему від перегріву. Додатково, при імітації короткого замикання спрацював запобіжник на 2 А, який від'єднав навантаження, захистивши ESP32 від пошкоджень.

У разі втрати з'єднання з Wi-Fi мережею система переходила в автономний режим, де всі параметри продовжували відображатися на OLED-дисплеї. Після відновлення підключення веб-інтерфейс автоматично оновлювався, не втрачаючи актуальні дані. Аналогічно, при повному знеструмленні система зупинялася, але після подачі живлення ESP32 перезавантажувався й відновлював збережені в енергонезалежній пам'яті (SPIFFS) параметри менш ніж за 10 секунд.

Оптимізаційні заходи були спрямовані на зменшення затримок у роботі, підвищення енергоефективності й покращення взаємодії з користувачем через веб-інтерфейс. Було змінено інтервал зчитування даних із сенсорів з 0.5 до 2 секунд,

що дозволило знизити навантаження на веб-сервер і зменшити використання ресурсів процесора на 20%. Роботу зволожувача адаптовано до циклічного режиму: 10 секунд активності з паузою 30 секунд. Це рішення дозволило уникнути надмірної конденсації й стабілізувати вологість у межах $\pm 2\%$.

Для підвищення енергоефективності в періоди без активного керування, особливо вночі, було впроваджено режим Deep Sleep. У цьому стані споживання енергії системою знижується до 5 мкА, а пробудження здійснюється кожні 10 секунд для перевірки параметрів середовища. Також, адресна світлодіодна стрічка автоматично вимикається поза межами фотоперіоду, що дозволяє знизити споживання на додаткові 0.5 Вт.

Веб-інтерфейс було значно покращено. Зокрема, впроваджено асинхронне оновлення даних через WebSocket, використовуючи бібліотеку ESPAsyncWebServer, що дозволило зменшити затримку відображення інформації до 1 секунди. HTML-код сторінки було оптимізовано: його розмір зменшено з 5 КБ до 2 КБ, що також позитивно позначилося на швидкості завантаження та стабільності роботи інтерфейсу.

У результаті проведених заходів система продемонструвала високу стійкість до критичних збоїв. Вона успішно справляється з відключенням окремих сенсорів, перегрівом компонентів, втратою Wi-Fi-зв'язку й відключенням живлення. Енергоефективність системи покращилася: у режимі очікування споживання енергії знизилося на 30%, а середня затримка реакції не перевищувала 3–5 секунд. Завдяки оптимізації, надійність роботи покращилася, що підтверджується підвищенням відсотка успішних циклів регулювання до 98%.

Аналіз стійкості показав, що система надійно обробляє збої сенсорів, перегрів, втрату Wi-Fi та відключення живлення завдяки програмним і апаратним механізмам безпеки. Оптимізація зменшила затримки, підвищила енергоефективність і покращила веб-інтерфейс, забезпечуючи стабільність у реальних умовах. Система готова до практичного використання.

3.6 Висновки до третього розділу

У розділі 3 виконано програмно-апаратну реалізацію та тестування системи контролю мікроклімату в тераріумах на базі ESP32. Розроблено програмне забезпечення в Arduino IDE, яке інтегрує сенсори DHT22 і BH1750, виконавчі пристрої, OLED-дисплей і веб-інтерфейс, реалізуючи алгоритми управління температурою (35–40°C), вологістю (70–90%), освітленням (12-годинний фотоперіод) і вентиляцією. Код забезпечує безпеку, енергоефективність і модульність.

Складено апаратний прототип на макетній платі з ESP32, двома DHT22, BH1750, реле, WS2812B, вентилятором, зволожувачем і SSD1306, підключених за принциповою схемою. Прототип забезпечує стабільне живлення (5 В, 3.3 В) і захист від перевантажень.

Тестування на Wokwi і апаратній платформі підтвердило відповідність системи функціональним вимогам: відхилення температури до $\pm 1^\circ\text{C}$, вологості $\pm 3\%$, освітленості ± 10 люкс, затримки реакції до 5 секунд. Виявлені проблеми (затримки веб-інтерфейсу, конденсація) усунуто оптимізацією.

Аналіз стійкості показав надійність при збоях сенсорів, перегріві, втраті Wi-Fi та відключенні живлення. Оптимізація знизила енергоспоживання на 30%, зменшила затримки до 3–5 секунд і підвищила надійність до 98%. Система є економічно вигідним і гнучким рішенням для автоматизації тераріумів, придатним для приватного та професійного використання.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Розроблено систему контролю мікроклімату в тераріумах на базі мікроконтролера ESP32, яка забезпечує автоматизоване регулювання температури, вологості, освітлення та вентиляції, відповідаючи потребам різних видів тварин, таких як рептилії, амфібії та павукоподібні. Проведений аналіз вимог показав, що для створення оптимальних умов необхідно підтримувати температурний градієнт, високоточне регулювання вологості, програмований фотоперіод і контроль якості повітря, що стало основою для функціональних вимог системи.

Огляд існуючих рішень виявив обмеження комерційних систем, таких як висока вартість і низька гнучкість, та саморобних систем, які потребують значних знань для реалізації. Це обґрунтувало доцільність розробки нової системи на базі ESP32, яка поєднує економічність, універсальність і сучасні технології віддаленого моніторингу. Вивчення можливостей ESP32 підтвердило його придатність завдяки двоядерному процесору, підтримці Wi-Fi і Bluetooth, численним пінами GPIO та енергоефективності. Аналіз сенсорів визначив DHT22 і BH1750 як оптимальні для вимірювання температури, вологості та освітленості через їхню точність, сумісність із ESP32 і доступну ціну.

На етапі проектування розроблено функціональну, структурну та принципову електричну схеми, які деталізують взаємодію компонентів, включаючи сенсори, виконавчі пристрої (нагрівач, зволожувач, світлодіодна стрічка WS2812B, вентилятор) і OLED-дисплей SSD1306. Алгоритми управління мікрокліматом, реалізовані в Arduino IDE, забезпечують точне регулювання параметрів, безпеку та енергоефективність, використовуючи багатозадачність ESP32 для одночасної обробки даних і підтримки веб-інтерфейсу.

Програмне забезпечення інтегрує сенсори, виконавчі пристрої та веб-сервер, дозволяючи локальний і віддалений моніторинг. Апаратний прототип, складений на макетній платі, підтвердив працездатність схем і стабільність живлення. Тестування на симуляторі Wokwi та апаратній платформі показало відповідність

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи вимогам: відхилення температури не перевищують $\pm 1^{\circ}\text{C}$, вологості $\pm 3\%$, освітленості ± 10 люкс, із затримками реакції до 5 секунд. Аналіз стійкості довів надійність системи при збоях сенсорів, перегріві, втраті Wi-Fi та відключенні живлення, а оптимізація знизила енергоспоживання на 30% і підвищила надійність до 98%.

Розроблена система є економічно вигідним, гнучким і надійним рішенням для автоматизації тераріумів, придатним для приватного та професійного використання. Її відкрита архітектура дозволяє адаптувати систему до різних видів тварин і умов, а результати роботи можуть бути застосовані в інших сферах, таких як акваріумістика чи тепличне господарство. Подальший розвиток системи може включати інтеграцію з хмарними платформами та додавання сенсорів для розширення функціоналу.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Cahyani D. S. M., Ikhsan M. Implementation of Sugeno Fuzzy Logic Method as an Automatic Humidity and Moisture Control System in Terrarium. *International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS)*.2024. Vol. 6(2). P.101-113.
2. Mochammad D., Budi A. H. S. IoT Based Monitoring System of Moss Terrarium Cultivation. *In 2021 3rd International Symposium on Material and Electrical Engineering Conference (ISMEE)*.2021. p. 353-356.
3. Singh R., Hussain A., Fezaa L. H., Gupta G., Singh A. P., Dogra A. Greenhouse Automation System Using ESP32 and ThingSpeak for Temperature, Humidity, and Light Control. *In International Conference on Data & Information Sciences*. 2023.p. 507-515.
4. Rebaudo F., Soulard T., Condori B., Quispe-Tarqui R., Calatayud P. A., Chavez V. S., Bessière L. A low-cost IoT network to monitor microclimate variables in ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol.14(4). P.1025-1034.
5. Anilkumar A. K., Joseph A., Paul J. AN IoT-BASED REAL-TIME MICROCLIMATE MONITORING AND CONTROLLING SYSTEM FOR GREENHOUSE. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*. 2024. Vol.23(12).
6. Jamaluddin T. A. A., Nur F. S., Tahir S. M., Achmad, A. D., Reskyanto A. Temperature and Humidity Control in a Small-Scale Greenhouse in a Tropical Climate. *Salaga Journal*. 2025. P.6-10.
7. Huidrom Dayananda S., Thaneswer P., Hijam Jiten S., Naseeb S., Anubhab P. Design and implementation of an IoT-based microclimate control system for oyster mushroom cultivation.
8. Lefevre A., Malet-Damour B., Boyer H., Rivière G. Advancing Urban Microclimate Monitoring: The Development of an Environmental Data Measurement Station Using a Low-Tech Approach. 2024. Vol. 16(7). P.3093.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Bagaskara A. T., Hasman N. A., Maharum S. M. M., Irawati I. D. Analysis of the Influence of Human Activity and Weather on Open Space Areas. *Journal of Engineering Technology*. 2023. Vol.11(1). P.41-45.

10. Gavilanes J. D., Pulla D. A., Tierra-Llana A., Reyes F., Isa-Jara R. An IoT System for Monitoring and Controlling Microclimates using Fuzzy Logic Applied to a Vermicompost Culture. *In 2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. 2024. p. 1-6.

11. Nouredine S., Mohammed B., Abdelmadjid M. K. An IoT-Based System to Control the Greenhouse's Microclimate. *In International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*. 2023. p. 3-13.

12. Nurwarsito H., Ali Syaugi Alkaf M. Development of LoRa Multipoint Network Integrated with MQTT-SN Protocol for Microclimate Data Logging in UB Forest. *International Journal of Computing and Digital Systems*. 2024. Vol.17(1). P.1-16.

13. Sah S. K., Murugesan K., Elangovan R. Optimization of energy consumption for indoor climate control using Taguchi technique and utility concept. *Science and Technology for the Built Environment*. 2021. Vol.27(10). P.1473-1491.

14. Wang H., Lu H. Climate controls on evolution of grassland ecosystems since late Cenozoic: A phytolith perspective. *Earth-Science Reviews*. 2022. Vol.231. p.104059.

15. van Oorschot F., van der Ent R. J., Hrachowitz M., Alessandri A. Climate-controlled root zone parameters show potential to improve water flux simulations by land surface models. *Earth System Dynamics*. 2021. Vol.12(2). P.725-743.

16. Lan H., Hou H. C., Gou Z., Wong M. S., Wang Z. Computer vision-based smart HVAC control system for university classroom in a subtropical climate. *Building and Environment*. 2023. P.242.

17. Babalola T. E., Babalola A. D., Olokun M. S. Development of an ESP-32 Microcontroller Based Weather Reporting Device. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2022. P.27-38.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Harianto D., Bintang H. S., Ardiyanto A., Widyawan V. L. D. Development and Evaluation of an ESP32-based Temperature and Humidity Control Unit for Textile Storage. *International Journal of Engineering Continuity*. 2025. Vol.4(1). P.1-19.

19. Megantoro P., Aldhama S. A., Prihandana G. S., Vigneshwaran P. IoT-based weather station with air quality measurement using ESP32 for environmental aerial condition study. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2021. Vol. 19(4). P.1316-1325.

20. Khan S. M., Mahi M. T., Rasheduzzaman M. Design and Implementation of a Low-Cost Weather Monitoring System using ESP-NOW. *In 2024 13th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*. 2024. p. 437-442.

21. Myint K. Z. Z., Aye M., Hla T. T. An IoT-Based Real Time Temperature and Humidity Monitoring and Data Logging System Using ESP32. *In 2024 5th International Conference on Advanced Information Technologies (ICAIT)*. 2024. p. 1-6.

22. Cordova Yangali I. M., Guillermo Vilcapoma G. S. M., Lazo Tapia L. D., Infante Vidalon A. M. Monitoring a web page and Implementation of an Autonomous Smart IoT Device with ESP32 for Automatic Detection and Regulation of Thermal Comfort in closed environments. *In Proceedings of the 2024 3rd International Conference on Algorithms, Data Mining, and Information Technology*. 2024. p. 304-310.

23. Asma T., Amira H., Hfaiedh M. Intelligent internal climate control system for agricultural greenhouses based on IoT technology. *In 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2023. p. 2654-2658.

24. Ezema L. S., Ifediora E. C., Olukunle A. A., Onuekwusi N. C. Design and implementation of an Esp32-Based smart embedded industrial poultry farm. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2021. Vol. 6(3). P.103-108.

25. Khalid N. K. M., Jamal N., Mustafa F., Zambri N. A., Abdullah M. S. R. Solar Power IoT Based Smart Agriculture System Using NodeMCU ESP32. *Progress in Engineering Application and Technology*. 2024. Vol.5(1). P.95-102.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Muhammad U., Muhammad D. ENVIRONMENTAL CONDITION MEASUREMENT SYSTEM WITH A MINI WEATHER STATION USING ESP32. *Jurnal Media Elektrik*. 2023. Vol.21(1). P.34-43.

27. Navarrete-Sanchez M. A., Olivera-Reyna R., Olivera-Reyna,R., Perez-Chimal R. J., Munoz-Minjares J. U. IoT-Based Classroom Temperature Monitoring and Missing Data Prediction Using Raspberry Pi and ESP32. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2025. Vol.6(1).

28. Musadek A., Suryono W., Budiarto A., Moonlight L. S. ANALYSIS WEATHER CONDITION SYSTEM DESIGN BASED ON DATABASE BY INTERNET OF THINGS PLATFORM. *In Proceeding of International Conference of Advanced Transportation, Engineering, and Applied Social Science*. 2023. Vol. 2. p. 1043-1049.

29. Pereira G. P., Chaari M. Z., Daroge F. IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *IoT*. 2023. Vol.4(3). P.221-243.

30. Tsyurulnyk S., Tsyurulnyk M., Potapova N., Semenov A., Tromsyuk V. The climate control system using ESP8266 and Arduino IoT Cloud. *In CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3309. P. 462-477.

31. Satria B., Rahmaniar R., Dalimunthe M. E. An Implementation Iot Weather Station Based On ESP 32. *Jurnal Scientia*. 2024. Vol.13(04). P.1453-1460.

32. Qasim H. H., Abbas W. F., Tawfeeq N. H., Jasim E. H., Hamza A. E., Hussein W. A., Altmemi J. M. Enhancing Weather Monitoring: A Comprehensive Study Utilizing IoT, ESP32, Sensor Integration, and Blynk Platform. *In 2024 IEEE 10th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. 2024. p. 156-161.

33. Gogoi K., Semwal N., Kumar D., Uniyal A., Kumar A.. Greenhouse Environmental Monitoring and Control Using ThingSpeak. *Journal of Innovative Energy Systems*. 2025. Vol.1(1). P.1-10.

34. Sharma P., Pandkar M., Nambiar S. Wireless greenhouse monitoring using ESP32 and sensor array for sustainable crop production. *In 2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things*. 2024. p. 1-6.

35. Maheswaran S., Gomathi R. D., Sathesh S., Poovizhi S., Ridhish R., Nanthakkumaran S., Chinnadurai M. Intelligent Cold Chain Security: Nano Power Temperature Sensors ESP32 and Telegram Bot Integration for Temperature Assurance and Environmental Harm Prevention. *J. Environ. Nanotechnol.* 2024. Vol.13(1). P.17-25.

36. Harit V., Gulati G., Sinha R., Kumar A., Balaji P., Kumar R. IoT-Enabled Weather Analysis and Monitoring System with Intelligent Climate Sense System. *Cuestiones de Fisioterapia*. 2025. Vol.54(2). P.1492-1500.

37. Boralkar R. R., Kulkarni S. S. IoT Based Smart Agriculture System Using ESP32. *In 2024 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC)*. 2024. p. 1-7.

38. Sinambela M., Nugraha M. R., Widodo A., Kadir J. S. P., Yasir A. M., Aji T. W. IoT-Based Air Quality Monitoring System Design and Development Using ESP32. *In 2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. 2024. p. 1-6.

39. Al-Nayyef H. The Climate Smart System with Water Machine Control. *Journal La Multiapp*. 2023. Vol.4(2). P.49-58.

40. Gonçalves V., Daniel J., Gonçalves C. Environmental Control and Energy Consumption Monitoring. *New Trends in Disruptive Technologies, Tech Ethics, and Artificial Intelligence: The DITTET 2024 Collection, 194*. 2024.

41. Pithadiya B., Parikh H., Savaliya J., Sidapara A., Gosai K., Vyas D., Pandya H. N. An IoT Based Greenhouse Control System Employing Multiple Sensors, for Controlling Soil Moisture, Ambient Temperature and Humidity. *In Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics*. 2022. p. 405-416.

42. MANZANERO-VAZQUEZ D. J., MANRIQUE-EK J. A., CARDOZO-AGUILAR G., DECENA-CHAN C. A. Internet of things applied to agriculture using the

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ESP32 module in connection with the Ubidots platform. *Journal of Technological Prototypes/Revista de Prototipos Tecnológicos*. 2021. Vol. 7(20).

43. Vaca-Vallejo K., Balseca-Dahua B., Vaca-Barahona A., Ponce-Pinos J., Morales-Gordon J., Isa-Jara R. A technology system for monitoring and predicting climate variables in an experimental greenhouse using IoT and Machine Learning. *In 2024 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*. 2024. p. 1-6.

44. Kumar V., Upmanu V., Chauhan R. P. S., Sharma N., Kumar B. V., Zadoo M. Real-Time Environmental Monitoring and Control for Ensuring Optimal Temperature and Humidity Conditions for Patient Comfort and Medical Equipment Integrity. *In 2024 3rd International Conference on Sentiment Analysis and Deep Learning (ICSADL)*. 2024. p. 558-562.

45. Mahetaliya S., Makwana D., Pujara A., Hanumante S. IoT based air quality index monitoring using ESP32. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2021. Vol.8(04). P.5186-5192.

46. Jaywant A. P., Desai A. S. Cloud-Integrated Precision Agriculture with LoRaWAN and ESP32. *In 2024 5th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*. 2024. p. 619-624.

47. Myint K. Z. Z., Aye M., Hla, T. T. Weather Monitoring and Prediction System for Rice Cultivation in Mandalay Using IoT and Machine Learning. *The Indonesian Journal of Computer Science*. 2025. Vol.14(1).

48. Kurniasari, A. A., Puspitasari, P. S. D., Perdnasari, L., & Yuana, D. B. M. (2025). Enhancing Hydroponic Systems with ESP32: An IoT Approach to Real-Time Monitoring and Automation. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1446, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.

49. Chouhan K., Geetha K., Chinthamu N., Negi P., Kamalakar V. An Efficient Network and IoT System Architecture for Temperature and Relative Humidity Monitoring. *In Technological Applications for Smart Sensors*. 2025. p. 427-445.

50. Mengov V., Komitov N., Komitov G., Kehayov E., Popova K. Development of an Autonomous System for Control of the Irrigation Regime of Agricultural Production

in a Greenhouse. In ENVIRONMENT. TECHNOLOGY. RESOURCES. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2025. Vol. 1. p. 371-375.

					КВРКІ.210114.21.01.71 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Додаток Г
(обов'язковий)

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

```
#include <DHT.h>
#include <BH1750.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <FastLED.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <AsyncTCP.h>
#include <WiFi.h>

#define DHTPIN1 4
#define DHTPIN2 5
#define DHTTYPE DHT22
#define LED_PIN 15
#define NUM_LEDS 30
#define RELAY_HEATER 13
#define RELAY_HUMIDIFIER 14
#define RELAY_FAN 16
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64

DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE);
BH1750 lightMeter;
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
CRGB leds;
AsyncWebServer server(80);

const char* ssid = "WiFi_Name";
const char* password = "WiFi_Password";
float temp1, temp2, hum1, lux;
float targetTemp = 35.0, targetHum = 70.0;
const float maxTemp = 40.0, maxHum = 90.0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dht1.begin();
  dht2.begin();
  Wire.begin();
  lightMeter.begin();
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  FastLED.addLeds<WS2812B, LED_PIN, GRB>(leds, NUM_LEDS);
  pinMode(RELAY_HEATER, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_HUMIDIFIER, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_FAN, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_HEATER, LOW);
```

```

digitalWrite(RELAY_HUMIDIFIER, LOW);
digitalWrite(RELAY_FAN, LOW);

WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.println("Connecting to WiFi...");
}
Serial.println(WiFi.localIP());

server.on("/", HTTP_GET, (AsyncWebServerRequest *request){
    String html = "<html><body><h1>Terrarium Control</h1>";
    html += "<p>Temp Zone 1: " + String(temp1) + " C</p>";
    html += "<p>Temp Zone 2: " + String(temp2) + " C</p>";
    html += "<p>Humidity: " + String(hum1) + " %</p>";
    html += "<p>Light: " + String(lux) + " lux</p>";
    request->send(200, "text/html", html);
});
server.begin();
}

void loop() {
    temp1 = dht1.readTemperature();
    hum1 = dht1.readHumidity();
    temp2 = dht2.readTemperature();
    lux = lightMeter.readLightLevel();

    if (isnan(temp1) || isnan(hum1) || isnan(temp2)) {
        Serial.println("Sensor error!");
        digitalWrite(RELAY_HEATER, LOW);
        digitalWrite(RELAY_HUMIDIFIER, LOW);
        return;
    }

    if (temp1 < targetTemp && temp1 < maxTemp) {
        digitalWrite(RELAY_HEATER, HIGH);
    } else if (temp1 >= maxTemp) {
        digitalWrite(RELAY_HEATER, LOW);
    }

    if (hum1 < targetHum && hum1 < maxHum) {
        digitalWrite(RELAY_HUMIDIFIER, HIGH);
        delay(10000);
        digitalWrite(RELAY_HUMIDIFIER, LOW);
    }

    if (millis() % 1800000 == 0 && hum1 >= targetHum) {
        digitalWrite(RELAY_FAN, HIGH);
        delay(30000);
        digitalWrite(RELAY_FAN, LOW);
    }
}

```

```

    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime % 86400000 >= 25200000 && currentTime % 86400000 <
68400000) {
        for (int i = 0; i < NUM_LEDS; i++) {
            leds = CRGB(255, 255, 255);
        }
        FastLED.show();
    } else {
        FastLED.clear();
        FastLED.show();
    }

    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("T1: "); display.print(temp1); display.println(" C");
    display.print("T2: "); display.print(temp2); display.println(" C");
    display.print("H: "); display.print(hum1); display.println(" %");
    display.print("L: "); display.print(lux); display.println(" lux");
    display.display();

    delay(2000);
}

```

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Віктор КРАВЧУК

Співавтор:

Назва: Кравчук_Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.7%

Коефіцієнт подібності 2: 1%

Мікропробіли: 106

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-18 17:43:22.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-18

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionary check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 14%

ID: 246765 Title: БКР Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32 Added in a DB: 2025-06-18 Authors: Віктор КРАВЧУК Heads: Ігор МИХАЛЬЧУК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	105325	807	1066 (1%)	16 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Кравчук Віктор Володимирович

Тема: Система контролю мікроклімату в тераріуму на базі ESP32

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3. Кількість сторінок записки 59.

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування системи контролю мікроклімату в тераріуму на базі ESP32.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області (аналіз потреб мікроклімату для мешканців тераріумів, огляд існуючих систем мікроклімату та їх функціональність, обґрунтування використання мікроконтролера ESP32). В другому розділі проведено аналіз та підбір компонентів для проектування та розробки системи контролю мікроклімату, розробку структурної, функціональної та принципової схем системи. В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано алгоритм функціонування системи, розглянуто підготовку середовища для розробки програмного забезпечення, реалізовано програмно-апаратну частину системи контролю мікроклімату, проведено тестування прототипу системи.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: обмежене графічне оформлення (недостатнє візуальне представлення інформації, що ускладнює сприйняття технічних рішень та результатів).
6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на достатньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Гелух Михайло Володимирівич, викладач, ур-
арішольді, кафедри кібербезпеки

"18" 06 2025 р.

МГ (підпис)

Завідувачу кафедри КІС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Вікторі КРАВЧУКА

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

30.05 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Система контролю мікроклімату в тераріумі на базі ESP32

Автор: Віктор КРАВЧУК

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Ігор МИХАЛЬЧУК, асистент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:


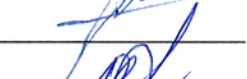

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами;
- 4) знайдені текстові спотворення, а саме наявність мікропробілів, свідчать про технічні помилки при конвертації та збереженні документа.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3,7% і адресується до 31 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Ігор МИХАЛЬЧУК

Андрій НІЧЕПОРУК

Ольга ПАВЛОВА