

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**РОЗУМНЕ ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО НА ОСНОВІ ІНТЕРНЕТУ
РЕЧЕЙ**

**SMART PRECISION FARMING BASED ON THE INTERNET OF
THINGS**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІМ-21
Ковальчук Павло Олександрович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Поліщук Микола Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« » грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т. Терлецький

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ковальчуку Павлу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Розумне точне землеробство на основі Інтернету речей

Керівник роботи к.т.н., доцент Поліщук Микола Миколайович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» червня 2025 року №0 290/01-02

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

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

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

Вступ

Теоретичні основи розумного точного землеробства на основі IoT

Апаратна реалізація системи розумного землеробства

Методика та результати експериментального дослідження

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Теоретичні основи розумного точного землеробства на основі IoT</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Апаратна реалізація системи розумного землеробства</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Методика та результати експериментального дослідження</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 18.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 26.08.2025 р.	
2	<i>Теоретичні основи розумного точного землеробства на основі IoT</i>	до 04.09.2025 р	
3.	<i>Апаратна реалізація системи розумного землеробства</i>	до 24.09.2025 р.	
4.	<i>Реалізація експериментального дослідження</i>	до 12.10.2025 р.	
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	До 25.10.2025 р	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 27.10.2025 р.	
7.	<i>Формування додатків</i>	До 30.10.2025 р.	
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	До 05.11.2025 р.	
9..	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	До 11.11.2025 р.	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	До 29.11.2025 р.	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 02.12.2025 р.	
12.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедрі</i>	До 09.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ковальчук П.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Поліщук М.М.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ковальчук П. О. Розумне точне землеробство на основі Інтернету речей. Рукопис.

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

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

У першому розділі було розкрито теоретичні основи точного землеробства, проведено огляд архітектурних підходів до побудови IoT-систем та проаналізовано ключові апаратні засоби, що застосовуються у цифровому агромоніторингу. Було встановлено, що IoT-інфраструктура є базовою передумовою реалізації Smart Farming, оскільки забезпечує збір високоточних даних про стан ґрунтів, мікроклімат, рослинність і роботу техніки.

У другому розділі розроблено апаратно-програмну архітектуру системи розумного точного землеробства. Було вибрано апаратні компоненти, сформовано їх структурну схему та розроблено прототип IoT-вузла на базі мікроконтролера ESP з підтримкою Wi-Fi.

У третьому розділі проведено тестування та оцінку працездатності запропонованої системи в умовах, наближених до реальних. Було встановлено, що розроблений комплекс демонструє стабільну роботу, забезпечує коректні вимірювання агропараметрів і дозволяє оперативно реагувати на зміну стану живильного розчину чи мікроклімату.

Ключові слова: IoT, сенсорні мережі, цифрові агротехнології, автоматизація поливу, моніторинг параметрів ґрунту, хмарні сервіси, Smart Farming.

ANNOTATION

Kovalchuk P. Smart precision farming based on the Internet of Things. Manuscript. Master's degree thesis in the field of Computer Engineering, specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and an appendix.

The first chapter revealed the theoretical foundations of precision farming, reviewed architectural approaches to building IoT systems, and analyzed key hardware used in digital agricultural monitoring. It was found that IoT infrastructure is a basic prerequisite for the implementation of Smart Farming, as it provides the collection of high-precision data on the state of soils, microclimate, vegetation, and the operation of equipment.

The second chapter developed the hardware and software architecture of the smart precision farming system. Hardware components were selected, their structural diagram was formed and a prototype of an IoT node based on an ESP microcontroller with Wi-Fi support was developed.

In the third section, testing and evaluation of the performance of the proposed system were carried out in conditions close to real ones. It was found that the developed complex demonstrates stable operation, provides correct measurements of agroparameters and allows you to quickly respond to changes in the state of the nutrient solution or microclimate.

Keywords: IoT, sensor networks, digital agricultural technologies, irrigation automation, soil parameter monitoring, cloud services, Smart Farming.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗУМНОГО ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ОСНОВІ ІоТ	10
1.1 Поняття, принципи та етапи розвитку точного землеробства	10
1.2 Інтернет речей у сільському господарстві: архітектура та функціональні компоненти	14
1.3 Методологія дослідження системи розумного точного землеробства.....	16
1.4 Огляд сучасних наукових підходів і рішень у сфері Smart Farming.....	18
РОЗДІЛ 2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА.....	23
2.1 Розробка архітектури ІоТ-системи Smart Agro.....	23
2.2 Вибір і характеристика апаратних компонентів.....	25
2.2.1 Вибір мікроконтролерної платформи системи Smart Agro	25
2.2.2 Сенсорна підсистема: датчики вологості, температури, освітленості, рН грунту	27
2.2.3 Комунікаційні модулі.....	30
2.2.4 Енергозабезпечення.....	31
2.3 Розробка схеми підключення компонентів	32
2.4 Програмне забезпечення системи Smart Agro	34
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	37
3.1 Постановка експерименту та умови випробувань.....	37
3.2 Методика збору та обробки даних	39
3.3 Перспективи вдосконалення системи розумного точного землеробства ..	46
ВИСНОВКИ.....	51
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53
ДОДАТКИ.....	58

ВСТУП

Стрімкий розвиток цифрових технологій, глобальна автоматизація виробничих процесів і зростання потреби в ефективному управлінні ресурсами зумовили появу нового етапу еволюції аграрної галузі – переходу до концепції розумного точного землеробства (Smart Precision Farming). Сучасне сільське господарство дедалі більше інтегрує інтелектуальні системи моніторингу, роботизовані засоби, сенсорні мережі, геоінформаційні технології та алгоритми штучного інтелекту. Відповідно, ключову роль у формуванні цифрової інфраструктури агросектору відіграють саме комп'ютерні інженери – фахівці, які здатні створювати, програмувати, розгортати та підтримувати комплексні апаратно-програмні рішення.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вирішення низки критичних проблем аграрної галузі: нераціонального використання водних і мінеральних ресурсів, деградації ґрунтів, зростання виробничих витрат, нестабільності кліматичних умов та підвищених ризиків втрат урожаю. Точне землеробство, яке ґрунтується на персоналізованому управлінні кожною ділянкою поля, потребує високоточної та безперервної інформації про стан агроєкосистеми. Такі можливості забезпечує технологічна екосистема Інтернету речей (Internet of Things, IoT), що дозволяє у реальному часі збирати дані з розгалуженої мережі сенсорів, передавати їх через енергоефективні бездротові протоколи, здійснювати обробку на периферійних пристроях і в хмарних сервісах, а потім використовувати результати аналітики для прийняття автоматизованих рішень.

Інтернет речей у точному землеробстві дає змогу отримувати інформацію про вологість і температуру ґрунту, рівень освітленості, стан рослинності, якість води, кліматичні показники, переміщення техніки й тварин, а також здійснювати контроль систем зрошення, метеостанцій, дронів та аграрних роботів. Таким чином формуються кіберфізичні системи (Cyber-Physical Systems), що забезпечують повний цикл автоматизації – від отримання первинних датчиків до

прийняття керуючих рішень, що відповідає сучасним тенденціям розвитку комп'ютерної інженерії.

Незважаючи на значний науковий прогрес, залишається низка викликів, пов'язаних із побудовою ефективної архітектури IoT у сільському господарстві, оптимізацією обміну даними, адаптацією сенсорів до агресивних середовищ, захистом інформації, стандартизацією протоколів зв'язку, енергоефективністю периферійних пристроїв та інтеграцією аналітичних моделей. Це робить тему дослідження актуальною як у національному, так і у світовому науковому просторі, а також важливою для розвитку вітчизняного аграрного сектору.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробленні, аналізі та експериментальній апробації апаратно-програмної системи розумного точного землеробства на основі технологій Інтернету речей. Для досягнення мети передбачено вирішення таких завдань:

- дослідити теоретичні засади точного землеробства та архітектуру IoT; вибрати апаратне забезпечення;
- розробити схему підключення компонентів системи розумного землеробства;
- описати методику збору, передачі й аналізу даних;
- здійснити тестування ефективності системи в умовах, наближених до реальних;
- запропонувати вдосконалення системи розумного точного землеробства.

Предметом дослідження є методи, моделі та апаратно-програмні засоби реалізації систем точного землеробства на базі IoT.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та управління агротехнологічними операціями в системах розумного землеробства.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні структурованої IoT-архітектури, що об'єднує сенсорні мережі, комунікаційні протоколи, периферійні обчислення та хмарні аналітичні сервіси, а також у створенні апаратно-програмного прототипу, здатного забезпечувати автономний моніторинг параметрів агроєкосистеми та формування керуючих впливів на

основі даних у реальному часі. Практичне значення полягає у можливості інтеграції створеного рішення в агропідприємства різного масштабу, підвищенні продуктивності, зниженні собівартості виробництва та мінімізації екологічних ризиків.

Таким чином, дослідження поєднує сучасні підходи комп'ютерної інженерії, цифрового землеробства та інтелектуальних систем, забезпечуючи комплексний підхід до створення новітніх аграрних технологій. З огляду на актуальність, наукову та практичну вагу, обрана тема має значний потенціал подальшого розвитку та впровадження.

Публікація. Основні результати дослідження кваліфікаційної роботи висвітлено у науковій статті в Технічних вістях [1].

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗУМНОГО ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ОСНОВІ ІОТ

1.1 Поняття, принципи та етапи розвитку точного землеробства

Сучасне сільське господарство переживає трансформацію від традиційних методів вирощування до високотехнологічних цифрових систем, що базуються на Інтернеті речей (ІоТ), аналітиці даних та автоматизованому управлінні аграрними процесами. Концепція розумного точного землеробства (Smart Precision Farming) передбачає впровадження кіберфізичних систем, здатних у режимі реального часу здійснювати моніторинг та регулювання мікрокліматичних параметрів – температури, вологості та рівня поживних речовин у середовищі вирощування.

Точне землеробство визначається як інтегрована система управління ресурсами, що використовує інформаційні технології для забезпечення оптимального використання ґрунтових, водних і енергетичних ресурсів з метою підвищення продуктивності при мінімізації екологічного впливу [2]. На відміну від традиційного агровиробництва, де параметри середовища оцінюються періодично, Smart Farming дозволяє безперервно контролювати стан агрооб'єктів і автоматично коригувати параметри системи (наприклад, полив, дозування поживних речовин або вентиляцію теплиці).

Відповідно до дослідження [2], архітектура ІоТ-системи точного землеробства включає три основні рівні:

- сенсорний рівень – набір датчиків температури, вологості, освітленості, рН та рівня поживних речовин;
- контролерний рівень – мікроконтролери Arduino або ESP32, що збирають дані з сенсорів і передають їх через бездротові мережі Wi-Fi або LoRa;
- хмарний рівень – сервер або ІоТ-платформа, де здійснюється збереження, обробка й аналітика отриманих даних.

На рисунку 1.1 зображено спрощену архітектуру системи розумного точного землеробства.

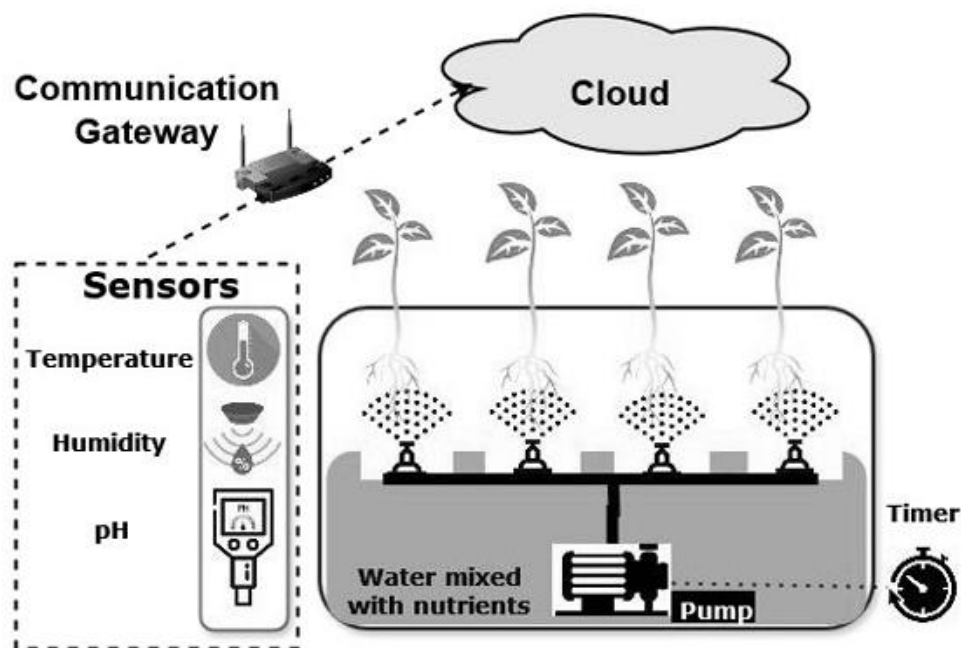


Рисунок 1.1 – Архітектура системи розумного точного землеробства на основі IoT [2]

Ефективне функціонування систем точного землеробства ґрунтується на поєднанні трьох ключових принципів – диференційованого управління, збирання даних та автоматизації. Вони формують основу сучасного підходу до управління агроекосистемами, що забезпечує раціональне використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва. Як зазначають науковці: «ефективна реалізація цих принципів дає можливість створити адаптивні агросистеми, що реагують на зміни мікроклімату та стану рослин у режимі реального часу, забезпечуючи оптимальні умови вирощування та сталий розвиток аграрного сектору» [3].

Принцип диференційованого управління передбачає адаптацію агротехнологічних процесів до просторових і часових відмінностей параметрів ґрунту, клімату та біологічного стану рослин. Застосування цього принципу стало можливим завдяки розвитку технологій глобального позиціонування

(GPS), безпілотного моніторингу та геоінформаційних систем, що забезпечують зональне управління полем у реальному часі.

Другим фундаментальним принципом точного землеробства є безперервне збирання даних про стан ґрунту, рослин та довкілля з використанням сенсорних мереж і технологій Інтернету речей (IoT). Система сенсорів вимірює ключові параметри – температуру, вологість, освітленість, рівень поживних речовин, рН, а також мікрокліматичні зміни в теплицях чи на відкритих полях [4]. Зібрані дані передаються до хмарної IoT-платформи, де вони зберігаються, обробляються та аналізуються за допомогою алгоритмів машинного навчання.

У контексті розумного землеробства автоматизація охоплює системи поливу, клімат-контролю, освітлення, подачі поживних розчинів та енергоменеджменту. Автоматизація, у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту, перетворює точне землеробство на самонавчальну систему управління, здатну адаптуватися до змінних умов зовнішнього середовища [5].

Концепція точного землеробства виникла наприкінці ХХ століття як відповідь на необхідність підвищення ефективності використання природних ресурсів у сільському господарстві. Перші дослідження у цій сфері з'явилися у 1980-х роках у США та Європі, коли аграрії почали застосовувати супутникову навігацію (GPS) для картографування врожайності полів і моніторингу стану ґрунту [3]. Це дало змогу здійснювати зональне управління полями – визначати ділянки з різною родючістю та адаптувати норми добрив і зрошення до конкретних умов. На цьому етапі було закладено основи просторової агроінформатики, що поєднує геоінформаційні системи (GIS), дистанційне зондування Землі та автоматизовані прилади вимірювання.

Подальший розвиток концепції відбувався у 2000-х роках завдяки поширенню цифрових технологій і сенсорних систем. Аграрні підприємства почали впроваджувати автоматизовані метеостанції, датчики вологості, рН-метри та безпілотні літальні апарати для спостереження за станом рослин. З появою доступних мікроконтролерів та бездротових мереж розпочалася інтеграція розподілених сенсорних вузлів, що стали основою сучасного

Інтернету речей (IoT). Цей перехід позначив початок цифрового землеробства (Digital Farming), де ключову роль відіграють дані, зібрані у реальному часі, а прийняття агротехнічних рішень ґрунтується на аналітичних моделях [4].

Сучасний етап, який триває з середини 2010-х років, характеризується переходом від цифровізації до розумного (Smart) землеробства, що базується на концепції кіберфізичних систем і IoT-платформ. Як зазначено у дослідженні [2], сучасні системи Smart Precision Farming використовують мережі сенсорів для безперервного моніторингу таких параметрів, як температура, вологість та рівень поживних речовин, що забезпечує стабільний мікроклімат у теплицях і лабораторних умовах безґрунтового вирощування. Інтеграція хмарних технологій, машинного навчання та мобільних застосунків дозволила сформувати адаптивну екосистему управління агровиробництвом, яка є основою майбутнього сталого розвитку сільського господарства.

Згідно з сучасними дослідженнями, розвиток точного землеробства проходив чотири етапи:

- етап механізації (до 1980 р.) – упровадження механічних машин для обробки ґрунту;
- етап комп'ютеризації (1980-2000 рр.) – поява електронних приладів і датчиків у сільському господарстві;
- етап автоматизації (2000-2015 рр.) – використання GPS-навігації, дронів, сенсорних систем;
- етап цифровізації та IoT (з 2015 р.) – створення розподілених мереж сенсорів, аналітичних хмарних систем і мобільних додатків для дистанційного моніторингу [3, 4].

Технології IoT забезпечують високу точність агрономічних рішень через інтеграцію великої кількості сенсорних вузлів, що дають змогу не лише вимірювати параметри середовища, але й реалізовувати зворотний зв'язок, наприклад, автоматичне увімкнення зрошення, регуляцію подачі поживного розчину чи запуск вентиляції теплиці. Таким чином, IoT-підхід сприяє

формуванню адаптивних моделей управління агросистемою, що базуються на даних реального часу.

Таким чином, сучасне точне землеробство є результатом багаторічної еволюції аграрних технологій. Його розвиток сприяв формуванню інтелектуальних систем управління агроєкосистемами, здатних самостійно контролювати стан середовища, адаптувати параметри технологічних процесів та забезпечувати стабільне виробництво сільськогосподарської продукції.

1.2 Інтернет речей у сільському господарстві: архітектура та функціональні компоненти

Інтернет речей (IoT) є технологічною основою сучасного точного землеробства, що забезпечує взаємодію між фізичними пристроями, сенсорними вузлами та інформаційними системами в єдиному цифровому середовищі. Завдяки IoT стає можливим збирання, передача, аналіз та використання даних у режимі реального часу, що сприяє підвищенню ефективності агротехнологічних процесів, зменшенню людського фактора та оптимізації використання природних ресурсів [2, 4].

Архітектура IoT-систем у сільському господарстві ґрунтується на чотирирівневій моделі (рис. 1.2), яка відображає логічну послідовність обробки:

- сенсорний рівень є базовим у структурі IoT-системи, оскільки забезпечує первинне збирання інформації про стан агрооб'єкта. До цього рівня належать датчики температури, вологості, рівня поживних речовин, освітленості, рН та електропровідності ґрунту, які здійснюють вимірювання фізичних параметрів і перетворюють їх на цифрові сигнали. Отримані дані передаються до мікроконтролера або шлюзу, наприклад Arduino, ESP32 чи Raspberry Pi, що виступають у ролі локальних вузлів обробки даних [2];

- комунікаційний рівень відповідає за обмін даними між сенсорними вузлами та серверною інфраструктурою. Для цього використовуються різні типи з'єднань: Wi-Fi, GSM/4G, ZigBee, Bluetooth Low Energy, LoRa або NB-IoT. Вибір

каналу зв'язку залежить від площі покриття, енергоспоживання та вимог до пропускної здатності. Для віддалених агрооб'єктів ефективним є застосування LoRaWAN, що забезпечує низьке енергоспоживання та дальність передачі сигналу до 10 км [4];

– аналітичний рівень виконує обробку, агрегацію та аналіз даних. На цьому етапі дані з сенсорів очищуються, нормалізуються та візуалізуються. Сучасні IoT-системи використовують технології штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування стану рослин, виявлення аномалій у мікрокліматі та оптимізації поливу або живлення [6];

– прикладний рівень забезпечує взаємодію користувача з системою через веб-інтерфейс або мобільний додаток. На цьому рівні здійснюється моніторинг показників, формування звітів, налаштування автоматичних сценаріїв (наприклад, «якщо вологість < 30%, увімкнути зрошення»). Таким чином, прикладний рівень перетворює результати аналізу в керуючі дії, що впливають на фізичні процеси агросередовища.



Рисунок 1.2 – Архітектура чотирирівневої IoT-системи для агросектору [7]

У системах точного землеробства особливе значення має вибір протоколів передачі даних, які визначають швидкість, надійність і стабільність зв'язку між пристроями. Комбінація протоколів MQTT, CoAP та LoRaWAN дає змогу забезпечити багаторівневу систему зв'язку, у якій короткодистанційні мережі (Wi-Fi, ZigBee) поєднуються з широкодіапазонними технологіями (LoRaWAN, GSM), що підвищує надійність і масштабованість IoT-інфраструктури [5, 8].

Зібрані дані з польових сенсорів зберігаються у хмарних сервісах, які виконують функції зберігання, обробки та аналітики. Популярними платформами є ThingSpeak, Blynk Cloud, Google Cloud IoT, AWS IoT Core, Azure IoT Hub, а також спеціалізовані рішення для аграрної галузі, такі як SmartFarmNet чи FarmBeats. Ці сервіси забезпечують візуалізацію параметрів середовища, віддалене керування пристроями та можливість створення автоматичних сценаріїв реагування.

Згідно з дослідженнями [5, 8], використання хмарних сервісів дозволяє зменшити навантаження на локальні контролери, забезпечити централізоване зберігання даних і доступ користувачів до системи з будь-якої точки світу. Крім того, аналітичні модулі цих платформ інтегруються зі штучним інтелектом, що дозволяє прогнозувати урожайність, рівень споживання води чи потребу в поживних речовинах. Таким чином, хмарна аналітика є ключовим елементом цифрової трансформації сільського господарства.

Отже, розвиток IoT у сільському господарстві є ключовим чинником переходу до розумного точного землеробства (Smart Precision Farming), орієнтованого на ефективність, екологічність та інтелектуалізацію агросектору.

1.3 Методологія дослідження системи розумного точного землеробства

У межах даного дослідження, об'єктом обрано систему розумного точного землеробства для безґрунтового вирощування рослин (soilless agriculture). Такий вибір обумовлений необхідністю переходу до сталих агротехнологій, що зменшують залежність від родючості ґрунтів і забезпечують ефективне

використання ресурсів. Технології безґрунтового землеробства (гідропоніка, аеропоніка, аквапоніка) є оптимальними для впровадження IoT-підходів, оскільки дозволяють точно контролювати фізико-хімічні параметри середовища, зокрема температуру, вологість, рН і концентрацію поживних речовин.

Використання сенсорних вузлів і мікроконтролерів дає змогу організувати замкнуту систему моніторингу та управління, де дані з датчиків у реальному часі надходять на хмарну платформу, аналізуються та повертаються у вигляді керуючих дій. Отже, безґрунтове середовище є оптимальною моделлю для дослідження функціонування розумної IoT-системи точного землеробства в умовах лабораторної або тепличної експлуатації.

Основна гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що впровадження багаторівневої IoT-архітектури з використанням сенсорних вузлів, бездротової передачі даних і хмарної аналітики дозволить досягти стабільного контролю агропараметрів, підвищити ефективність ресурсокористування та забезпечити сталу врожайність.

Логічна структура дослідження подана на рисунку 1.3.

Схема демонструє п'ять взаємопов'язаних етапів – аналіз, проєктування, моделювання, експеримент, оцінка ефективності. Кожен етап передбачає зворотний зв'язок, що забезпечує уточнення архітектури та параметрів системи на основі результатів попередніх стадій.

Завдяки поетапному підходу забезпечується не лише обґрунтованість отриманих результатів, а й можливість багаторазової перевірки ефективності кожного компонента системи. Запропонована методологія дозволяє перейти від теоретичної моделі до практичного прототипу, що відповідає принципам точного землеробства й вимогам сталого розвитку аграрного сектору.

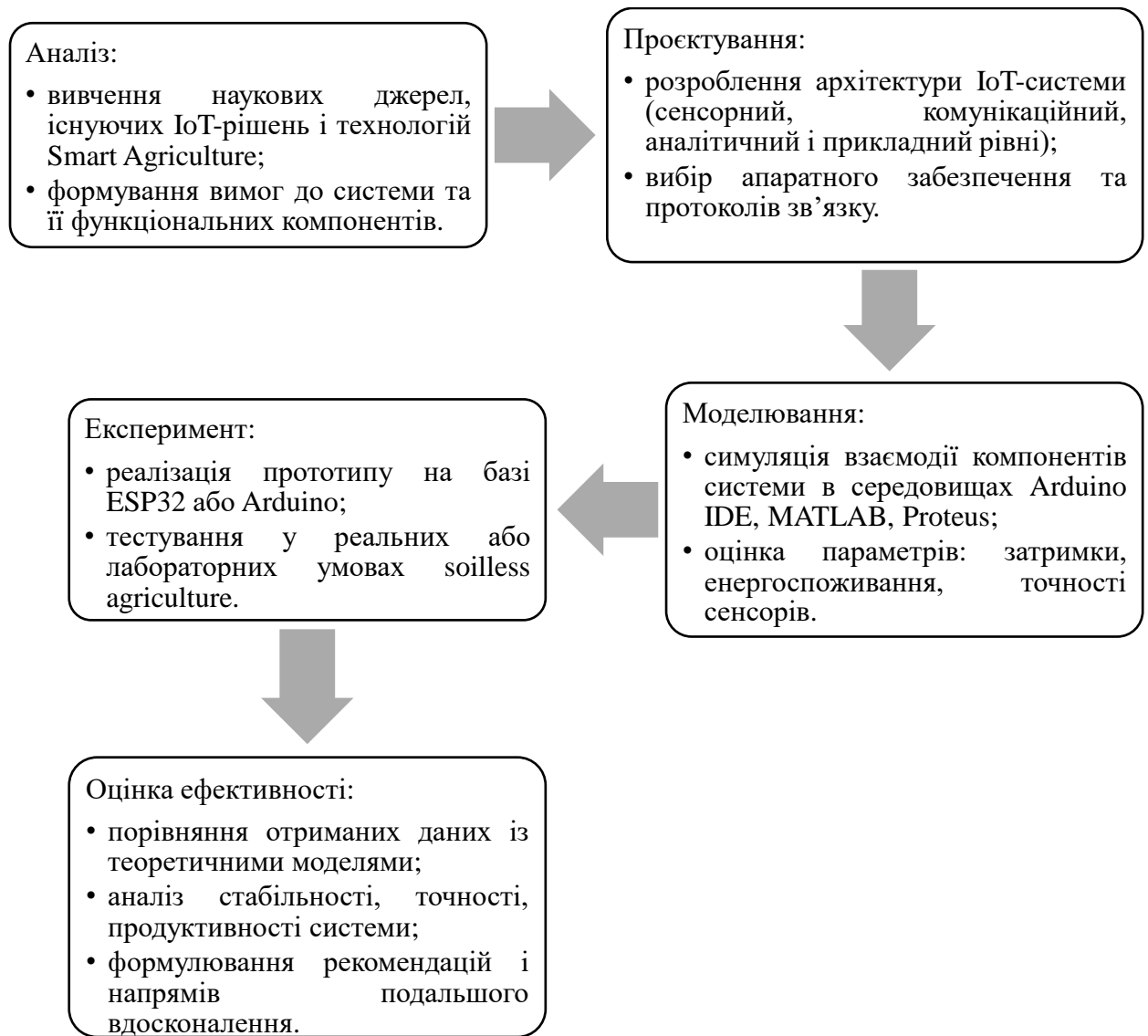


Рисунок 1.3 – Методологічна схема дослідження системи розумного точного землеробства [9]

1.4 Огляд сучасних наукових підходів і рішень у сфері Smart Farming

Сучасна наукова думка у сфері розумного точного землеробства зосереджується на пошуку ефективних способів інтеграції технологій Інтернету речей, штучного інтелекту, хмарних обчислень та аналітики даних у єдину адаптивну екосистему управління агропроцесами. Протягом 2025 року опубліковано низку досліджень, які сформуvalи концептуальні, архітектурні та прикладні засади розвитку Smart Agro – від впровадження IoT у безґрунтовому

землеробстві та використання сенсорних мереж до створення інтелектуальних моделей на основі машинного навчання й цифрових двійників.

Результати проаналізованих наукових підходів у галузі Smart Farming узагальнено у таблиці 1.1, це дозволяє простежити глобальні тенденції, а також оцінити рівень інтеграції Smart Farming-рішень у національний агротехнологічний простір.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика сучасних досліджень у сфері Smart Farming

Автор	Аналіз розробок	Приклади впроваджень в Україні
Dutta M., Sandhu J.K., Kaur M., Gupta D., Tharewal S., Goyal D., Alzubi A.A., Alanazi J.M. [2]	огляд IoT-систем у Soilless Agriculture: сенсори температури / вологості / поживних речовин, ESP32 / Arduino, MQTT / LoRaWAN, хмарна аналітика. Наголос на глобальній продбезпеці: керування мікрокліматом, зменшення споживання води та енергії, виклики калібрування сенсорів і кібербезпеки	пілотні гідропонні / аеропонні стенди у вишах (НУБіП, НУ «ЛП»): ESP32 + датчики ЕС / рН / температури, MQTT-брокер та дашборди (Blynk / ThingSpeak) для моніторингу й автополиву
Singh G., Sharma S. [10]	комплексний огляд IoT-архітектури: рівні (сенсорний - комунікаційний - аналітичний - прикладний), протоколи (MQTT / CoAP / LoRaWAN), інтероперабельність і стандарти даних (OGC, Sparkplug)	проекти «SmartGreenhouse UA» (Харків) та AgroIoT Platform (Київ): моніторинг вологості/температури через MQTT і веб-панелі
Dhanasekar S. [11]	критичні виклики: якість даних, енергоощадність вузлів, втрати пакетів, латентність; пропозиції – edge-аналітика, самодіагностика сенсорів, цифрові двійники теплиць/полів	тепличні господарства Одещини й Вінниччини: локальна обробка на ESP32, скорочення трафіку в хмару, стабілізація зрошення
Maged E.A. Mohammed, Muhammad Munir [12]	інтеграція AI + IoT: CNN/RNN для діагностики стресу й прогнозів, RL для оптимізації поливу/живлення; підхід Explainable AI та вимоги до відкритих датасетів	стартапи AgroAI Lab (Львів), FarmVision (Дніпро): аналіз зображень IoT-камерами, рекомендації поливу/добрих на основі ML
Ashwini A., Sriram S.R., Manoj Prabhakar J., Kadry S. [13]	Енд-ту-енд рішення: сенсори → шлюзи → LoRaWAN/NB-IoT → event-driven обробка → хмара/edge; OTA-оновлення, TLS/DTLS, ACL/RBAC	SmartAgroNet (ЛНТУ): LoRa-сенсори, керування мікрокліматом теплиць через Blynk Cloud, автоматизація поливу / вентиляції
Соколік В. Д., Хамітов Р. Р., Іваненко В. О., Безушко О. Є. [14]	Smart-community підхід: діджиталізація громад, AI та IoT як основа сталого управління ресурсами (вода, енергія, зелені зони)	стратегії «Smart City / Community» (Вінниця, Луцьк, Львів): моніторинг зелених зон, точний полив у муніципальних насадженнях

Варто відзначити, що ідеї та технологічні підходи, описані у світових наукових публікаціях [2, 10-13], поступово знаходять практичне застосування і в Україні. Університетські лабораторії та агротехнопарки (зокрема НУ «ЛП», НУБіП) впроваджують пілотні рішення для моніторингу мікроклімату в теплицях, автоматизованого поливу на основі IoT, а також тестують LoRaWAN-мережі для збирання даних з віддалених сенсорних вузлів. У проектах SmartGreenhouse UA та AgroIoT Platform реалізовано системи на базі ESP32 та Blynk Cloud, що відтворюють архітектуру, описану в [2; 10]. Крім того, у рамках ініціатив «Smart City/Community» кількох українських громад упроваджуються рішення для моніторингу зелених зон і точного зрошення, які корелюють із моделями сталого цифрового розвитку, наведеними в роботі [14].

У контексті розвитку Smart Farming варто відзначити низку праць, що висвітлюють історичну, технологічну та прикладну еволюцію цифрового землеробства.

Так, у роботі Балишева М. проаналізовано вплив індустріальних революцій на розвиток аграрної техніки та формування сучасної парадигми цифрового управління агропроцесами. Автор простежує перехід від механізації (Індустрія 2.0) до кіберфізичних систем (Індустрія 4.0) та обґрунтовує появу концепції Agriculture 5.0, у якій головну роль відіграють IoT, робототехніка, штучний інтелект і автономні агромашини [3]. Ця праця є важливою для розуміння історико-технологічної логіки становлення Smart Farming як результату довготривалої еволюції технічної думки.

Автори дослідження [4] підкреслюють, що поєднання AI та IoT є рушійною силою переходу від реактивного до прогностного управління агровиробництвом, де рішення приймаються на основі аналізу потоків сенсорних даних у режимі реального часу. У статті [5] описано успішні кейси автоматизації поливу, моніторингу мікроклімату й обліку енергоспоживання, а також запропоновано модель AI-assisted IoT Framework, що включає сенсорні вузли, обчислювальний шлюз, модулі аналітики та панель керування фермою. У дослідженні науковців [6] вказано на потребу впровадження відкритих API для інтеграції різних систем

і пропонують архітектуру «sensor-to-cloud» з аналітичним ядром для управління агрокліматом. Науковці [7], розглядають механізми енергоефективності вузлів, методи відновлюваного живлення (solar harvesting), а також етичні аспекти використання AI у продовольчих системах. Робота вирізняється системним підходом до оцінювання впливу цифрових технологій на глобальну продовольчу безпеку. Наукова стаття [8] присвячена оптимізації IoT-комунікацій у розподілених агросистемах. Запропоновано адаптивний протокол маршрутизації з урахуванням енергоспоживання, пропускної здатності та рівня втрат пакетів, що дозволяє підвищити надійність передачі даних на 28 % порівняно з базовими LoRaWAN-рішеннями. Це дослідження особливо актуальне для великих сільськогосподарських господарств з розгалуженою мережею сенсорів. У публікації [8] автори відзначають роль нейромережеских моделей у виявленні аномалій у мікрокліматі та оптимізації дозування добрив, пропонуючи підхід до енергоощадного моніторингу на основі комбінованого зв'язку LoRa-Wi-Fi.

Розглянуті джерела [3-9] доповнюють світовий науковий контекст, демонструючи, що розвиток Smart Farming відбувається у трьох взаємопов'язаних напрямках:

- технологічному – вдосконалення сенсорних мереж, комунікацій і протоколів IoT;
- інтелектуальному – інтеграція штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників;
- системному – перехід до сталих, екологічно орієнтованих агроecosystem.

Узагальнення робіт [7-9, 10-13] дозволяє виокремити три ключові тренди розвитку Smart Farming:

- технологічна конвергенція IoT і AI, яка забезпечує повну автоматизацію агропроцесів, від моніторингу до прийняття рішень;
- оптимізація зв'язку й енергоефективності, що передбачає використання протоколів LoRaWAN, NB-IoT і комбінованих гібридних мереж;

– підвищення стійкості та безпеки даних, завдяки впровадженню TLS/DTLS, OTA-оновлень і політик доступу ACL/RBAC.

Огляд сучасних наукових підходів і рішень показав, що сучасне розумне землеробство є ключовим напрямом цифрової трансформації аграрного сектору. Його розвиток орієнтований на побудову стійких, адаптивних і самонавчальних систем управління, які підвищують ефективність використання природних ресурсів, забезпечують продовольчу безпеку й підтримують екологічний баланс. Український досвід підтверджує практичну життєздатність міжнародних наукових розробок і демонструє потенціал адаптації глобальних Smart Farming-підходів до місцевих агрокліматичних умов.

РОЗДІЛ 2

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

2.1 Розробка архітектури IoT-системи Smart Agro

Розробка архітектури системи Smart Agro ґрунтується на принципах точного землеробства та базується на інтеграції сенсорних мереж, бездротових каналів передачі даних і хмарних аналітичних сервісів. Основною метою архітектурного проєктування є створення модульної IoT-системи, здатної здійснювати моніторинг і керування параметрами середовища вирощування у режимі реального часу, із подальшою можливістю масштабування для агропромислових або дослідницьких об'єктів.

Архітектура системи розроблялася з урахуванням таких ключових вимог:

- мінімізація енергоспоживання та вартості обладнання;
- підтримка стандартних протоколів зв'язку (MQTT, Wi-Fi, LoRaWAN);
- зручність інтеграції у навчально-наукове середовище;
- забезпечення віддаленого моніторингу та керування процесами через веб-інтерфейс.

Архітектурна модель системи Smart Agriculture базується на багаторівневій структурі, що забезпечує повний цикл збирання, передавання, оброблення та використання даних у межах агроєкосистеми. Згідно з дослідженням [15], ефективна реалізація технологій Інтернету речей у сільському господарстві передбачає чотири функціональні рівні, взаємодія яких подана на рисунку 2.1.

IoT-система Smart Agro реалізує чотирирівневу архітектуру, що охоплює такі рівні [14-15]:

- сенсорний рівень – складається з набору сенсорних модулів для вимірювання фізичних і хімічних параметрів середовища (датчик температури DS18B20, датчик вологості повітря та ґрунту DHT22, сенсор рівня освітленості BH1750, датчики рН та ЕС (електропровідності) для контролю складу поживного розчину, ультразвуковий сенсор рівня води (HC-SR04). Сенсорні модулі об'єднані через інтерфейси I²C та аналогові входи контролера;

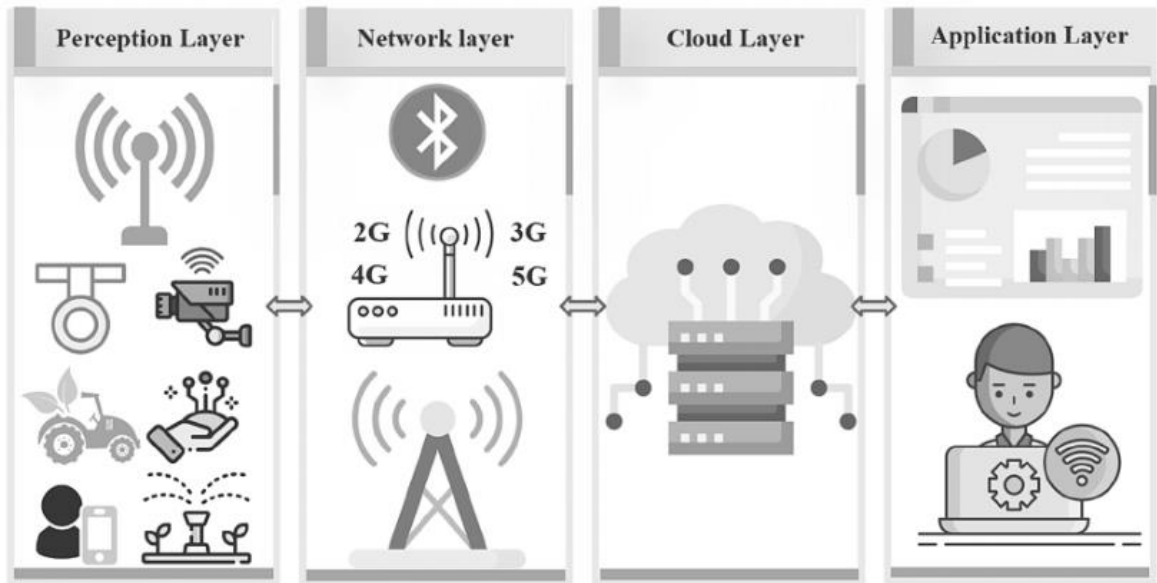


Рисунок 2.1 – Архітектура IoT-системи Smart Agro [15]

– контролерний рівень – реалізований на базі мікроконтролера ESP32, який має інтегровані Wi-Fi та Bluetooth-модулі. Контролер відповідає за збирання даних із сенсорів, попередню фільтрацію, обчислення середніх значень та відправлення даних до MQTT-брокера. На цьому рівні також реалізовано автоматизовані сценарії керування – вмикання поливу, вентиляції чи подачі поживного розчину на основі заданих порогових значень;

– комунікаційний рівень – забезпечує зв'язок між периферійними вузлами та сервером. Для локальних сценаріїв використовується Wi-Fi-з'єднання, а для польових або розподілених стендів – LoRaWAN-модулі (Ra-02, E32). Протокол обміну даними – MQTT, який дозволяє ефективно реалізувати модель «публікація-підписка» між вузлами та хмарним сервером;

– аналітичний і прикладний рівні – включають хмарну аналітику, базу даних і користувацький інтерфейс. Для візуалізації даних використовуються сервіси Blynk Cloud та ThingSpeak, які забезпечують графічні дашборди, сповіщення та історію зміни параметрів. Збереження даних відбувається у базі Firebase Realtime Database, що дозволяє формувати історію спостережень і прогнозні графіки на основі алгоритмів машинного навчання.

Система функціонує за принципом замкнутого контуру управління – сенсори реєструють параметри мікроклімату, тоді як контролер ESP32 опрацьовує отримані сигнали, порівнює їх із пороговими значеннями, збереженими у пам'яті.

При виявленні відхилень (наприклад, температура $> 30^{\circ}\text{C}$ або вологість $< 40\%$) мікроконтролер активує виконавчі механізми (насоси, вентилятори, соленоїдні клапани). Паралельно дані передаються через MQTT до хмарного сервера, де відображаються у реальному часі на дашборді користувача.

Для підвищення надійності передбачено зворотний канал керування, який дозволяє оператору віддалено вмикати чи вимикати пристрої через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Це реалізовано через MQTT-топіки «command» та «response».

Модульна побудова системи Smart Agro дозволяє масштабувати систему, додавати нові сенсори або виконавчі механізми та адаптувати алгоритми керування до різних культур і середовищ.

2.2 Вибір і характеристика апаратних компонентів

2.2.1 Вибір мікроконтролерної платформи системи Smart Agro

Для підсистем польових вузлів точного землеробства основними критеріями є:

- енергоспоживання при періодичній телеметрії з тривалими інтервалами сну;
- продуктивність для локальної обробки сигналів (фільтрація/агрегація);
- масштабованість та підтримка бездротових інтерфейсів;
- екосистема бібліотек/драйверів сенсорів;
- вартість та надійність у польових умовах.

Arduino UNO (ATmega328P) – це 8-бітова плата з наднизьким споживанням мікроконтролера (типово $\approx 12\text{-}15\text{ мА}$ @ 5 В , 16 МГц ; на рівні чипа ATmega328P) за даними даташиту, із можливістю подальшого зниження в режимах сну. На

самій платі споживання зростає через стабілізатор/USB-UART, але залишається малим порівняно з SBC-класом. Вбудованих радіоінтерфейсів немає – Wi-Fi/LoRa/GSM потребують шилдів/модулів. Перевагою Arduino UNO є простота, стабільна екосистема та достатня кількість GPIO для базових вузлів вимірювань [16].

ESP32 інтегрує Wi-Fi та Bluetooth LE, має значно більшу продуктивність і пам'ять (варіанти з PSRAM), підтримує глибокий сон із струмом у порядку одиниць-десятків μA (типові приклади для модулів сімейства ESP32/ESP32-S3), тоді як в активному режимі споживання залежить від радіонавантаження і може сягати сотень мА. Це робить ESP32 збалансованим варіантом для батарейних вузлів з періодичним пробудженням і короткими сесіями передачі даних [17].

Raspberry Pi (SBC-клас) – повноцінні одноплатні комп'ютери з Linux, потужніші (наприклад, Pi 5: Cortex-A76 @ 2.4 ГГц) і з багатшими інтерфейсами, однак мають суттєво вище енергоспоживання – для Pi 4 В – близько 2,7 Вт у простої та >5 Вт під навантаженням, типові вимоги живлення 5 В / 3 А. Тому SBC доцільніше використовувати як шлюз/агрегатор (edge-gateway), а не як масовий польовий сенсорний вузол [18].

Для «тонких» польових вузлів (вологість ґрунту, температура/освітленість, рН, локальна агрегація) переважають вимоги тривалої автономної роботи від батареї/сонячної підзарядки, стійких бездротових з'єднань і достатньої локальної продуктивності для попередньої обробки (усереднення, порогові тригери, компресія). За цими критеріями:

– ESP32 є оптимальним базовим МК для більшості польових сенсорних вузлів Smart Agro: поєднання вбудованих Wi-Fi/BLE, підтримки глибокого сну (мікроампери) та достатньої продуктивності (двоядерний MCU) забезпечує низьку середню енерговартість телеметрії при періодичних пробудженнях. Додатково, ESP32 легко інтегрується з LoRa-модулями (SX127x) для далекого радіозв'язку в полі, залишаючи Wi-Fi/BLE для сервісних задач (калібрування, локальне налагодження) [19];

– Arduino UNO доцільний для ультра-простих вузлів (дротова шина, мінімальна логіка керування) або там, де критична прогнозованість і простота, але відсутність вбудованого радіо і обмежені ресурси знижують масштабованість у бездротових розгортаннях [17];

– Raspberry Pi (Zero 2 W/4 B/ 5) доцільно винести на рівень шлюзу (збір/кешування даних, локальна аналітика/ML, брокер MQTT, проксі до хмари, керування оновленнями), де більш високе споживання виправдане функціональністю Linux-стеку, а живлення доступне (мережа/сонячна панель із буфером) [19].

Отже, для системи Smart Agro оптимальною є гібридна архітектура вибору платформ ESP32, як стандартна мікроконтролерна платформа польових вузлів (енергоефективність у «sleep-heavy» режимах + вбудоване радіо), Raspberry Pi, як шлюз/агрегатор у кожному секторі поля або на фермі та Arduino UNO – для простих дротових вузлів чи навчально-демонстраційних модулів. Такий вибір мінімізує енергоспоживання та вартість масового розгортання, забезпечуючи водночас масштабованість і гнучкість мережевих інтерфейсів для точного землеробства.

2.2.2 Сенсорна підсистема: датчики вологості, температури, освітленості, рН ґрунту

Ефективність Smart Agro визначається якістю первинних вимірювань, стабільністю показників у змінних метео- та ґрунтових умовах і відтворюваністю після калібрування. Нижче подано обґрунтований вибір сенсорів за принципом дії, інтерфейсами, енергоспоживанням і придатністю для тривалої автономної роботи на батарейному/сонячному живленні:

– вологість ґрунту, для автономних вузлів найчастіше застосовують ємнісні сенсори (оцінка діелектричної проникності середовища) як компроміс між вартістю й довговічністю, вони значно менш схильні до корозії, ніж резистивні щупи. Професійні датчики TDR/частотні (70 МГц) додатково оцінюють об'ємний вміст води (VWC) та електропровідність (EC), забезпечуючи кращу стабільність і відтворюваність, але суттєво дорожчі. Дослідження низьковартісних ємнісних

сенсорів підтверджують працездатність за умови обов'язкового ґрунтоспецифічного калібрування та контролю солоності/температури [20]. Рекомендованими є датчики вологості ґрунту такі як, ємнісний сенсор v1.2 (рис. 2.2) та професійний TEROS 12 (SDI-12/Serial), зображений на рисунку 2.3.

Ємнісний сенсор v1.2 (аналоговий вихід, 3,3-5,5 В) для масового розгортання з локальною калібровкою (2-3 точки вологоутримання) та термокомпенсацією у прошивці вузла [21].



Рисунок 2.2 – Датчик вологості HW-101HW V1.2 [21]

Професійний TEROS 12 (SDI-12/Serial): VWC+EC+T з підвищеною точністю/повторюваністю, корисний для контрольних профілів або еталонних постів [22].



Рисунок 2.3 – Сенсор TEROS 12 [22]

– температура ґрунту та середовища, для мереж з довгими лініями з'єднання практичним є DS18B20 (цифровий, 1-Wire), з доступними виконаннями у водозахищених зонд-корпусах, підтримує паразитне живлення, має точність $\approx \pm 0,5^\circ \text{C}$ у робочому діапазоні та адресацію до 127 датчиків на шині. Це спрощує топологію ґрунтових профілів (0-10-30 см тощо) [23];

– освітленість (PAR проху/інсоляція), для задач регулювання поливу/моделей випаровування потрібна стабільна оцінка освітленості у люксах або широкодіапазонний канал із ІЧ-компенсацією, наприклад, BH1750 (I²C) [24], TSL2591 (I²C, два фотодіоди: full + IR) [25] та VEML7700 (I²C) [26];

– рН ґрунту, скляний електрод генерує напругу, пропорційну активності іонів Н⁺ (чутливість описується рівнянням Нернста ($\sim 59,16 \text{ мВ/рН}$ при 25°C), отже температурна компенсація є обов'язковою. Для ґрунтових задач використовують або вимір у водній витяжці (1:2.5; лабораторна/польова підготовка), або in-situ зонди з високим вхідним опором підсилювача.

Рекомендованими модулями обробки сигналу є Atlas Scientific EZO-pH [27] та DFRobot Gravity pH (SEN0161-V2) [28]. Економніший аналоговий модуль SEN0161-V2 доцільний у польових комплектах і для попереднього скринінгу зображений на рисунку 2.4.

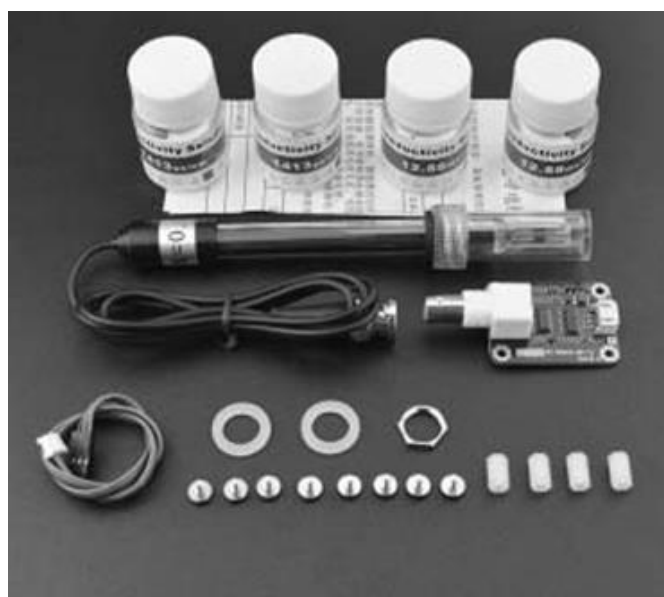


Рисунок 2.4 – Аналоговий комплект датчика DFRobot Gravity pH SEN0161-V2 [28]

Отже, для польових вузлів Smart Agro доцільно застосовувати ємнісні датчики вологості ґрунту з обов'язковим ґрунтоспецифічним калібруванням, для температури – цифрові зонди DS18B20 (1-Wire) як надійне й енергоефективне рішення. Вимірювання освітленості раціонально реалізувати сенсорами BH1750/TSL2591/VEML7700 (I²C), вибір яких залежить від необхідного діапазону та чутливості. Для контролю кислотності найкраще підходять рН-модулі з високим вхідним опором (наприклад, EZO-pH або Gravity pH) із триточковим калібруванням і температурною компенсацією. Енергетичний бюджет забезпечується інтервальним опитуванням, вимкненням живлення сенсорів поза сеансами вимірювань і глибоким сном контролера, а надійність – герметизацією, екрануванням ліній та періодичним обслуговуванням електродів рН.

2.2.3 Комунікаційні модулі

Ефективність Smart Agro визначається компромісом між енергоспоживанням вузлів, радіусом дії, стійкістю каналу в полі та регуляторними обмеженнями діапазонів. Для Європи (EU868) роботу в ISM-смугах регламентує ETSI/LoRa-профіль: обмеження duty cycle для підсмуг 863-870 МГц (типово 0,1-1 %, винятково 10 % у вузькій підсмузі), що на пряму визначає частоту телеметрії та розмір пакетів [29].

Для вибору транспортної технології в Smart Agro критичні три чинники: енергоспоживання вузла, гарантована дальність зв'язку в полі та доступні протоколи/інфраструктура. В таблиці 2.1 систематизуємо параметри Wi-Fi, LoRa/LoRaWAN та GSM/2G, зокрема, типові радіуси дії, енергопрофіль передавання, обмеження, а також релевантні приклади застосування (теплиці, розріджені польові сенсорні мережі, віддалені ділянки).

Отже, базовою транспортною технологією для Smart Agro доцільно обрати LoRaWAN (мінімальна енерговартість і великі дистанції за умов EU868), Wi-Fi використовувати в локальних кластерах/теплицях із «сон-активність» режимом, а GSM – як резервний або для поодиноких віддалених вузлів/шлюзів, де неможливо розгорнути власну LPWAN-інфраструктуру. Така стратифікація

мінімізує енергоспоживання та CAPEX, забезпечуючи надійне покриття й масштабованість мережі.

Таблиця 2.1 – Порівняння бездротових інтерфейсів для Smart Agro [29]

Критерій	Wi-Fi (ESP32)	LoRa/LoRaWAN (EU868)	GSM/2G (SIM800-клас)
Дальність	10-100 м (відкрито до сотень)	до кількох-десять км (с/м SF/антена)	мережа оператора
Енергопрофіль	піки TX ~200-300 мА; ефективний у «sleep-heavy»	найкращий для батарейних вузлів; мінімальний airtime	піки TX до ~2 А; вимогливий до живлення
Частота передач	висока (локальна мережа)	обмежена duty-cycle 0,1-1 % (EU868)	за потребою/тарифом
Протоколи	MQTT/HTTP/HTTPS	LoRaWAN (ADR, підтвердження)	TCP/UDP/IP, MQTT/HTTP
Застосування	теплиці/ферма з Wi-Fi, ОТА	польові сенсори на батареї	віддалені вузли/шлюз

2.2.4 Енергозабезпечення

Надійність вузлів Smart Agro у польових умовах визначається оптимальним поєднанням сонячної генерації (PV-модуль), накопиченням енергії (акумулятор + BMS) та DC-DC стабілізацією з низькими втратами в чергових режимах. Для батарейних сенсорних вузлів з інтервальною телеметрією типовий профіль навантаження характеризується довгими періодами deep-sleep (десятки-сотні мкА для ESP32 на рівні кристалу; практично – мА-рівень за неоптимальної обв'язки) і короткими піками передачі/вимірювань [30].

Енергопідсистема вузлів Smart Agro має спиратися на PV-модуль, підібраний за NOCT/NMOT-умовами [31], LiFePO₄-акумулятор із BMS (для великого ресурсу в щоденних циклах) [32] та синхронні buck-перетворювачі з ультранизьким I_q [33]. MPPT-заряд забезпечує кращий збір енергії за змінної погоди порівняно з PWM. Системний розрахунок (E_{load}, H, дерейтинги, DoD, N_{aut}) з помірним запасом гарантує стійку роботу вузлів упродовж сезону та мінімізує відмови через енергетичний дефіцит.

2.3 Розробка схеми підключення компонентів

Архітектура апаратної частини IoT-системи Smart Agro (рис. 2.5) базується на мікроконтролерній платформі ESP32, що виконує функції центрального вузла збору даних, початкової обробки сенсорної інформації та передачі показників у хмарну інфраструктуру. Принципова електрична схема передбачає підключення сенсорної підсистеми до ESP32 відповідно до типу інтерфейсів кожного сенсорного модуля. Датчик вологості ґрунту Soil Moisture Capacitive v1.2 підключається до аналогового входу ESP32 (ADC1 CH0), оскільки принцип аналізу вологості ґрунту базується на зміні ємнісних характеристик ґрунту і відповідній зміні аналогового сигналу. Аналоговий рН сенсор SEN0161 також потребує підключення до окремого аналогового входу (ADC1 CH3) з метою забезпечення ізольованого каналу вимірювання, що мінімізує перешкоди між сенсорами.

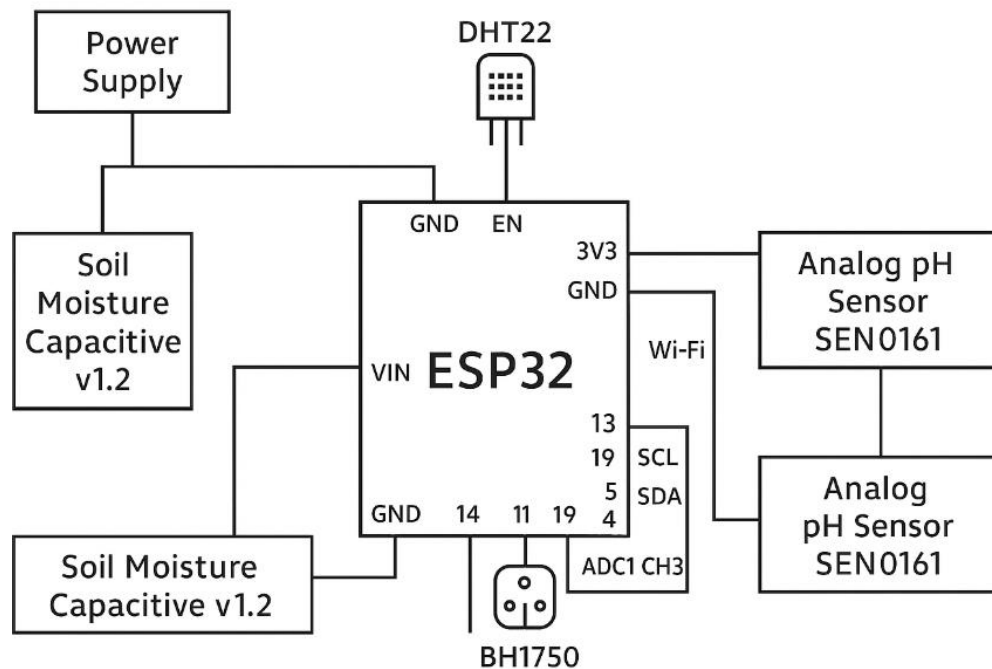


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема Smart Agro [34]

Датчик температури та вологості повітря DHT22 працює за однолінійним цифровим протоколом обміну даними та підключається до цифрового GPIO

(наприклад GPIO 15). Для датчика освітленості BH1750 використовується інтерфейс I2C, що дозволяє одночасне підключення декількох цифрових модулів до спільної шини, тому BH1750 підключається до ліній SDA (GPIO 21) та SCL (GPIO 22). Комунікаційні модулі не потребують окремих інтерфейсів, оскільки ESP32 містить вбудований Wi-Fi модуль з підтримкою стандарту 802.11 b/g/n, що дозволяє передачу даних у хмару без додаткового зовнішнього апаратного радіомодуля. Підсистема живлення сформована на базі стабільного джерела 5 V DC, яке подається на лінію живлення ESP32 та сенсорів через окрему обв'язку фільтрації.

Перший етап апаратної реалізації передбачає побудову дослідного прототипу системи на макетній платі (breadboard) із використанням стандартних Dupont-провідників. Такий підхід дозволяє оперативно перевірити працездатність схеми, визначити рівень шумів, протестувати алгоритми керування та провести калібрування сенсорних модулів у реальних агросередовищах. Після стабілізації прототипу на етапі лабораторних випробувань виконується розробка друкованої плати для забезпечення довготривалої експлуатації у стаціонарних умовах тепличних приміщень та агротестових ділянок.

При розробці друкованої плати необхідно забезпечити правильну топологію трасування сигнальних ліній. Аналогові канали (вологість ґрунту та рН) мають бути розміщені на платі з мінімальною довжиною провідників та ізоляцією від цифрових шин для зменшення рівня електромагнітних шумів. Лінії інтерфейсу I2C рекомендується розташовувати паралельно із загальною шиною землі без перетину із лініями живлення високої потужності. Всі чутливі сигнальні траси потребують земленого екранування, а сенсори – окремих точок заземлення для уникнення появи «петель по землі». Це особливо важливо у агросередовищах з підвищеною вологістю повітря та наявністю індуктивних шумів від систем зрошення та насосного обладнання, що може негативно впливати на стабільність зчитування аналогових параметрів.

Оскільки система працює у умовах які характеризуються підвищеною електромагнітною нестабільністю, вологістю та ризиками випадкових перехідних процесів (включення насосів, вентиляторів, LED освітлення теплиць), апаратна реалізація повинна містити елементи захисту ліній живлення та сигналів. На вході системи встановлюється LC-фільтр для згладжування високочастотних перешкод та стабілізації напруги живлення. Окремі сенсорні модулі можуть бути додатково оснащені RC-фільтрами на аналогових входах, які мінімізують шум на рівні перетворювача АЦП ESP32. Для стабілізації напруги використовується низькошумовий лінійний стабілізатор або DC-DC модуль з низьким рівнем пульсацій (не вище 10-20 мВ).

Захист від переполюсовки забезпечується діодом на вхідній лінії живлення, а від імпульсних перенапруг – TVS-діодами, які працюють у імпульсному режимі та розсіюють високі короткочасні напругові стрибки. Для системи Smart Agro, яка функціонує у приміщеннях або стаціонарних теплицях, цей тип захисту критично важливий, оскільки електричні мережі агропідприємств часто містять перехідні стрибки під час переключення освітлювальних та насосних ліній. Комплексна система апаратного захисту забезпечує підвищену надійність визначення параметрів ґрунту та мікроклімату, підвищує достовірність даних, а також гарантує довготривалу експлуатацію без необхідності частого сервісного втручання.

2.4 Програмне забезпечення системи Smart Agro

Програмна частина системи Smart Agro реалізує алгоритми збору, обробки та передавання даних із сенсорної підсистеми до хмарного середовища. Вона побудована за модульним принципом і включає: контролер польового вузла (firmware), систему передачі даних (LoRa/Wi-Fi/GSM) та веб- або мобільний інтерфейс користувача. Основна логіка орієнтована на мінімізацію енергоспоживання й забезпечення безперервності телеметрії за умов змінного клімату.

Контролер ESP32 реалізує циклічний алгоритм із подієвими обробниками мережі (Wi-Fi/MQTT) та таймерами опитування сенсорів. Базові стани: INIT → NET_JOIN → MEASURE → PACK → PUBLISH → SLEEP/IDLE → (за помилок) RETRY.

Логіка складається з таких етапів:

- ініціалізація системи – перевірка стану живлення, ініціалізація периферії (I²C, UART, ADC, 1-Wire), зчитування службових параметрів EEPROM (пороги, інтервал вимірювань);

- пробудження з режиму Deep Sleep – пробудження по таймеру RTC або за зовнішнім сигналом (наприклад, по команді з шлюзу);

- збір даних – послідовне опитування сенсорів (вологість ґрунту, температура, освітленість, рН-модуль). Дані фільтруються (усереднення/медіана трьох замірів) і формуються у структуру JSON;

- передача даних – вибір інтерфейсу (LoRa, Wi-Fi або GSM) за конфігурацією, коротка передача пакета та перевірка підтвердження;

- запис у буфер EEPROM/SD (опційно) у разі відсутності зв'язку;

- перехід у Deep Sleep – відключення сенсорів і периферії до наступного циклу.

Передача даних організована за архітектурою IoT-hub → MQTT-broker → cloud-database.

Польові вузли ESP32 формують пакети JSON із часовою міткою, ідентифікатором вузла та сенсорними даними. При використанні LoRaWAN дані надсилаються через шлюз Raspberry Pi, який виступає MQTT-клієнтом і ретранслює пакети в хмару, при Wi-Fi підключенні вузол безпосередньо публікує дані на MQTT-брокер (Mosquitto, HiveMQ), при GSM – дані передаються через HTTP POST або MQTT over TCP.

Отримані дані записуються в базу даних (InfluxDB, Firebase або MySQL), після чого проходять первинну перевірку, усереднення й архівування.

Здійснюється обчислення похідних показників – середня вологість за добу, температурні тренди, прогноз поливу, графіки змін рН.

Хмарна частина має користувацький інтерфейс, реалізований як веб-панель (Smart Agro Dashboard) або мобільний застосунок (на Flutter/PWA). Основні функції:

- візуалізація параметрів у реальному часі (графіки вологості, температури, освітленості, рН з можливістю фільтрації за періодами та місцями розташування вузлів);

- аналіз історичних даних (вибір інтервалів, експорт у CSV або PDF, побудова теплових карт ділянки);

- керування вузлами (зміна інтервалу опитування, калібрування сенсорів, оновлення прошивки OTA (через Wi-Fi);

- система сповіщень (push- або e-mail-повідомлення при перевищенні заданих порогів вологості чи рН);

- авторизація та безпека (токен-ідентифікація користувачів, шифрування TLS 1.2, журнал подій доступу).

Інтерфейс є адаптивним і може використовуватись агрономами без спеціальної підготовки, що підвищує практичну придатність системи в польових умовах.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Постановка експерименту та умови випробувань

Об'єктом експериментальних досліджень є гідропонна установка відкритого типу з автоматизованим IoT-керуванням для подачі живильного розчину й мікрокліматом у кімнатних умовах. Загальний вигляд установки наведено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд гідропонної установки відкритого типу у кімнатних умовах

Установка реалізує концепцію відкритої гідропоніки: живильний розчин подається з основного бака до кореневої зони рослин, після чого надлишок відводиться у дренажний резервуар без його повторної рециркуляції в той самий цикл. Такий підхід спрощує конструкцію та гідравлічну схему системи, а також знижує ризики накопичення патогенів у розчині, що відповідає рекомендаціям, узагальнених у сучасних дослідженнях з безґрунтового землеробства.

Конструктивно установка складається з:

- модуля вирощування (контейнери для рослин із субстратом);
- живильного бака з занурювальним насосом;
- системи трубопроводів для подачі розчину та його дренажу;
- модуля сенсорики: цифровий датчик температури DS18B20 для контролю температури живильного розчину, комбінований датчик температури та відносної вологості повітря DHT22, розміщений у зоні листової маси, сенсор рівня освітленості BH1750, який забезпечує вимірювання інтенсивності штучного світла над рослинами, датчики рН та ЕС (електропровідності) для оцінювання кислотності та сольової концентрації поживного розчину та ультразвуковий сенсор рівня води HC-SR04, змонтований над поверхнею розчину в баку для безконтактного визначення висоти стовпа рідини;
- модуля керування на основі мікроконтролера з підтримкою Wi-Fi, який реалізує локальну логіку керування;
- хмарного сервера (або IoT-платформи) для зберігання, візуалізації та аналітики даних.

Взаємодія основних компонентів системи зображена на рисунку 3.2.

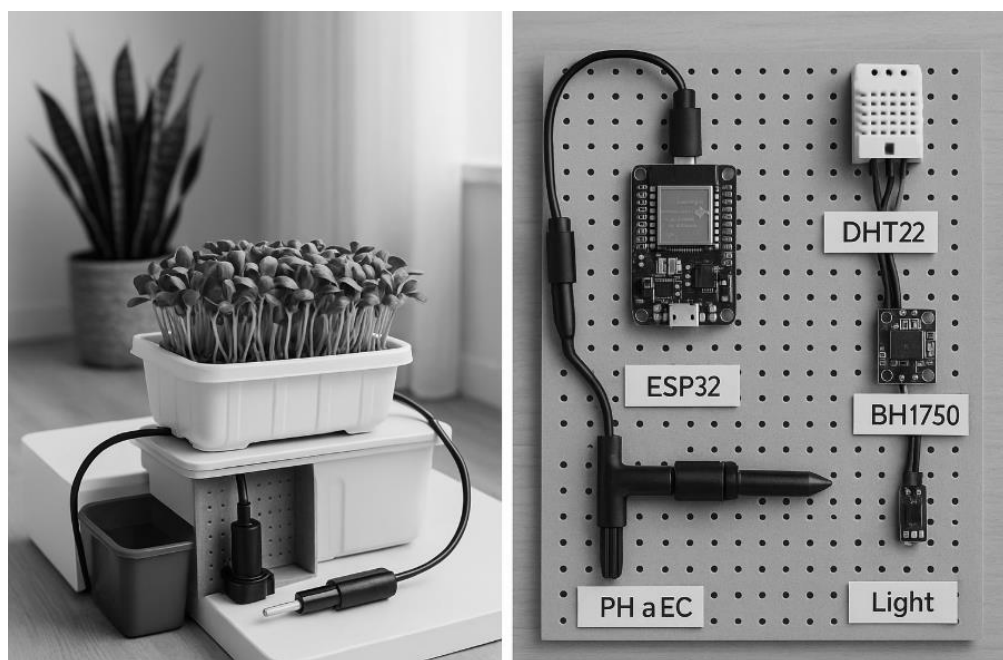


Рисунок 3.2 – Структура IoT-орієнтованої гідропонної установки відкритого типу

Експеримент проводився у приміщенні з контрольованими умовами. Основні експлуатаційні умови:

- температура повітря в межах рекомендованого діапазону для обраної культури (переважно денні значення близькі до сталих, нічні – дещо нижчі);
- відсутність прямих протягів та різких перепадів температури;
- штучне освітлення (LED-лампи), яке забезпечує задану фотоперіодичність;
- стабільне електроживлення для насоса, мікроконтролера й мережевого обладнання.

Для оцінки роботи системи було сформовано серію випробувань протягом повного або скороченого вегетаційного циклу культури. У ході експерименту розв'язувалися такі задачі:

- перевірити, чи забезпечує розроблена IoT-система підтримання параметрів рН, ЕС, температури розчину та повітря в рекомендованих діапазонах протягом більшої частини часу;
- оцінити характер добових коливань температури, вологості й освітленості та їхній вплив на стабільність параметрів живильного розчину;
- перевірити коректність формування та передачі телеметрії в хмару, а також придатність отриманих часових рядів для подальшої аналітики, у т. ч. з використанням підходів, описаних у сучасних IoT-системах для безґрунтового землеробства.

Таким чином, постановка експерименту безпосередньо пов'язана з практичною задачею розроблення та валідації IoT-орієнтованої гідропонної платформи, а також відповідає загальним тенденціям, щодо переходу до data-driven-керування у soilless agriculture.

3.2 Методика збору та обробки даних

Збір експериментальних даних здійснювався як на локальному рівні (на мікроконтролері), так і на віддаленому рівні (у хмарі). Частота дискретизації для

основних сенсорів була обрана так, щоб з одного боку забезпечити достатню деталізацію процесів, а з іншого – не перевантажувати канал зв'язку та хмарне сховище. Типовим є інтервал опитування сенсорів 30-60 секунд.

До набору вимірюваних величин відносилися:

- рН живильного розчину;
- електропровідність (ЕС), що опосередковано характеризує концентрацію розчинених солей;
- температура живильного розчину;
- температура та відносна вологість повітря в зоні рослин;
- освітленість (люкс);
- рівень розчину в основному баку.

На мікроконтролері виконувалася первинна цифрова обробка даних, яка включала, наприклад:

- для рН задавався інтервал $[\text{pH}_{\min}; \text{pH}_{\max}]$ і всі вимірювання, що виходять за ці межі (наприклад, $\text{pH} < 4$ або $\text{pH} > 9$, вважалися аномальними та не використовувалися в подальшому аналізі;
- для послідовності вимірювань x_1, x_2, \dots, x_N медіанний фільтр із вікном розміру $2r+1$ визначається за формулою (3.1):

$$\tilde{x}_k = \text{med}\{x_{k-r}, \dots, x_k, \dots, x_{k+r}\}, \quad (3.1)$$

де \tilde{x}_k – згладжене значення;

$\text{med}\{ \}$ – медіана.

Такий фільтр ефективно пригнічує одиничні «викиди», зберігаючи при цьому форму сигналу;

- обчислення ковзного середнього для температури й відносної вологості повітря. Для вікна розміру m ковзне середнє визначається за формулою (3.2):

$$\tilde{x}_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^k x_i, \quad (3.2)$$

де \tilde{x}_k – усереднене значення в момент часу k .

Це дозволяє зменшити високочастотний шум сенсорів і зробити тренди більш наочними.

На основі фільтрованих значень порівнювалися виміряні параметри з порогами, визначеними за агротехнічними рекомендаціями (наприклад, діапазон оптимального рН та ЕС для мікрогірину соняшника). У разі виходу за поріг генерувалися команди: вмикання/вимикання насоса для подачі розчину, зміна тривалості циклу поливу, активація сповіщень для оператора.

Зміна величин ΔpHi та ΔECi розраховувалася за формулами (3.3-3.4), що дозволяє оцінити швидкість коливань параметрів між сусідніми вимірюваннями.

$$\Delta pHi = pHi - pHi - 1, \quad (3.3)$$

$$\Delta ECi = ECi - ECi - 1. \quad (3.4)$$

Узагальнені результати моніторингу кислотності (рН) та електропровідності (ЕС) поживного розчину подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання рН та електропровідності (ЕС) поживного розчину

Час, год	рН розчину	ЕС, мСм/см	ΔpH	ΔEC , мСм/см
0	6,15	1,81	–	–
6	6,21	1,83	+0,06	+0,02
12	6,13	1,83	–0,08	0,00
18	6,07	1,89	–0,06	+0,06
24	6,16	1,81	+0,09	–0,08
30	6,17	1,84	+0,01	+0,03
36	6,13	1,78	–0,04	–0,05
42	6,00	1,70	–0,13	–0,08
48	6,10	1,87	+0,10	+0,16

ΔpH та ΔEC – зміна значення між поточною точкою вимірювання та попередньою.

На рисунку 3.3 подано часовий тренд зміни кислотності (рН) поживного розчину в гідропонній установці відкритого типу протягом добового циклу експерименту.

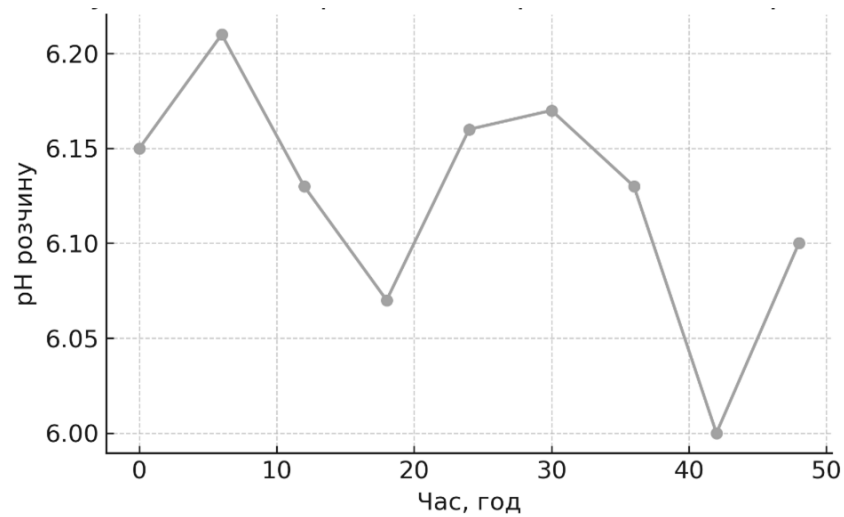


Рисунок 3.3 – Тренд зміни рН поживного розчину

Як видно з рисунка 3.3, значення рН протягом усього періоду спостережень залишалися в межах близько 6,0-6,2, що свідчить про достатньо стабільний кислотно-лужний режим поживного розчину. Незначні коливання рН мають плавний характер і не виходять за межі технологічно допустимого діапазону для вирощування мікрогрінуну соняшника, що підтверджує адекватність роботи системи контролю та корекції параметрів.

На рисунку 3.4 подано часовий тренд зміни електропровідності (ЕС) поживного розчину в гідропонній установці відкритого типу протягом добового циклу експерименту.

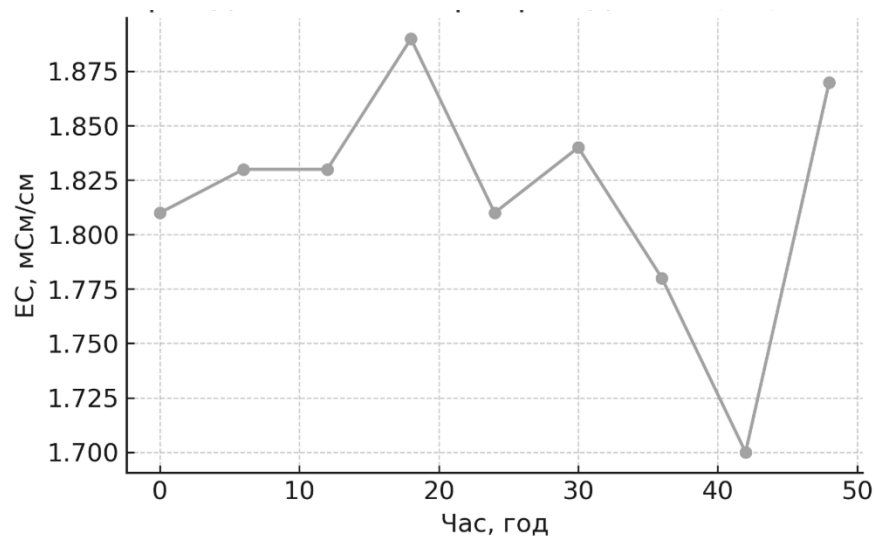


Рисунок 3.4 – Тренд зміни електропровідності (ЕС) поживного розчину

З рисунка 3.4 видно, що значення електропровідності коливаються переважно в інтервалі близько 1,7-1,9 мСм/см без різких стрибків і тривалих виходів за межі робочого діапазону. Невеликі зміни ЕС зумовлені випаровуванням води та поглинанням іонів рослинами, проте загальний характер кривої свідчить про відносну стабільність сольового складу розчину та коректну роботу системи контролю параметрів живильного середовища.

Характер зміни температури та відносної вологості повітря (DHT22), а також температури поживного розчину (DS18B20) подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання температури та відносної вологості повітря (DHT22) та температури розчину (DS18B20)

Час, год	Температура повітря, °C	Відносна вологість повітря, %	Температура розчину, °C	Примітка
0	22,1	60	21,5	ніч, освітлення вимкнено
6	21,8	62	21,4	ніч, стабільний режим
12	24,5	55	22,0	день, освітлення увімкнено
18	23,7	57	21,8	перехід до вечірнього режиму
24	22,0	61	21,6	ніч, освітлення вимкнено
30	21,9	63	21,5	ніч, стабільний режим
36	24,8	54	22,1	день, освітлення увімкнено
42	23,9	56	21,9	перехід до вечірнього режиму
48	22,2	60	21,7	ніч, освітлення вимкнено

На основі даних таблиці 3.2 обчислювалися середні значення температури та вологості за добу за формулами (3.5-3.7), що дозволяє оцінити стабільність мікроклімату в зоні розташування рослин.

$$\bar{T}_{\text{пов}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{пов},i}, \quad (3.5)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i, \quad (3.6)$$

$$\bar{T}_{\text{розч}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{розч},i}. \quad (3.7)$$

На рисунку 3.5 подано часові залежності температури повітря та відносної вологості у зоні розміщення рослин протягом доби роботи гідропонної установки.

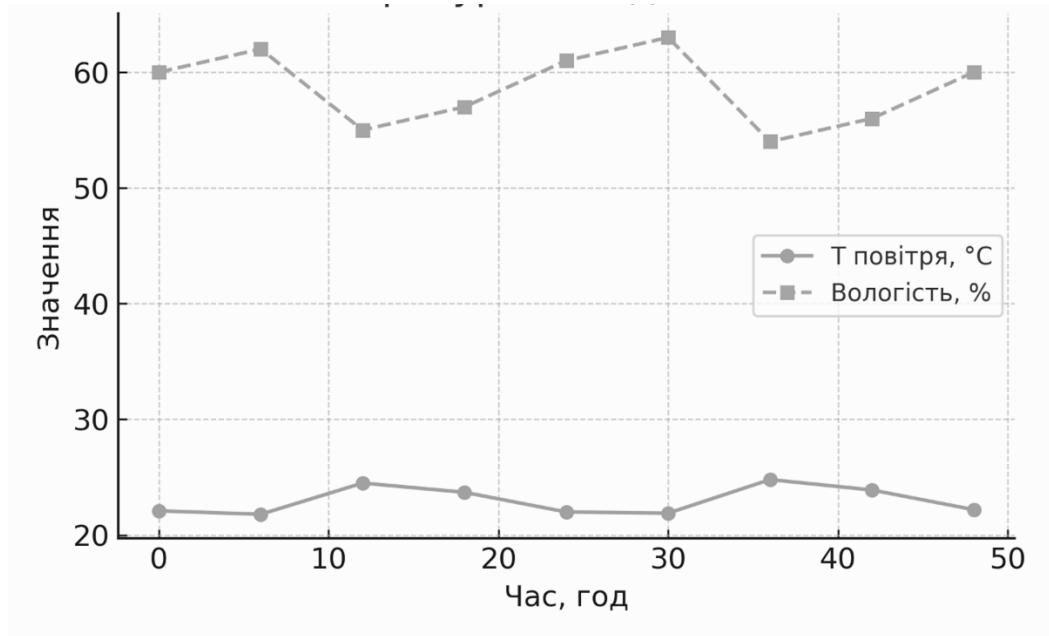


Рисунок 3.5 – Зміна температури та відносної вологості повітря за добу

З рисунка 3.5 видно, що температура повітря протягом доби зазнає помірних коливань, пов'язаних із режимами штучного освітлення, однак переважно утримується в діапазоні, близькому до оптимального для росту мікрогріну соняшника. Відносна вологість повітря змінюється синхронно з температурою, залишаючись у межах комфортних значень без різких стрибків. Це свідчить про сформований відносно стабільний мікроклімат, який не створює стресових умов для рослин упродовж усього експериментального періоду.

На рисунку 3.6 подано зміну температури поживного розчину в основному баку гідропонної установки протягом добового циклу експерименту.

Як видно з рисунка 3.6, температура поживного розчину є більш стабільною порівняно з температурою повітря і коливається у вузькому діапазоні значень поблизу 21-22° C. Такий режим запобігає перегріванню кореневої системи мікрогріну та сприяє стабільному засвоєнню поживних речовин.

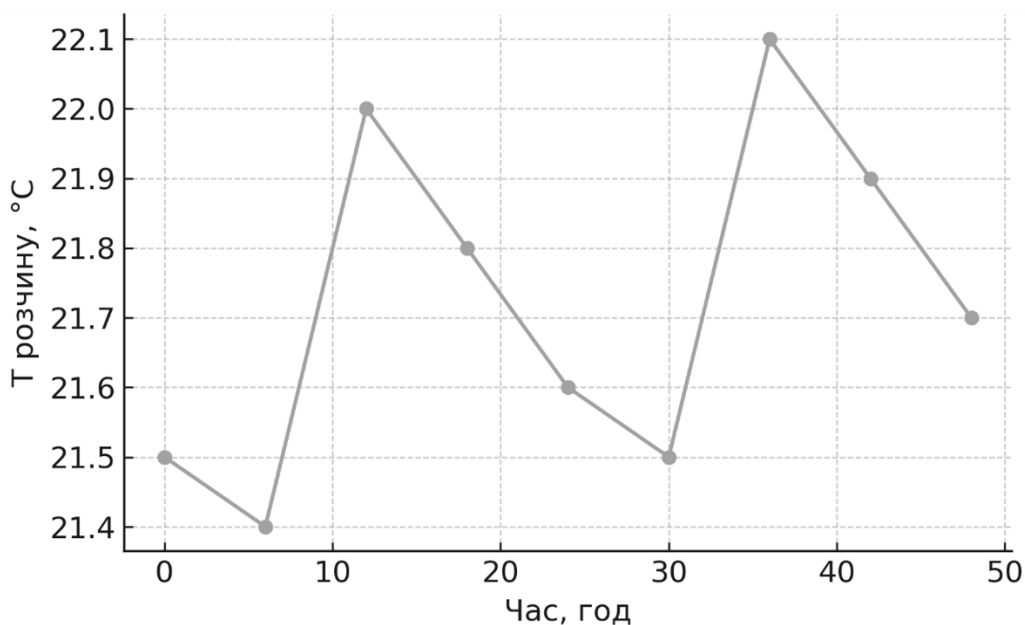


Рисунок 3.6 – Зміна температури поживного розчину за добу

Стабільність температури розчину підтверджує ефективність обраної конструкції бака та режимів роботи системи, а також узгоджується з вимогами до умов вирощування рослин у безґрунтових гідропонних системах. Отримані середні значення параметрів мікроклімату подано в таблиці 3.3, що свідчать про те, що система забезпечує достатньо стабільні умови вирощування мікрогірину соняшника у кімнатних умовах, $n=9$ – кількість точок вимірювань за добу.

Таблиця 3.3 – Середні значення температури та відносної вологості за добу

Показник	Умовне позначення	Середнє значення за добу
Середня температура повітря, °C	$\bar{T}_{\text{пов}}$	22,99 °C
Середня відносна вологість повітря, %	$\bar{\phi}$	58,67 %

На рисунку 3.7 подано узагальнене порівняння середніх значень температури повітря, температури поживного розчину та відносної вологості повітря за добу роботи гідропонної установки.

З рисунка 3.7 видно, що середні значення температури повітря (близько 23° C) і температури поживного розчину (близько 21,7° C) перебувають у комфортному діапазоні для вирощування мікрогірину соняшника, а відносна вологість повітря на рівні близько 59 % свідчить про відсутність як надмірної

сухості, так і надлишкової вологи. Така конфігурація параметрів мікроклімату підтверджує здатність системи забезпечувати стабільні умови вирощування та є непрямим індикатором ефективної роботи IoT-керування гідропонною установкою.

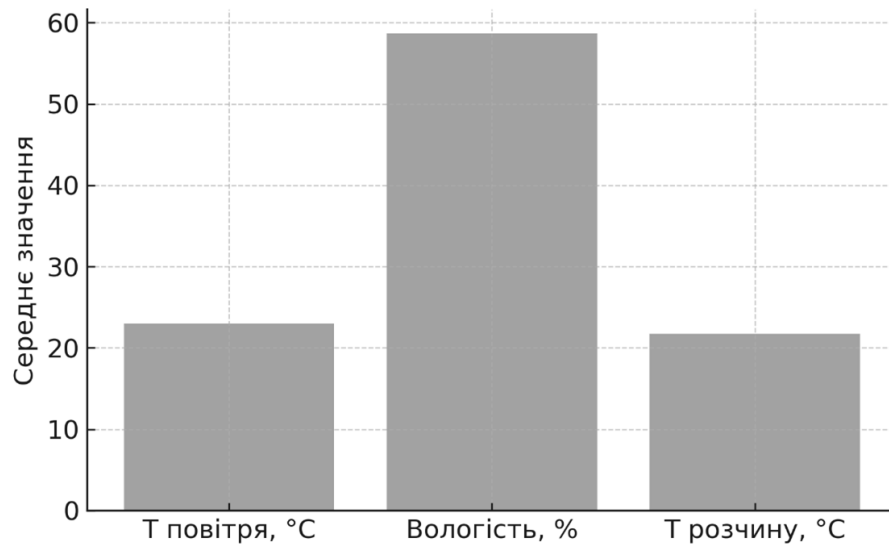


Рисунок 3.7 – Середні значення температури та вологості за добу

Після первинної обробки вектор вимірювань з часовою міткою передавався на IoT-платформу (хмарний сервер). Передача могла здійснюватися за легковагим протоколом MQTT або через HTTP-API, що узгоджується з типовими архітектурами, розглянутими в сучасних IoT-системах для агросфери.

Такий підхід до збору та багаторівневої обробки даних узгоджується з концепцією data-driven-керування в IoT-орієнтованих агросистемах, описаною в статті, і забезпечує достатню якість даних для подальшого аналітичного опрацювання.

3.3 Перспективи вдосконалення системи розумного точного землеробства

Результати експериментального дослідження засвідчили працездатність та ефективність гідропонної установки відкритого типу з IoT-керуванням на базі

ESP32 для вирощування мікрогрінуну соняшника в кімнатних умовах. Водночас отримані дані й аналіз часових трендів рН, ЕС, температури, вологості та освітленості вказують на низку напрямів, за якими система може бути суттєво вдосконалена та масштабована – як у технічному, так і в організаційно-функціональному вимірах. Подальший розвиток проєкту логічно вписується в концепцію Smart Agro та точного землеробства в безгрунтових системах.

На поточному етапі апаратна конфігурація базується на загальнодоступних датчиках (DS18B20, DHT22, BH1750, HC-SR04, сенсори рН та ЕС) і мікроконтролері ESP32 з інтегрованими модулями Wi-Fi та Bluetooth. Це забезпечує низьку вартість, простоту розгортання та високу гнучкість. Проте для підвищення точності вимірювань, надійності та довговічності системи доцільно:

- замінити побутовий датчик вологості повітря DHT22 на більш стабільні та промислові сенсори з меншою похибкою і довшим терміном роботи в умовах підвищеної вологості;

- використовувати більш точні і термостабільні електроди для вимірювання рН та ЕС, передбачені для довготривалого занурення в поживний розчин, із можливістю калібрування за стандартними буферними розчинами;

- замінити ультразвуковий сенсор рівня HC-SR04 на спеціалізовані сенсори рівня для агресивних або вологих середовищ, що зменшить вплив конденсату та шумів;

- доповнити систему датчиками CO₂, барометричного тиску, а за потреби – сенсорами протікання, що підвищить загальну керованість мікроклімату та безпеку експлуатації.

Перспективним напрямом є також конструктивне доопрацювання гідропонного модуля: застосування більш ергономічних лотків і кришок, які мінімізують випаровування, запобігають попаданню пилу й сторонніх об'єктів у розчин, а також полегшують санітарну обробку між циклами вирощування. Для мікрогрінуну соняшника доцільно оптимізувати глибину лотка, структуру субстрату та геометрію подачі розчину з урахуванням швидкого росту та густоти посівів.

У поточній конфігурації система розрахована на роботу від стаціонарної електромережі, що є прийнятним для кімнатних умов. Подальше вдосконалення може бути пов'язане з переходом до частково або повністю автономної роботи за рахунок використання відновлюваних джерел енергії – сонячних панелей у поєднанні з акумуляторними батареями та енергоефективними DC-DC перетворювачами.

Інтеграція енергомоніторингу (вимірювання струму споживання насоса, освітлення, ESP32 та периферії) дозволить оцінювати енергетичний баланс системи, оптимізувати режими роботи насосів та освітлення, а також порівнювати різні стратегії керування з точки зору «витрати енергії – приріст біомаси». У перспективі це відкриває можливість використання гідропонних модулів у віддалених або малодоступних місцях (дачні ділянки, тимчасові дослідні стенди, міські оранжереї на дахах будівель).

Зараз ESP32 виконує базові функції локального збору даних, фільтрації та формування тригерів керування, тоді як хмарна платформа забезпечує зберігання та візуалізацію. Наступним етапом розвитку є поглиблення аналітичної складової.

По-перше, накопичені часові ряди параметрів (рН, ЕС, температури, вологості, освітленості, рівня розчину) можна використовувати для побудови моделей прогнозування. Простішим кроком є статистичний аналіз трендів, кореляцій між параметрами та побудова регресійних моделей, які оцінюють вплив зміни умов на швидкість росту мікрогріну. Надалі це може перейти до застосування методів машинного навчання, наприклад, моделей, що прогнозують, коли рН чи ЕС вийдуть за цільовий діапазон і заздалегідь формують рекомендації щодо корекції.

По-друге, програмне забезпечення хмарної частини може бути доповнене модулем «цифрового двійника» установки, який відтворюватиме динаміку системи на основі математичної моделі масообміну й теплопереносу. Це дозволить тестувати віртуальні сценарії (зміна режимів поливу, тривалості освітлення, температури) без ризику пошкодити реальні посіви.

По-третє, інтерфейс користувача (веб-панель або мобільний застосунок) може бути розширений за рахунок адаптивних дашбордів, системи сповіщень (push-повідомлення, електронна пошта, месенджери) та інтерактивних рекомендацій в «агрономічному асистенті». Особливо актуальним є підтримка сценаріїв для різних культур (із набором типовий діапазонів рН, ЕС, температури та освітленості), які користувач зможе обирати зі списку.

Розроблена нами установка є окремим модулем, але закладена архітектура дає змогу масштабувати рішення до багатосекційних гідропонних систем та вертикальних ферм. Масштабування передбачає, зокрема:

- перехід від одного ESP32 до ієрархічної структури, де декілька локальних контролерів (ESP32 для кожного лотка або групи лотків) підпорядковуються центральному вузлу, який координує розподіл ресурсів (живильний розчин, електроенергія, мережевий трафік);

- уніфікацію протоколів обміну даними між модулями (наприклад, MQTT-шина з окремими топіками для кожної секції) та запровадження єдиної схеми адресації сенсорів й виконавчих механізмів;

- розроблення централізованої панелі моніторингу для всієї ферми з можливістю групового керування параметрами (задання цільового рН і ЕС для групи лотків, зміна світлового режиму для рівнів вертикальної стійки тощо).

У міру зростання кількості модулів зростає і значення питань масштабованості мережевої інфраструктури, резервування каналів зв'язку та розподілу обчислювальних навантажень між периферійними вузлами та хмарою. У цьому контексті доцільним є використання контейнеризованих сервісів, edge-обчислень та гнучкого налаштування частоти передачі телеметрії залежно від важливості параметра.

Ще один перспективний напрям – інтеграція гідропонної установки з мобільними роботизованими платформами, які можуть виконувати візуальний огляд рослин, знімати високоякісні зображення для виявлення ознак стресу, нерівномірностей росту, ураження хворобами чи шкідниками. Дані

комп'ютерного зору, поєднані з телеметрією рН, ЕС, температури та вологості, створюють основу для комплексних моделей оцінювання стану посівів.

У ширшому контексті система може бути інтегрована до єдиної Smart Agro платформи, яка охоплює інші IoT-модулі: ґрунтові сенсорні вузли, метеостанції, системи поливу відкритого ґрунту, склади добрив тощо. Це дає змогу порівнювати ефективність безґрунтового вирощування мікроґріну з традиційними технологіями, формувати спільну базу знань і сценарії для різних агротехнологічних умов.

Узагальнюючи, перспективи вдосконалення системи та її масштабування охоплюють модернізацію апаратної складової, розвиток алгоритмів аналітики й машинного навчання, підвищення надійності та безпеки, а також інтеграцію з іншими Smart Agro рішеннями. Це робить розроблену гідропонну платформу потенційною основою для створення повнофункціональної інтелектуальної ферми мікроґріну нового покоління.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження теоретичних, методологічних та практичних аспектів створення системи розумного точного землеробства на основі технологій Інтернету речей. Аналіз сучасних тенденцій розвитку аграрної галузі показав, що цифровізація та автоматизація агровиробництва є ключовими напрямками підвищення продуктивності, раціонального використання ресурсів та забезпечення екологічної стійкості. Світовий перехід до концепції Smart Precision Farming вимагає створення апаратно-програмних платформ, здатних забезпечувати безперервний моніторинг агропараметрів, оперативний аналіз даних та формування оптимальних керуючих рішень. У цьому контексті роль комп'ютерної інженерії є визначальною, оскільки саме вона забезпечує інтеграцію сенсорних мереж, бездротових протоколів, периферійних і хмарних обчислень, алгоритмів штучного інтелекту та керуючих пристроїв у єдину кіберфізичну систему.

Було розкрито теоретичні основи точного землеробства, проведено огляд архітектурних підходів до побудови IoT-систем та проаналізовано ключові апаратні засоби, що застосовуються у цифровому агромоніторингу. Було встановлено, що IoT-інфраструктура є базовою передумовою реалізації Smart Farming, оскільки забезпечує збір високоточних даних про стан ґрунтів, мікроклімат, рослинність і роботу техніки. Розглянуто сенсорні технології для вимірювання параметрів агроєкосистеми, включно з температурою і вологістю, освітленістю, концентрацією поживних елементів і рівнем розчину.

Розроблено апаратно-програмну архітектуру системи розумного точного землеробства. Було вибрано апаратні компоненти, сформовано їх структурну схему та розроблено прототип IoT-вузла на базі мікроконтролера ESP з підтримкою Wi-Fi.

У роботі реалізовано систему збору даних із сенсорів (DS18B20, DHT22, BH1750, рН, ЕС, HC-SR04), обробку телеметрії, керування виконавчими механізмами (насосом поливу), а також передачу даних на хмарний сервер через MQTT-протокол. Особливу увагу приділено енергоефективності вузла, стабільності обміну даними та можливості масштабування мережі для великих агрооб'єктів. Представлено програмний код прошивки, який реалізує основні функції системи, включно з логікою поливу.

Проведено тестування та оцінку працездатності запропонованої системи в умовах, наближених до реальних. Було встановлено, що розроблений комплекс демонструє стабільну роботу, забезпечує коректні вимірювання агропараметрів і дозволяє оперативно реагувати на зміну стану живильного розчину чи мікроклімату. Було підтверджено ефективність застосування ультразвукового контролю рівня рідини, цифрових датчиків температури, фотометричних сенсорів та хімічних сенсорів рН та ЕС для задач агромоніторингу.

Окремо було зазначено перспективність інтеграції алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування вологості, родючості та оптимізації режимів поливу. Отримані результати підтвердили, що поєднання IoT-сенсорів, мережевих протоколів, хмарної аналітики та комп'ютерного керування дозволяє створити автономну, адаптивну та масштабовану систему розумного точного землеробства. Запропонована архітектура може бути розширена для великих тепличних комплексів, відкритих полів, вертикальних ферм та автоматизованих агромодулів.

Підсумовуючи, варто зазначити, що магістерська робота досягла поставленої мети та виконала всі дослідницькі завдання. Результати дослідження підтверджують важливість інтеграції IoT-технологій у сучасні агротехнологічні процеси та демонструють практичну цінність використання комп'ютерної інженерії для створення інтелектуальних систем управління сільськогосподарським виробництвом. Проведене дослідження є вагомим внеском у розвиток цифрового землеробства та створює основу для впровадження інноваційних рішень у реальний аграрний сектор.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковальчук П., Поліщук М. Інтернет речей у розумному точному землеробстві без ґрунту: перспективи та виклики сталого агровиробництва. Програмно-визначена мережева архітектура для Інтернету речей: концепція та виклики. *Науковий часопис «Технічні вісті»*. № 1(60), 2(61). Львів, 2025. С. 72-74.
2. Dutta M., Sandhu J.K., Kaur M., Gupta D., Tharewal S., Goyal D., Alzubi A.A., Alanazi J.M. Internet of Things-Based Smart Precision Farming in Soilless Agriculture: Opportunities and Challenges for Global Food Security. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2503.13528> (дата звернення: 05.10.2025).
3. Балишев Марат. Вплив індустріальних революцій на розвиток аграрної техніки та цифрової автоматизації землеробства. *Історія науки і біографістика*. URL: <https://inb.dnsgb.com.ua/2025-2/01.html> (дата звернення: 05.10.2025).
4. Mahmood M.R., Matin M.A., Goudos S.K., Karagiannidis G. Machine Learning for Smart Agriculture: A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. Vol. 5, № 6. 2024. P. 2568-2588.
5. Ali Ashoor Issa, Safa Majed, S. Abdul Ameer, Hassan M. Al-Jawahry. Farming in the Digital Age: Smart Agriculture with AI and IoT. *E3S Web of Conferences*. STAR, 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/377439150_Farming_in_the_Digital_Age_Smart_Agriculture_with_AI_and_IoT (дата звернення: 05.10.2025).
6. Ganapathi Durga Sai Prasad, A. Vanathi, B. S. Kiruthika Devi. A Review on IoT Applications in Smart Agriculture. *Recent Developments in Electronics and Communication Systems*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/367066098_A_Review_on_IoT_Applications_in_Smart_Agriculture (дата звернення: 05.10.2025).
7. Vijendra Kumar, Kul Vaibhav Sharma, Naresh Kedam, Anant Patel, Tanmay Ram Kate, Upaka Rathnayake. A comprehensive review on smart and sustainable

agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524000923> (дата звернення: 05.10.2025).

8. Radwa A.O. Optimizing IoT communication for enhanced data transmission in smart farming ecosystems. *Expert Systems with Applications*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417424027465> (дата звернення: 05.10.2025).

9. Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S., Baek J-H. Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1587869/full> (дата звернення: 07.10.2025).

10. Gurpreet Singh, Sandeep Sharma. A comprehensive review on the Internet of Things in precision agriculture. *Multimedia Tools and Applications*. Vol. 84. 2025. P. 18123-18198.

11. Dhanasekar S. A comprehensive review on current issues and advancements of Internet of Things in precision agriculture. *Computer Science Review*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574013724000777> (дата звернення: 07.10.2025).

12. Maged E.A. Mohammed, Muhammad Munir. Chapter 3 - Towards smart farming: applications of artificial intelligence and internet of things in precision agriculture. *Hyperautomation in Precision Agriculture*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780443241390000035> (дата звернення: 07.10.2025).

13. Ashwini A., Sriram S.R., Manoj Prabhakar J., Seifedine Kadry. Cultivating the Future with Internet of Things Empowered on Smart Agriculture Solutions. *Networked Sensing Systems*. 2025. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781394310890.ch10> (дата звернення: 07.10.2025).

14. Соколік В.Д., Хамітов Р.Р., Іваненко В.О., Безушко О.Є. Сталий розвиток громад в умовах діджиталізації: інноваційні моделі управління з використанням ШІ та цифрових технологій. *Modern Economics*. № 50. 2025. С. 175-181.
15. Morchid A., Rachid El Alami, Sabbar Y., Aeshah A. Raezah. Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural Sustainability: Benefits and challenges. *Ain Shams Engineering Journal*. URL: https://www.researchgate.net/publication/374337352_Applications_of_internet_of_things_IoT_and_sensors_technology_to_increase_food_security_and_agricultural_Sustainability_Benefits_and_challenges (дата звернення: 28.10.2025).
16. Navarro E., Costa N., Pereir A. A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. *Sensors*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7436012/pdf/sensors-20-04231.pdf> (дата звернення: 28.10.2025).
17. Microcontroller ATmega328P. *Atmel Corporation*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (дата звернення: 30.10.2025).
18. ESP32-WROOM-32 Datasheet. *Espressif Systems*. URL: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3320/3320_module_datasheet.pdf (дата звернення: 30.10.2025).
19. Raspberry Pi (Zero 2W/4B/5). *Raspberry Pi*. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/> (дата звернення: 30.10.2025).
20. Al-Rawi M.A.M. Low-Cost Soil Moisture Sensors' Assessment for their Accuracy after Calibration Through the Gravimetric Method. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. Vol. 56 (1). 2024. URL: <https://sabraojournal.org/wp-content/uploads/2024/03/SABRAO-J-Breed-Genet-56-1-353-369-MS23-171.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
21. HW-101HW-moisture sensor V1.2. *Shenzhen haiwang sensor co*. URL: <https://www.datocms-assets.com/28969/1662716326-hw-101-hw-moisture-sensor-v1-0.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).

22. TEROS 12. *METER Group*. URL: <https://www.labcell.com/media/140632/teros12%20manual.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
23. DS18B2. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. *Maxim Integrated*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
24. Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC. *Technical Note*. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
25. TSL2591 Light-to-Digital Converter. *ams OSRAM Group*. URL: <https://look.ams-osram.com/m/c901de8e97608f8/original/TSL2591-DS000338.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
26. VEML7700. High Accuracy Ambient Light Sensor With I2C Interface. *Vishay Semiconductors*. URL: <https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
27. EZO-pH. *Atlas Scientific*. URL: https://files.atlas-scientific.com/pH_EZO_Datasheet.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
28. Gravity: Analog pH Sensor/Meter Kit V2. SKU:SEN0161-V2. *DFRobot*. URL: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0161-V2_Web.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
29. Understanding Duty Cycle in LoRaWAN: Regulations, Use Cases, and Best Practices. *Actility's All Rights Reserved*. URL: <https://www.actility.com/understanding-duty-cycle-lorawan/> (дата звернення: 03.11.2025).
30. Power Consumption Verification. *Espressif Systems*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-faq/en/latest/test-verification/power-consumption-verification.html> (дата звернення: 04.11.2025).
31. STC vs NOCT: Understanding Test Conditions For Solar Panels. *The GREENWATT*. URL: <https://thegreenwatt.com/stc-vs-noct/> (дата звернення: 04.11.2025).

32. LiFePO₄ Battery Cycle Life & Durability. *The Lithium Battery Specialists*. URL: <https://ecotreelithium.co.uk/news/lifepo4-battery-cycle-life-and-durability/> (дата звернення: 04.11.2025).
33. Power hungry in deep sleep. *Arduino*. URL: <https://forum.arduino.cc/t/power-hungry-in-deep-sleep/1204775> (дата звернення: 04.11.2025).
34. IoT Agriculture Monitoring System (ESP32). *EasyEDA*. URL: <https://oshwlab.com/moinyunus/iot-agriculture-monitoring-system-esp32> (дата звернення: 07.11.2025).