

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система автоматичного збору даних на основі IoT-технологій»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

_____	Ярослав МЕЛЬНИК
(підпис)	Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:
здобувач вищої освіти
група ІСД-42

Ярослав МЕЛЬНИК

Керівник:

Віктор САГАЙДАК

Рецензент:

Київ - 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ СТУДЕНТУ

Мельник Ярослав Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система автоматичного збору даних на основі
IoT-технологій»

керівник кваліфікаційної роботи Віктор САГАЙДАК, доктор філософії

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних
технологій від « ____ » _____ 20__ р. № ____

2. Строк подання кваліфікаційної роботи « ____ » _____ 20__

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: аналіз сучасних підходів до застосування IoT-технологій у сільському господарстві; визначення основних параметрів середовища, що впливають на вирощування культур (температура, вологість повітря і ґрунту, освітленість, рівень CO₂ тощо) огляд наявних сенсорів для моніторингу цих параметрів; дослідження технологій та платформ для збору і обробки даних.

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

1. Теоретичні основи створення систем автоматичного збору даних у сільському господарстві.
2. Проектування системи автоматичного збору даних для підвищення ефективності вирощування культур.
3. Розробка програмного забезпечення та тестування системи.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «___» _____ 20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз теоретичних основ та літературних джерел щодо створення систем автоматичного збору даних у сільському господарстві.	01.04.2025 - 14.04.2025	Виконав
2	Огляд сенсорів та платформ збору даних для моніторингу умов вирощування культур.	15.04.2025 - 19.04.2025	Виконав
3	Проектування апаратно-програмної системи моніторингу.	20.04.2025 - 04.05.2025	Виконав
4	Реалізація та налагодження апаратної частини системи.	05.05.2025 - 14.05.2025	Виконав
5	Розробка та налагодження програмного забезпечення мікроконтролера.	15.05.2025 - 25.05.2025	Виконав
6	Написання та оформлення пояснювальної записки, підготовка до захисту.	26.05.2025 - 28.05.2025	Виконав

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ярослав МЕЛЬНИК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Віктор САГАЙДАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра : 55 сторінок, 26 рисунків, 5 таблиць, 18 джерел.

Мета роботи – спроектувати та реалізувати IoT-систему автоматичного збору даних для моніторингу умов вирощування сільськогосподарських культур з метою підвищення ефективності агровиробництва.

Об'єкт дослідження – система автоматизованого збору даних у сільському господарстві на основі IoT-технологій.

Предмет дослідження – апаратно-програмні рішення (сенсори, мікроконтролери, мережеві протоколи, платформи) для автоматизованого збору та обробки даних про параметри середовища в аграрному виробництві.

Короткий зміст роботи: Кваліфікаційна робота складається з трьох розділів. У першому розділі розглянуто застосування технологій Інтернету речей у сільському господарстві, визначено фактори впливу на ріст і врожайність культур, оглянуто сенсори контролю параметрів середовища та проаналізовано платформи й мережеві технології для збору й обробки даних. У другому розділі спроектовано систему автоматичного збору даних: обрано компоненти (ESP32 і датчики) та розроблено архітектуру апаратної частини IoT-системи. У третьому розділі розроблено програмне забезпечення мікроконтролера та сервера: реалізовано алгоритм зчитування сенсорних даних і передавання протоколом MQTT на сервер, інтегровано мобільний застосунок для моніторингу в реальному часі; розроблено сценарій розгортання системи в реальних (польових) умовах

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, СЕНСОРИ, МОНІТОРИНГ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО, ЗБІР ДАНИХ, МІКРОКОНТРОЛЕРИ

ABSTRACT

Text part of the bachelor level qualification work: 55 pages, 26 figures, 5 tables, 18 sources.

The purpose of the work - is to design and implement an IoT system for automatic data collection to monitor crop growing conditions in order to increase the efficiency of agricultural production.

The object of the study is an automated data collection system in agriculture based on IoT technologies.

The subject of the study is hardware and software solutions (sensors, microcontrollers, network protocols, platforms) for automated data collection and processing of environmental parameters in agricultural production.

Summary of the work: The qualification work consists of three chapters. The first chapter discusses the application of Internet of Things technologies in agriculture, identifies factors affecting the growth and yield of crops, reviews environmental parameter sensors, and analyzes platforms and network technologies for data collection and processing. In the second chapter, an automatic data collection system is designed: components (ESP32 and sensors) are selected, and the hardware architecture of the IoT system is developed. In the third chapter, the microcontroller and server software are developed: the algorithm for reading sensor data and transferring it via the MQTT protocol to the server is implemented, a mobile application for real-time monitoring is integrated, and a deployment scenario for the system in real (field) conditions is developed.

KEYWORDS: INTERNET OF THINGS, SENSORS, MONITORING, AUTOMATION, AGRICULTURE, DATA COLLECTION, MICROCONTROLLERS

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	10
1.1 Використання IoT-технологій у сільському господарстві.....	10
1.2 Основні параметри, що впливають на вирощування культур.....	14
1.3 Огляд сенсорів для моніторингу параметрів середовища в теплицях та на полях.....	16
1.4 Огляд технологій та платформ для збору і обробки даних.....	22
2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР.....	36
2.1 Вибір сенсорів і мікроконтролерів для системи.....	36
2.2 Архітектура та реалізація апаратної частини системи.....	41
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ.....	46
3.1 Налаштування середовища розробки для мікроконтролерів ESP.....	46
3.2 Програмний алгоритм збору та обробки даних.....	48
3.3 Інтеграція мобільного додатку або веб-платформи для моніторингу в реальному часі.....	54
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	62
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	65

ВСТУП

Актуальність теми. Сільське господарство є критично важливою галуззю, від якої залежить продовольча безпека. В умовах зростання населення та змін клімату постає потреба підвищувати ефективність вирощування сільськогосподарських культур. Традиційні методи моніторингу стану посівів та умов довкілля часто не забезпечують оперативного й точного отримання даних, що може призводити до недовикористання ресурсів або втрат врожаю. Інтернет речей (IoT) відкриває нові можливості в аграрному секторі: мережі датчиків здатні безперервно збирати інформацію про ґрунтову вологість, температуру, освітленість, стан рослин тощо в режимі реального часу. Це дозволяє фермерам приймати обґрунтовані рішення – своєчасно поливати, вносити добрива чи коригувати мікроклімат – тим самим оптимізуючи використання ресурсів і підвищуючи врожайність. Отже, розробка систем автоматичного збору даних на основі IoT-технологій для агросектора є актуальною науково-практичною задачею, що відповідає сучасним тенденціям впровадження цифрових технологій у сільське господарство та концепції точного землеробства.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є розробка і впровадження системи автоматичного збору даних на основі IoT-технологій для моніторингу умов вирощування сільськогосподарських культур з метою підвищення ефективності їх виробництва. Іншими словами, робота спрямована на створення програмно-апаратного комплексу, що дозволить у реальному часі відстежувати ключові агротехнічні показники та оперативно застосовувати заходи для оптимізації процесів вирощування.

Об’єкт дослідження – процес моніторингу та контролю параметрів середовища вирощування сільськогосподарських культур в контексті підвищення ефективності агровиробництва.

Предмет дослідження – IoT-технології, сенсорні пристрої та програмні засоби, призначені для автоматичного збору, передачі та обробки даних про умови вирощування культур (вологість ґрунту, температура, освітленість тощо) з подальшим використанням цих даних для оптимізації агротехнологічних процесів.

Наукові завдання. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан використання IoT-технологій у сільському господарстві та визначити перелік ключових параметрів середовища, що впливають на ріст і продуктивність культур;
2. Здійснити огляд та обґрунтування вибору оптимальних сенсорів і мікроконтролера для побудови системи збору даних, враховуючи особливості аграрного середовища;
3. Спроекувати архітектуру апаратної частини IoT-системи, розробити структурну схему підключення датчиків до обраної платформи та методи передачі даних;
4. Розробити програмне забезпечення для збору, накопичення та первинної обробки даних, а також реалізувати засоби для їх віддаленого моніторингу (мобільний додаток або веб-інтерфейс);
5. Розробити сценарій розгортання та експлуатації запропонованої IoT-системи в реальних аграрних умовах, включаючи рекомендації щодо розміщення сенсорів, налаштування програмного забезпечення, особливостей передачі та аналізу даних, а також потенційного впливу запропонованого рішення на ефективність вирощування сільськогосподарських культур.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи застосовано комплекс методів, зокрема: методи аналізу і синтезу (для вивчення літературних джерел та існуючих рішень у галузі IoT і агротехнологій), системного підходу та проектування (для розробки архітектури системи та вибору компонентів), експериментальні методи (для апробації та тестування створеного прототипу в

реальних умовах) та комп'ютерного моделювання/програмування (для розробки і відлагодження програмного забезпечення системи).

Галузь застосування результатів. Результати роботи можуть знайти застосування в галузі сільського господарства, особливо у сфері точного землеробства та тепличного господарства. Запропонована IoT-система моніторингу може бути впроваджена на фермерських господарствах для автоматизації контролю за станом полів і теплиць. Це дозволить агровиробникам оперативно реагувати на зміни умов (наприклад, вологість ґрунту чи температура повітря) та оптимізувати використання води, добрив і енергії. Таким чином, впровадження розробленої системи сприятиме підвищенню продуктивності вирощування культур, зниженню витрат і ризиків, пов'язаних із людським фактором, а також забезпечить більш сталий та ефективний аграрний менеджмент.

Апробація. Основні положення і результати бакалаврської роботи доповідались на:

- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT», ДУІКТ, 2025.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1 Використання IoT-технологій у сільському господарстві

Інтернет речей у сільському господарстві дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу та приймати рішення на основі зібраних даних, об'єднуючи датчики, пристрої та обладнання на фермерських господарствах. Завдяки IoT-датчикам фермери можуть контролювати вологість ґрунту, температуру та рівень поживних речовин, що забезпечує ефективне зрошення та внесення добрив.

Дрони з вбудованими IoT-технологіями використовуються для спостереження за станом посівів, дозволяючи оперативно виявляти хвороби або шкідників. До того ж IoT-системи інтегруються з автоматизованою технікою, зокрема тракторами та комбайнами, що дає змогу оптимізувати процеси посадки, поливу й збору врожаю, керуючись даними в режимі реального часу [1].

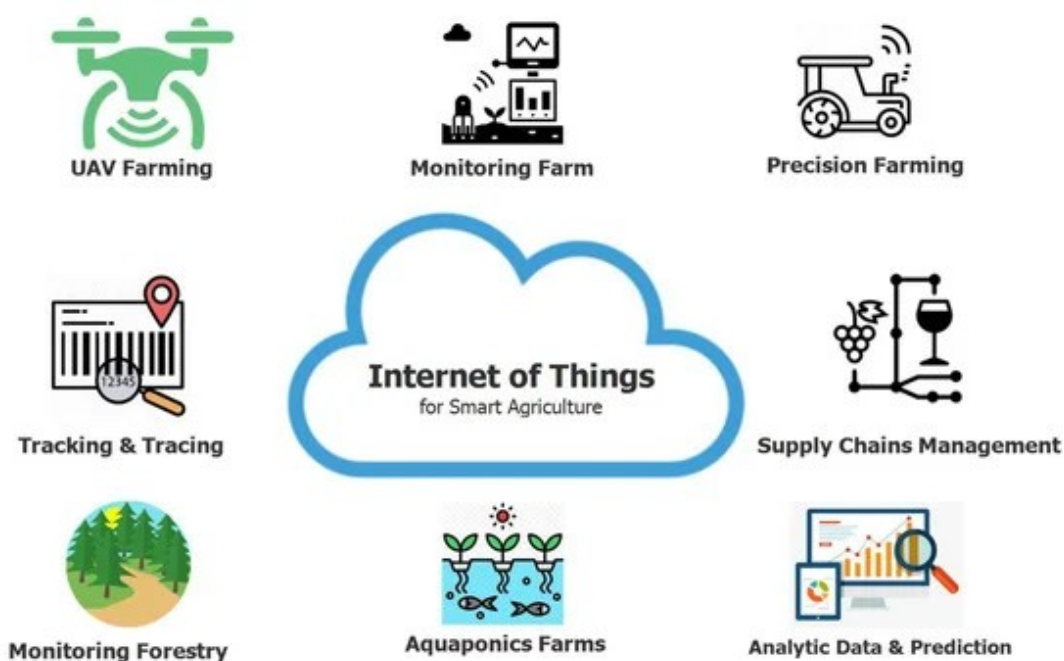


Рис. 1.1 Ілюстрація додатків IoT для розумного сільського господарства [2]

Забезпечуючи дані в режимі реального часу, IoT допомагає фермерам скоротити споживання води, добрив і пестицидів, що сприяє зниженню витрат та зменшенню впливу на довкілля. Завдяки точному моніторингу й оперативному виявленню проблем, таких як шкідники чи нестача поживних речовин, IoT підвищує врожайність сільськогосподарських культур. Раннє втручання дозволяє мінімізувати втрати й досягти максимальної продуктивності. [1]

У сільському господарстві можна моніторити та збирати різноманітні чинники, які впливають на аграрний та виробничий процес, такі як вологість ґрунту, вологість повітря, температура, рівень рН та інші. Залежно від конкретного сектору сільського господарства ці показники можуть змінюватися.

У секторі рослинництва ключовими факторами, що впливають на процес обробки землі та ефективність виробництва, є температура повітря, кількість опадів, вологість повітря та ґрунту, солоність, рівень сонячної радіації, наявність шкідників, рівень поживних елементів у ґрунті тощо. [2]

Моніторинг таких параметрів, як стан ґрунту, вологість і температура, а також прогнозування природних явищ, зокрема опадів і погодних умов, сприяють контролю за умовами вирощування сільськогосподарських культур. Це допомагає фермерам планувати та приймати рішення щодо зрошення, оптимізуючи виробництво і знижуючи витрати на оплату праці. Крім того, зібрані дані, в поєднанні з технологіями обробки великих даних, можуть забезпечити рекомендації для впровадження профілактичних та відновлювальних заходів проти шкідників і хвороб у сільському господарстві.

Архітектура IoT-пристрою включає датчики для збору даних із навколишнього середовища, виконавчі механізми з дротовими або бездротовими з'єднаннями, а також вбудовану систему, що містить процесор, пам'ять, модулі зв'язку, інтерфейси вводу-виводу та джерело живлення. Типова архітектура IoT-пристрою, орієнтованого на розумне сільське господарство, зображена на Рисунку 1.2.

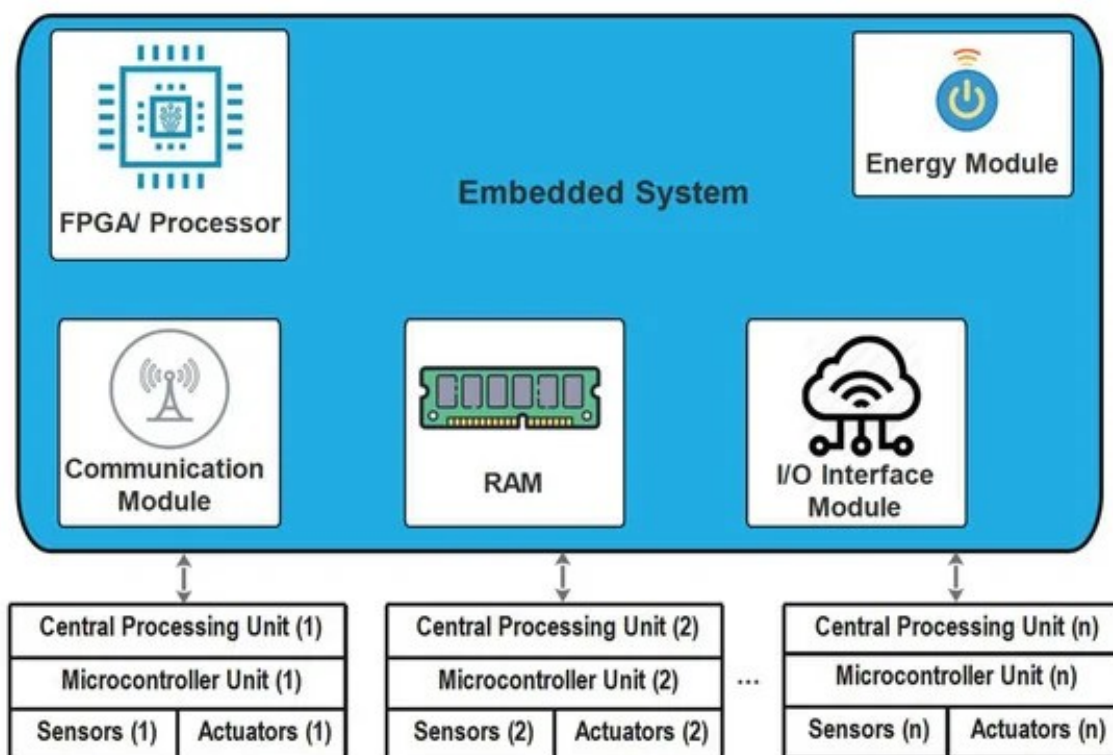


Рис. 1.2 Ілюстрація загальної архітектури пристрою IoT.[2]

Вбудовані системи є програмованими інтерактивними модулями, зокрема FPGA (field programmable gate arrays). Сенсорні пристрої спеціально створені для роботи в умовах відкритого середовища — на природі, у ґрунті, воді та повітрі — з метою вимірювання та збору параметрів навколишнього середовища, які впливають на сільськогосподарське виробництво, таких як рівень поживних речовин у ґрунті, вологість, температура тощо. Рішення для розумного землеробства зазвичай реалізуються на великих сільськогосподарських територіях і під відкритим небом, тому пристрої, що підтримують такі рішення, повинні мати унікальні характеристики. Серед них — стійкість до впливу погодних умов, вологі та коливань температур протягом усього життєвого циклу. Деякі з ключових особливостей таких пристроїв, які роблять IoT-пристрої оптимальними для розумного сільського господарства, наведені на рисунку 1.3.

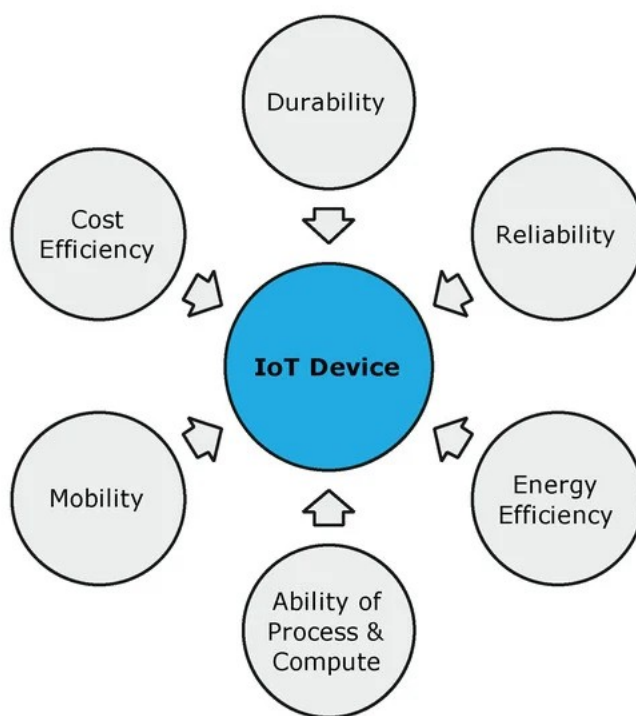


Рис. 1.3 Основні характеристики IoT-пристроїв. [2]

У залежності від виконуваних завдань у сфері розумного сільського господарства використовуються різні типи датчиків. Їх можна класифікувати на кілька основних категорій: (1) датчики розташування, (2) оптичні датчики, (3) механічні датчики, (4) електрохімічні датчики та (5) датчики потоку повітря. Ці пристрої забезпечують збір даних про такі параметри, як температура повітря та ґрунту, вологість повітря, ґрунту та листя, кількість опадів, швидкість і напрямок вітру, сонячна радіація та барометричний тиск [2].

У сфері розумного сільського господарства, крім основних завдань зондування, збору даних і керування пристроями для роботи в реальних умовах, зберігання та обробка даних також є важливими проблемами, які супроводжуються певними викликами. Обсяги зібраної інформації є значними, що робить традиційні методи зберігання, організації та обробки даних непридатними. Тому для розумного сільського господарства необхідно досліджувати та впроваджувати рішення для обробки великих даних.

Складність зберігання й обробки даних пояснюється унікальними особливостями цієї галузі, зокрема наявністю неструктурованих даних і різноманітних форматів, таких як текст, зображення, аудіо, відео, економічні показники та ринкова інформація. Сучасні рішення передбачають використання хмарних платформ для зберігання та аналізу даних, отриманих із ферм. Крім того, для зниження затримок, витрат і забезпечення якості обслуговування (QoS) пропонуються аналітичні підходи, такі як периферійні та туманні обчислення.[2]

1.2 Основні параметри, що впливають на вирощування культур

Фактори зовнішнього середовища, які впливають на врожайність сільськогосподарських культур, поділяються на абіотичні та біотичні обмеження. Їхній вплив значно посилюється через глобальне потепління, що спричиняє зміни клімату. Абіотичні стреси негативно позначаються на зростанні та продуктивності рослин, викликаючи численні морфологічні, фізіологічні, біохімічні та молекулярні зміни. До абіотичних обмежень належать характеристики ґрунту (його склад, рН, фізико-хімічні й біологічні властивості) та кліматичні фактори (посуха, холод, затоплення, тепловий стрес тощо).

Біотичні фактори включають як корисні організми (запилювачі, розкладачі органіки, природні вороги шкідників), так і шкідливі — зокрема, членистоногих, патогени, бур'яни, шкідників-хребетних, а також антропогенні зміни, що впливають на екосистему.

У сільському господарстві було впроваджено широкий спектр технологічних інновацій, таких як генетичне вдосконалення сортів, технології добрив, адаптивна мікробна технологія, використання пестицидів, сільськогосподарська техніка, а також агрономічні та управлінські підходи, включаючи інтегроване управління поживними речовинами та шкідниками. Ці досягнення стали можливими завдяки

дослідницьким програмам, спрямованим на вивчення їх впливу на підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

Згідно з дослідженнями, 1 кг поживного добрива здатний забезпечити до 8 кг зерна. Добрива вважаються ключовим фактором у рослинництві, оскільки вони забезпечують до 50% кінцевого врожаю. У 1990-х роках зростання світового виробництва продовольства значною мірою було обумовлене збільшенням використання азотних добрив у 6,9 раза та фосфорних добрив у 3,5 раза.[3]

Методи управління ґрунтами відіграють ключову роль у підвищенні ефективності сільськогосподарського виробництва та зменшенні негативного впливу на довкілля. Окрім боротьби з ерозією, що спричиняє втрату родючих земель, важливим є впровадження практик, спрямованих на запобігання забрудненню та деградації ґрунтів. Втрата верхнього шару ґрунту через ерозію водою чи вітром значно знижує його родючість і може призвести до нестабільного землеробства. Особливо критичною ця проблема є для посушливих і тропічних регіонів із низьким рівнем агрономічних технологій. З огляду на прогнози економічного зростання та зміни клімату до 2050 року, стає управління ґрунтами є важливим завданням для забезпечення продовольчої безпеки та збереження екосистем.

Крім того, велике значення має управління органічним вуглецем у ґрунтах (SOC), оскільки його запаси безпосередньо впливають на глобальний кругообіг вуглецю та зміну клімату. Збільшення SOC можна досягти завдяки вдосконаленню фотосинтетичних процесів рослин і зниженню швидкості розкладання органічної речовини. Застосування інноваційних технологій, таких як біовугілля, та вдосконалення селекції рослин із глибокою кореневою системою сприяють збільшенню секвестрації вуглецю в ґрунті. Окрім цього, використання сучасних методів молекулярної біології, зокрема секвенування другого покоління, дозволяє детально дослідити взаємодію мікроорганізмів із корінням рослин і родючістю

грунту, що відкриває нові можливості для ефективного управління ґрунтовими ресурсами.[4]

Сучасні технології відіграють ключову роль у подоланні впливу абіотичних та біотичних обмежень. Використання IoT-сенсорів для моніторингу вологості ґрунту, температури, вмісту поживних речовин і кліматичних змін дозволяє фермерам ефективніше керувати своїми ресурсами. Дрони, оснащені камерами та сенсорами, забезпечують виявлення хвороб і шкідників, а також спостереження за станом посівів у реальному часі. Наприклад, у Нідерландах широко застосовується система точного землеробства, яка поєднує сенсорні технології, дані з супутників і аналітику для досягнення оптимальної врожайності з мінімальним впливом на екосистему.

Ще одним важливим напрямком є впровадження сталих підходів до управління ґрунтами. Такі методи, як використання біовугілля, внесення компосту та селекція рослин із потужними кореневими системами, дозволяють збільшити вміст органічного вуглецю в ґрунті, сприяючи секвестрації вуглецю з атмосфери. У посушливих регіонах, таких як Ізраїль, активно застосовуються технології краплинного зрошення та датчики для моніторингу вологості, що дозволяє економити воду та покращувати родючість ґрунтів. Усе це підкреслює важливість інновацій для забезпечення продовольчої безпеки та збереження природних ресурсів.

1.3 Огляд сенсорів для моніторингу параметрів середовища в теплицях та на полях

Оптимізація параметрів навколишнього середовища в теплиці є ключовим фактором для підвищення продуктивності вирощування культур. До основних умов, що впливають на розвиток рослин, належать температура, вологість,

освітленість та вентиляція. Їх правильне поєднання дозволяє створити сприятливий мікроклімат, що сприяє максимальному врожаю. Наприклад, ефективна циркуляція повітря позитивно впливає на ріст і розвиток культур.

Контроль основних параметрів мікроклімату тепличного середовища є критичним для забезпечення стабільного росту культур. Застосування IoT-сенсорів дозволяє здійснювати постійний моніторинг і автоматичне регулювання цих показників.

Світло: освітлення відіграє важливу роль у фотосинтезі, що безпосередньо впливає на ріст рослин. Інтелектуальні датчики IoT дозволяють вимірювати рівень освітленості та автоматично регулювати штучне освітлення, компенсуючи недостатню інтенсивність природного світла.

Якість повітря: оптимальний рівень концентрації вуглекислого газу (CO_2) та кисню (O_2) є критично важливим для підтримки ефективного газообміну рослин. Сенсори IoT здійснюють безперервний моніторинг цих параметрів та коригують роботу вентиляційних систем для забезпечення сприятливого середовища.

Вентиляція: відповідна циркуляція повітря допомагає підтримувати стабільну температуру, вологість і рівень газообміну. Автоматизовані IoT-системи контролюють параметри середовища та регулюють роботу вентиляційних механізмів у реальному часі.

Температура: контроль температурного режиму є необхідним для запобігання перегріву або переохолодження рослин. IoT-датчики відстежують коливання температури та вносять відповідні корективи в роботу опалювальних систем, забезпечуючи оптимальний мікроклімат.

Вологість: рівень вологості впливає як на ріст рослин, так і на поширення захворювань. Датчики IoT дозволяють своєчасно реагувати на зміни вологості, активуючи системи зрошення, запотівання або інші механізми регулювання водного балансу.

Технологія Інтернету речей відіграє ключову роль у точному моніторингу тепличного середовища. IoT-системи забезпечують збір і обробку великих обсягів даних у реальному часі, що сприяє покращенню керування мікрокліматом, зниженню витрат ресурсів та підвищенню врожайності.

Розумні сенсорні мережі: інтелектуальні сенсорні системи збирають дані про температуру, вологість, якість повітря та інші параметри середовища. Це дозволяє агровиробникам оперативно аналізувати інформацію та вносити необхідні корективи у процес вирощування культур. Завдяки бездротовим технологіям можливо здійснювати моніторинг навіть віддалених об'єктів без потреби фізичної присутності персоналу.

Моніторинг зовнішніх і внутрішніх умов: окрім внутрішніх параметрів, важливим є контроль зовнішніх чинників, таких як погодні умови, температура навколишнього середовища та сонячна активність. Аналізуючи ці дані, оператори теплиць можуть адаптувати агротехнологічні процеси заздалегідь, запобігаючи потенційним стресовим впливам на врожай.

Обробка та збереження даних: застосування технологій Big Data у сільському господарстві дозволяє не лише накопичувати інформацію, але й виявляти закономірності, прогнозувати зміни та приймати більш обґрунтовані управлінські рішення. Дані з IoT-сенсорів можуть зберігатися у хмарних сервісах, що забезпечує доступність та безпеку інформації.

Автоматизація процесів: використання IoT-технологій дає змогу автоматизувати процеси поливу, освітлення та вентиляції без потреби ручного втручання. Це підвищує ефективність господарства, оптимізує витрати та створює сприятливі умови для вирощування сільськогосподарських культур.

Таким чином, застосування IoT у тепличному господарстві відкриває нові можливості для автоматизації агропроцесів та підвищення врожайності. Завдяки сучасним сенсорним технологіям можна створювати адаптивні системи управління

мікрокліматом, що значно покращує ефективність ведення тепличного господарства.[5]

Нижче наведено приклади сенсорів, що використовуються для моніторингу параметрів середовища в агросекторі.

Температурні сенсори. Температура є одним із ключових параметрів мікроклімату, що безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин. Для її контролю використовуються цифрові сенсори, зокрема DHT22, який забезпечує високу точність вимірювання та зчитування даних у реальному часі. Цей сенсор функціонує на основі цифрового термометра та гігрометра, що робить його універсальним рішенням для тепличного господарства. Його зовнішній вигляд наведено на рисунку 1.4.

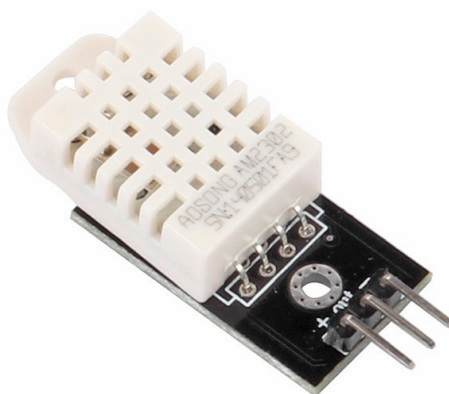


Рис. 1.4 Датчик температури DHT22 для вимірювання температури та вологості повітря

Датчики вологості ґрунту. Вологість ґрунту визначає доступність води для рослин, а її контроль дозволяє запобігти як пересиханню, так і надмірному зволоженню. Одним із поширених сенсорів є YL-69, який використовує резистивний метод для визначення рівня вологості. Його проста конструкція і

доступна вартість дозволяють широко застосовувати цей датчик у польових умовах. Зображення сенсора представлено на рисунку 1.5.

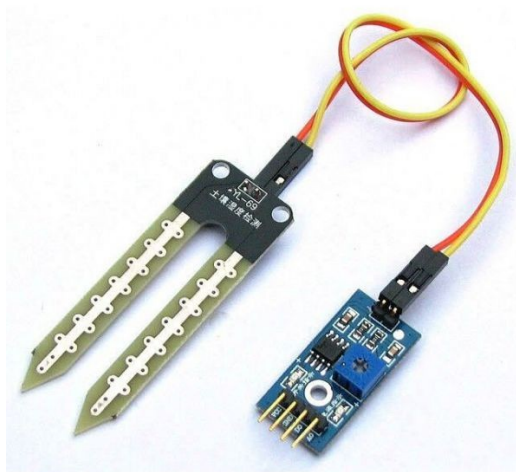


Рис. 1.5 Датчик вологості ґрунту YL-69 з резистивним методом вимірювання

Сенсори вуглекислого газу (CO_2). Контроль рівня CO_2 у тепличному повітрі є важливим для підтримки інтенсивного фотосинтезу. Сенсор МН-Z19 функціонує на основі інфрачервоного поглинання, що забезпечує високу точність вимірювань та стабільність у довготривалому використанні. Рисунок 1.6 ілюструє зовнішній вигляд цього сенсора.



Рис. 1.6 Сенсор МН-Z19 для моніторингу концентрації вуглекислого газу (CO_2)

Датчики освітленості. Рівень освітлення безпосередньо впливає на фотосинтетичну активність рослин. Світлочутливі сенсори, такі як TCS3200 або ВН1750, вимірюють інтенсивність світлового потоку й дають змогу автоматизувати процес регулювання штучного освітлення в теплиці. На рисунку 1.7 зображено приклад такого сенсора.



Рис. 1.7 Світлочутливий датчик TCS3200 для вимірювання рівня освітленості

Датчики кислотності (pH). Визначення кислотно-лужного балансу ґрунту та води є важливою умовою для засвоєння поживних речовин. Сенсор PH-4502C забезпечує оперативне вимірювання рівня pH за допомогою електродів, які реагують на зміну концентрації іонів водню в середовищі. Зображення сенсора наведено на рисунку 1.8.

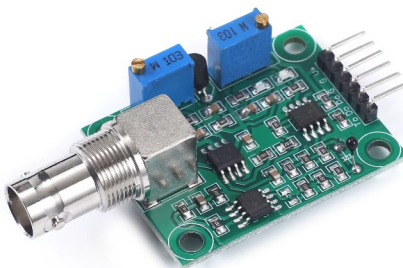


Рис. 1.8 Електродний сенсор PH-4502C для визначення кислотності ґрунту

Анемометри. Швидкість вітру впливає на температурний режим і випаровування вологи з поверхні ґрунту. Сенсор AWM 3100 дозволяє визначати силу вітру на відкритих ділянках або у вентильованих теплицях. Пристрій використовує обертові елементи, які перетворюють механічний рух в електричний сигнал, що підлягає цифровій обробці. На рисунку 1.9 представлено приклад анемометра, що використовується для вимірювання швидкості вітру в агросистемах.



Рис. 1.9 Анемометр AWM 3100 для вимірювання швидкості вітру

1.4 Огляд технологій та платформ для збору і обробки даних

Сучасні IoT-рішення у сільському господарстві базуються на комплексних багаторівневих архітектурах, які поєднують сенсори, мережі передачі даних і аналітичні системи. Така архітектура, представлена на рисунку 1.10, дозволяє автоматизувати процеси та підвищити ефективність аграрного виробництва. Вона ґрунтується на зборі, аналізі та обробці даних у реальному часі, що дозволяє аграріям приймати точні рішення щодо догляду за культурами.

На рівні збору даних основну роль відіграють сенсори, які моніторять ключові параметри навколишнього середовища, такі як температура, вологість ґрунту, атмосферний тиск і рівень парникових газів. Наприклад, датчики вологості ґрунту надають дані в реальному часі, що допомагає оптимізувати системи зрошення. Крім того, застосовуються газові сенсори для відстеження концентрації CO₂ та метану, NDVI-датчики для оцінки стану рослин та метеостанції для аналізу кліматичних змін.

Ці елементи формують екологічний профіль поля, що є основою точного землеробства. Водночас необхідно критично підходити до визначення «розумних» агросистем, оскільки їх ефективність залежить від точності моделей та адаптації до локальних умов. Інтеграція передових технологій збору даних в IoT-системи дозволяє створювати більш гнучкі й адаптивні аграрні рішення, які можуть оперативно реагувати на зміну навколишнього середовища.

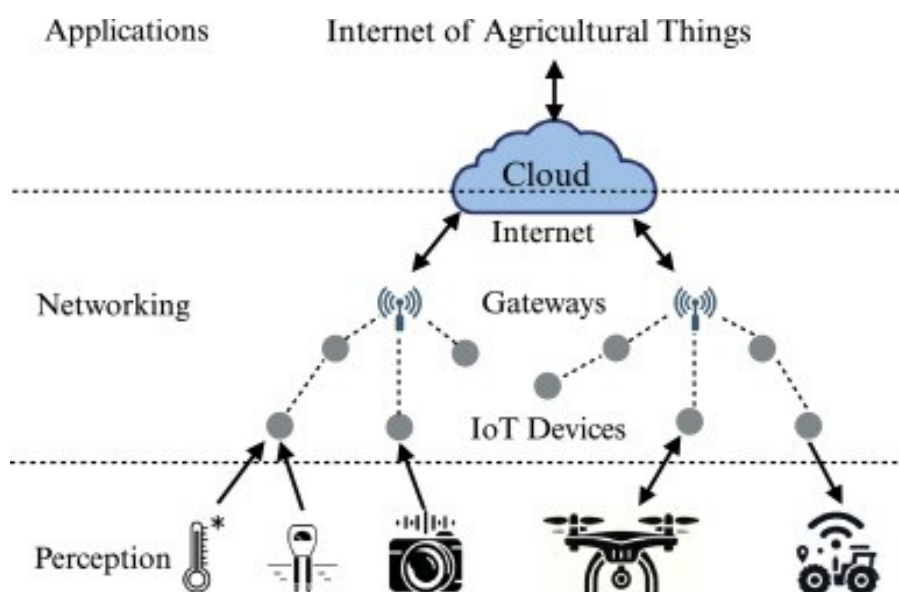


Рис. 1.10 Архітектура Інтернету сільськогосподарських речей (IoAT).

Сільськогосподарська техніка, зокрема трактори, дедалі частіше оснащується датчиками та виконавчими механізмами для автоматизації процесів. Трактори з GPS-системами здатні виконувати точні завдання, такі як посадка та внесення

добрих, завдяки вбудованим датчикам і автоматизованим механізмам. Дрони значно розширюють можливості таких рішень, здійснюючи аерофотозйомку та збір даних на великих площах, що сприяє більш точній оцінці стану сільськогосподарських культур. На мережевому рівні важливим є забезпечення стабільного зв'язку між усіма компонентами системи. Водночас термін «безшовне з'єднання» може не відповідати реальним умовам, оскільки передача даних у хмару потребує надійної інфраструктури, яка не завжди доступна в усіх регіонах. Концепція Інтернету сільськогосподарських речей (IoAT) охоплює низку підходів, таких як точне землеробство, прогнозоване обслуговування, моніторинг посівів і оптимізація логістичних процесів. Попри високий потенціал таких рішень, їх успішне впровадження часто залежить від локальних економічних та інфраструктурних умов.

Таким чином, поєднання наземних і повітряних платформ розширює можливості збирання аграрних даних на різних рівнях — від локального до стратегічного, що створює підґрунтя для точного землеробства та ефективного управління ресурсами.

Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) у кліматично орієнтоване сільське господарство є ключовим кроком до підвищення адаптивності аграрних практик до змін довкілля. IoT включає мережу взаємопов'язаних датчиків і пристроїв, що дозволяє збирати дані в реальному часі з різних сільськогосподарських елементів, таких як поля, худоба та техніка. Цінність IoT полягає в його здатності надавати більш детальну та точну інформацію, що допомагає оптимізувати використання ресурсів і покращити процеси прийняття рішень. Знання про стан ґрунту, рівень вологості та погодні умови дозволяє застосовувати більш ефективні методи для підвищення врожайності та стійкості. Проте важливо сумніватися в припущенні, що IoT безумовно «революціонізує» сільське господарство в усіх умовах. Можливості віддаленого моніторингу та управління за допомогою IoT дозволяють фермерам більш оперативно реагувати на

зміни клімату, але його впровадження обмежене в багатьох регіонах через інфраструктурні, фінансові та освітні бар'єри, що робить ці переваги недоступними для всіх. У цьому контексті важливо критично оцінити потенціал IoT для розвитку сталих і кліматостійких практик. Його ефективність залежить від місцевої адаптації, наявності надійних моделей та соціально-економічних умов. Без вирішення цих основних проблем інтеграція IoT у сільське господарство може лише посилити існуючі нерівності, надаючи перевагу тим фермерам, які мають найкращі ресурси для застосування цих технологій.

Отже, ефективне впровадження IoT-рішень потребує не лише технічної готовності, а й соціально-економічної підтримки для зменшення цифрової нерівності.

Інтеграція технологій Artificial Intelligence of Things (AIoT) у розумне сільське господарство покращує обробку даних і прийняття рішень завдяки передовим сенсорним технологіям для моніторингу викидів в реальному часі, зокрема газів, таких як CO₂, CH₄ і N₂O. Технології, як недисперсійні інфрачервоні (NDIR) датчики, електрохімічні та фотоакустичні газові датчики, дозволяють точно вимірювати викиди, пов'язані з використанням добрив та управлінням тваринництвом. Ці дані, в поєднанні з моделями на основі штучного інтелекту, сприяють зменшенню викидів і підтримують сталий розвиток сільського господарства. Окрім того, хоча системи IoT відстежують вологість ґрунту, екологічні та мікрометеорологічні дані, вони не вимірюють безпосередньо параметри рослин, такі як рН або температура. AIoT, у свою чергу, використовує датчики навколишнього середовища та прогнозні моделі для визначення стану рослин, враховуючи фактори, як рівень поживних речовин, температура та вологість, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів для покращення росту та сталого розвитку культур.

На основі сучасних досліджень виокремлюють шість ключових напрямів застосування IoT у сільському господарстві, які охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти:

4. **Збір даних для інформованих методів ведення сільського господарства** – використання IoT для збору важливих сільськогосподарських даних за допомогою датчиків, що вимірюють параметри навколишнього середовища та врожаю, такі як температура, вологість, рН, колір листя тощо.
5. **Автоматизація методів ведення сільського господарства** – включає використання бездротових мереж датчиків та виконавчих механізмів для прийняття хмарних рішень і оптимізації систем зрошення. Цей підхід застосовує різні датчики і роботи для автоматизованих сільськогосподарських операцій, дотримуючись принципів видимості системи, безпеки, простоти, зворотного зв'язку, розтяжності та зниження когнітивного навантаження.
6. **Управління в мережі для зниження енергоспоживання та накладних витрат при збереженні якості обслуговування (QoS)** – оптимізація використання ресурсів у мережі IoT, включаючи канали зв'язку та джерела живлення. Інновації, як розподіл ресурсів з урахуванням схем трафіку та енергоефективні мережі через штучний інтелект, сприяють цим зусиллям. Однак ефективність цих рішень залежить від точності моделей, що лежать в основі обробки та інтеграції даних.
7. **Електричні та автономні машини** – датчики IoT, вбудовані в машини, забезпечують моніторинг їх продуктивності в реальному часі, що дозволяє оптимізувати їх використання та зменшити залежність від викопного палива. Однак ефективність роботи таких датчиків у різних умовах сільського господарства є проблемною, зокрема в регіонах з обмеженим доступом до інфраструктури.

8. **Зрошувальні системи на сонячних батареях** – датчики IoT контролюють вологість ґрунту та погодні умови, щоб зрошення здійснювалося лише за необхідності, оптимізуючи використання води та енергії. Проте ці системи стикаються з проблемами стабільної роботи в умовах змінного сонячного світла або екстремальних погодних явищ. Початкові витрати на такі системи та інфраструктуру даних також можуть обмежити їх поширення.
9. **Масштабування технологій точного землеробства** – обладнання з підтримкою IoT, як трактори з GPS-керуванням, допомагає знизити витрати палива через оптимізацію маршрутів. Однак точне землеробство сильно залежить від надійних даних та стабільного зв'язку, що може бути важким для досягнення в районах без належного покриття мережі.

Кожна з цих областей має значний потенціал для покращення сільськогосподарських практик, роблячи їх більш ефективними та стійкими. Однак для досягнення максимального потенціалу IoT в сільському господарстві необхідно підвищувати точність і надійність систем, щоб зменшити ризик помилкових рішень, заснованих на неточних або неправильно інтерпретованих даних.

Таким чином, побудова гнучкої архітектури обробки великих даних дозволяє фермерам отримувати оперативні аналітичні висновки, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень у точному землеробстві. Як показано на рисунку 1.11, загальна архітектура екосистеми Big Data для розумного сільського господарства складається з кількох основних рівнів.

1. **Інфраструктурний рівень:** це фундамент архітектури, який включає хмарні платформи, такі як Amazon Web Services, Google Cloud Platform та Microsoft Azure. Вони надають масштабовані сховища даних і обчислювальні потужності для обробки великих обсягів інформації. Сюди також належить мережева інфраструктура для передачі даних і сервери, які формують фізичну основу для зберігання та обробки.

2. **Шар типів даних і джерел:** цей рівень охоплює різні формати даних, що обробляються у системах Big Data:

1. Структуровані дані — зберігаються в реляційних базах, таких як MySQL, PostgreSQL.
2. Напівструктуровані дані — мають гнучку структуру, як-от XML або JSON.
3. Неструктуровані дані — включають текст, зображення, відео, просторові карти тощо.

Ці дані надходять із сенсорів, метеостанцій, супутникових знімків, дронів, GPS-обладнання, формуючи повну картину аграрного середовища.

3. **Рівень зберігання та інтеграції даних (Data Storage and Integration Systems):** використовуються платформи Hadoop, Cloudera та інші системи для зберігання, агрегації та інтеграції даних із різних джерел. Завдяки консолідації інформації в єдиний формат, забезпечується можливість комплексного аналізу даних незалежно від їх походження чи структури.

4. **Рівень доступу до даних і попередньої обробки (Data Access and Pre-Processing):** На цьому рівні реалізується підготовка даних до аналізу. Використовуються:

1. SQL та NoSQL для управління даними;
2. API — для інтеграції з іншими сервісами;
3. ETL-процеси, OpenRefine, NumPy (для числових даних), OpenCV (для зображень) — для очищення, структурування та перетворення даних.

5. **Аналітичні двигуни (Analytics Engines):** Цей рівень відповідає за інтелектуальний аналіз і побудову моделей. Застосовуються:

1. R, SAS — для статистичної обробки;
2. TensorFlow — для машинного навчання та прогнозування;
3. Weka, RapidMiner — для виявлення трендів, закономірностей та побудови класифікаційних моделей;

4. Apache Spark — для геопросторового аналізу земельних ділянок, мапування та зонування.

6. **Візуалізація та моделювання:** Завершальний рівень забезпечує перетворення складної аналітики у зрозумілі графіки та дашборди. Інструменти Tableau та Power BI дозволяють формувати інтерактивні візуалізації та звіти, які допомагають фермерам швидко оцінювати ситуацію та приймати ефективні рішення щодо ведення господарства. Також на цьому етапі створюються прогностичні моделі, що дають змогу проактивно планувати дії відповідно до поточних і майбутніх умов.

Ці дані збираються з різноманітних джерел, таких як віддалені датчики, супутникові знімки, метеостанції та обладнання з підтримкою GPS, що дозволяє отримати повне уявлення про сільськогосподарське середовище та забезпечує ефективне прийняття рішень у процесі управління сільським господарством.

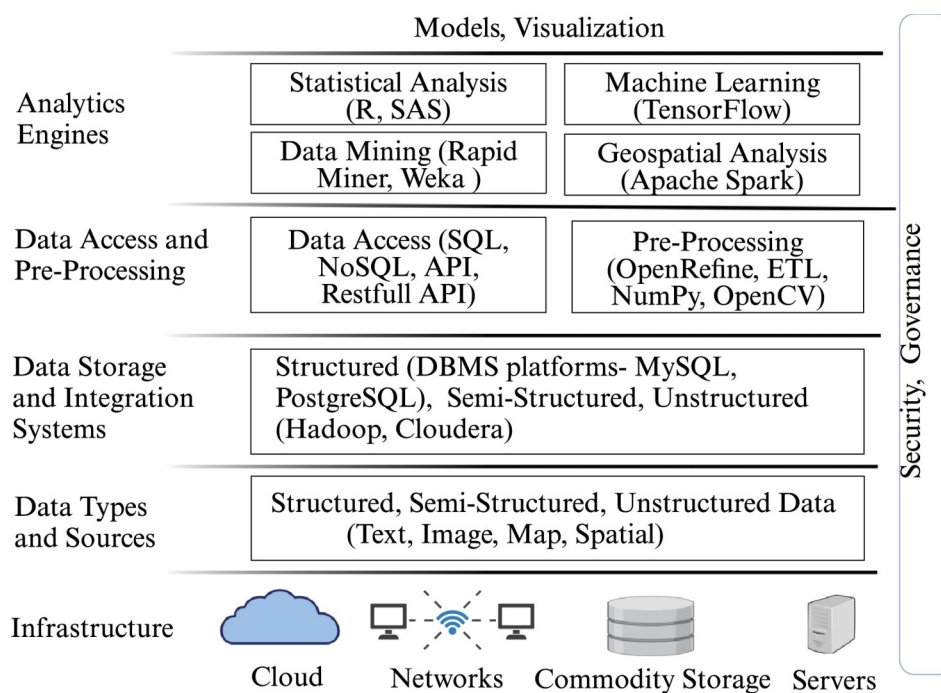


Рис. 1.11 Архітектура екосистеми великих даних для розумного сільського господарства.

Ці компоненти архітектури складають повний ланцюг від збору даних до прийняття практичних рішень, що забезпечує ефективне управління сільським господарством на основі великих даних.

Великі дані дійсно стають важливим елементом у трансформації сільського господарства, роблячи його більш керованим, ефективним та стійким до зміни клімату. Інтеграція великих даних у кліматично розумне сільське господарство (CSA) дозволяє використовувати різні підходи для вирішення важливих аспектів сільськогосподарських практик і управління. Один із основних напрямів — це адаптація до мінливості клімату.

Наприклад, дослідження використовувало великі обсяги кліматичних даних для допомоги в адаптації до зміни клімату. Вони розробили веб-рішення, яке дозволяє відображати карти середніх сезонних температур. Такі інструменти надають фермерам можливість бачити зміни клімату в реальному часі та порівнювати їх із історичними даними, що дозволяє оперативно коригувати сільськогосподарські практики.

Аналітика Big Data також допомагає фермерам, які використовують методи точного землеробства, адаптувати свої методи вирощування до мінливих кліматичних умов. Ці дані можуть включати температуру повітря, вологість, рівень сонячного випромінювання, дощі та інші важливі кліматичні показники. Аналітичні висновки дозволяють більш точно прогнозувати умови для посадки, поливу, збільшення врожайності та вибору оптимальних сортів рослин.

Ця здатність адаптувати сільськогосподарські методи до змін клімату є критично важливою для зниження ризиків, пов'язаних зі зміною клімату, а також для підтримки продовольчої безпеки. Фермерам стає доступно більше інформації для прийняття рішень, що дозволяє мінімізувати втрати від негативних кліматичних явищ і забезпечити стійкість у виробництві продуктів харчування.

Актуальність цього напрямку підтверджується і науковими дослідженнями в галузі цифрових технологій. Щоб продемонструвати зростаючі тенденції

досліджень у сфері Big Data, IoT, сенсорів і AI/ML для моніторингу вуглецевого сліду та сталого сільського господарства, було проведено пошук у Google Scholar за допомогою відповідних ключових слів. Цей аналіз допоміг виділити статті, опубліковані в період з 2014 по 2024 рік, зокрема для кожної категорії, щоб оцінити зростання наукових досліджень.

Результати пошуку відображають зростаючий інтерес до таких технологій, як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), які використовуються для моніторингу та оптимізації сільськогосподарських процесів, зокрема для зниження вуглецевого сліду та досягнення сталого розвитку в сільському господарстві.

Рисунок 1.12 представляє діаграму, яка наочно демонструє зростаючий інтерес до цих технологій у наукових публікаціях, показуючи, як нові технології змінюють підходи до сільського господарства, роблячи його більш ефективним і стійким до кліматичних змін.

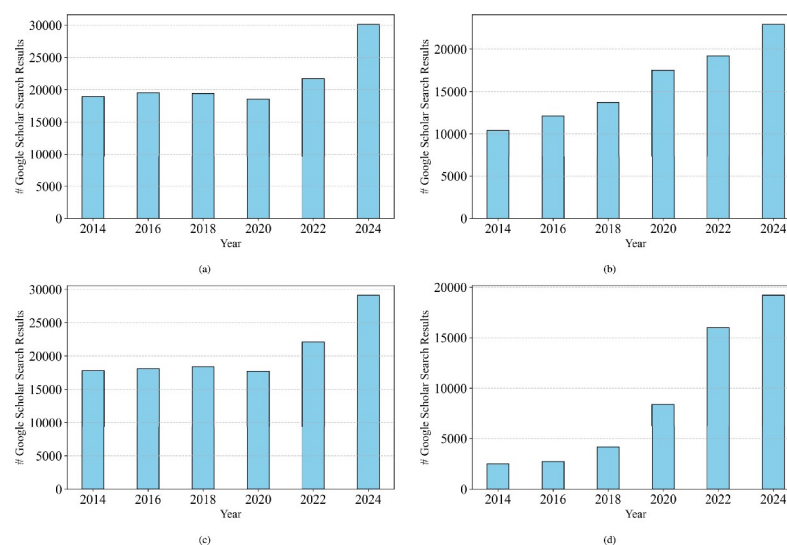


Рис. 1.12 Огляд зростаючої уваги досліджень до Big Data, IoT, датчиків та AI/ML у моніторингу вуглецевого сліду та сталому сільському господарстві на основі результатів пошуку Google Scholar: (a) Big Data, (b) sensor, (c) IoT та (d) AI & ML

Це свідчить про зростання міждисциплінарного підходу до сталого агровиробництва, де ІТ-рішення дедалі тісніше інтегруються в аграрну науку. Увесь цей процес відображає не лише технічні інновації, а й інтеграцію наукових досліджень у реальні практики сталого розвитку.

Цей аналіз допомагає визначити основні напрямки інновацій та підкреслює важливість використання технологій для досягнення сталого сільського господарства в умовах змінного клімату.

Сплеск досліджень у галузі штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) пояснюється значним прогресом у розвитку таких технологій, як глибоке навчання, федеративне навчання та периферійні обчислення, які дозволяють створювати більш точні та ефективні моделі для моніторингу викидів вуглецю та прогнозування аналітики. Останні роки стали свідками розширеного використання нейронних мереж, навчання з підкріпленням і гібридних методів AI, що дозволяє досягти значного прогресу в таких сферах, як сталий розвиток сільського господарства та стійкість до змін клімату.

Зокрема, AI/ML вже активно застосовуються для:

- **Оптимізації використання ресурсів:** це стосується таких аспектів, як водо- та енергозбереження в аграрних процесах, покращення врожайності через точне прогнозування потреб в ресурсах.
- **Відстеження викидів:** використання AI для аналізу викидів CO₂, CH₄ і N₂O допомагає точно визначати джерела викидів та пропонувати стратегії для їх зниження, що є важливим аспектом для досягнення сталого сільського господарства.
- **Точного землеробства:** штучний інтелект дає можливість точніше моніторити стан ґрунтів, здоров'я рослин і навіть змінювати стратегії удобрення та зрошення залежно від конкретних умов.

Таким чином, AI та ML стають важливими інструментами у розробці та впровадженні інноваційних рішень для сталого сільського господарства, сприяючи

більш ефективному використанню ресурсів та адаптації до мінливих кліматичних умов.

Інтеграція технологій IoT та Big Data привела до значного покращення в різних секторах, продемонструвавши їхній трансформаційний потенціал у скороченні викидів та підвищенні ефективності операцій. На практиці використання AI та Big Data вже демонструє значні успіхи у різних секторах економіки, що можна проілюструвати наступними прикладами. Наприклад, у Каліфорнії компанія Pacific Gas and Electric Company (PG&E) використала IoT датчики та аналітику великих даних для оптимізації розумних мереж. Це дозволило покращити розподіл енергії та інтеграцію відновлюваних джерел енергії, зменшивши залежність від викопного палива та скоротивши викиди парникових газів. У Німеччині Heidelberg Cement Group впровадила систему моніторингу викидів з використанням IoT, що дозволило відстежувати рівень твердих частинок та оксидів азоту в реальному часі. Це сприяло скороченню викидів та зниженню експлуатаційних витрат через оптимізацію технічного обслуговування. У Пекіні ініціатива з управління якістю повітря за допомогою датчиків IoT та аналітики дозволила моніторити забруднення та прогнозувати тенденції якості повітря. Це допомогло визначити основні джерела викидів і впровадити обмеження руху та контроль за промисловими викидами, що значно покращило якість повітря. У нафтогазовій галузі, компанії, як BP, використали IoT системи для прогнозного обслуговування, що зменшило час простою та підвищило ефективність операцій, мінімізуючи незаплановані зупинки та знижуючи викиди. Ці приклади підкреслюють, як технології IoT та Big Data допомагають вирішувати критичні екологічні проблеми та сприяють сталому розвитку в різних сферах. Таким чином, наведені приклади показують, що застосування AI та ML дозволяє суттєво оптимізувати ресурси та покращити екологічні показники в різних сферах діяльності, підкреслюючи універсальність цих технологій для сталого розвитку.

Комунікаційна інфраструктура є ключовим елементом у функціонуванні систем Інтернету речей у сільському господарстві. Для забезпечення стабільного зв'язку, надійності передачі даних і адаптивного прийняття рішень використовуються різні типи мережевих технологій, які представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Мережеві технології в IoT для моніторингу вуглецевого сліду та сталого сільського господарства.

Тип мережі	Опис
Неліцензовані мережі спектру	
Мережі Wi-Fi	Бездротові мережі з високою пропускнуою здатністю, придатні для зв'язку на короткі відстані, зазвичай використовуються в стаціонарних або мобільних пристроях IoT з обмеженим радіусом дії.
Wi-Fi HaLow	Технологія Wi-Fi зі збільшеним радіусом дії з динамічним розподілом пропускнуої здатності, що забезпечує підключення великої кількості пристроїв IoT у віддалених районах.
Мережі Zigbee/6LoWPAN	Протокол зв'язку малого енергоспоживання та малого радіусу дії ідеально підходить для підключення датчиків з низькою швидкістю передачі даних у локальних мережах ферм
Технологія LoRaWAN	Технологія бездротової мережі великого радіусу дії з низьким енергоспоживанням, що працює в неліцензованих діапазонах спектру, ідеально підходить для моніторингу віддалених полів і датчиків.
Ліцензовані мережі спектру	
Стільникові мережі (4G/5G)	Мережі дальнього радіусу дії з широким покриттям, корисні для віддаленого моніторингу та передачі даних у режимі реального часу з сільськогосподарської техніки та мобільних пристроїв.
NB-IoT/SigFox	Вузькосмугова технологія IoT, оптимізована для низького енергоспоживання та зв'язку на великій відстані в сільськогосподарських додатках, таких як моніторинг вологості ґрунту та тваринництва.

Гібридні та настроювані мережеві рішення	
Гібридні підходи	Комбінація таких технологій, як Wi-Fi, 6LoWPAN, LoRa та Cellular, для максимального покриття, резервування та ефективності у великомасштабному розумному землеробстві.

Таким чином, вибір відповідної мережевої технології має велике значення для успішної реалізації IoT-проектів у сільському господарстві, оскільки дозволяє забезпечити оптимальний баланс між дальністю, швидкістю передачі та енергоефективністю.

Сучасні технології збору, передавання та обробки даних на основі IoT, Big Data, AI та ML відкривають нові можливості для трансформації сільського господарства у високотехнологічну галузь. Багаторівнева архітектура обробки даних, поєднана з аналітичними інструментами, забезпечує своєчасне прийняття рішень, що підвищує ефективність та стійкість агровиробництва. Адаптація до кліматичних змін, прогнозування врожаїв, оптимізація витрат ресурсів і зменшення викидів — усе це стає можливим завдяки інтеграції цифрових рішень у аграрну практику. Водночас успішне впровадження зазначених технологій потребує розвитку відповідної комунікаційної інфраструктури та подолання соціально-економічних бар'єрів, що особливо актуально для країн з обмеженими ресурсами. Таким чином, розглянуті технології є ключовим елементом у формуванні кліматично стійкого, екологічно відповідального й продуктивного сільського господарства майбутнього.

2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР

2.1 Вибір сенсорів і мікроконтролерів для системи

У системах автоматичного збору даних, призначених для моніторингу стану агроєкосистем, ключову роль відіграє коректний вибір сенсорів та мікроконтролерів. Саме ці апаратні компоненти забезпечують безперервний контроль важливих параметрів навколишнього середовища, таких як температура повітря, вологість ґрунту, рівень освітленості та концентрація вуглекислого газу. Відповідність технічних характеристик обраних елементів реальним умовам експлуатації на відкритому ґрунті чи у тепличному господарстві є визначальним чинником для стабільної та ефективної роботи IoT-системи в аграрному секторі.

У підрозділі 1.3 було проаналізовано загальні типи сенсорів, які використовуються в аграрних IoT-системах. У цьому підрозділі детально обґрунтовується вибір конкретних моделей сенсорів та мікроконтролерів, що відповідають потребам розроблюваної системи.

У процесі розробки IoT-системи для моніторингу стану агроєкосистем першочерговим завданням є ідентифікація ключових параметрів навколишнього середовища, що мають безпосередній вплив на розвиток сільськогосподарських культур. До таких змінних насамперед належать: температура повітря, вологість ґрунту, інтенсивність освітлення та концентрація вуглекислого газу. Саме ці показники найчастіше використовуються в сучасних системах точного землеробства для оперативного прийняття рішень щодо поливу, підживлення та захисту рослин [8].

Температура повітря та ґрунту є критично важливими факторами, які впливають на швидкість росту рослин, фотосинтетичну активність, а також

визначають строки сівби та дозрівання врожаю. Несприятливі температурні умови можуть уповільнити метаболічні процеси або повністю їх пригальмувати [9].

Вологість ґрунту, у свою чергу, визначає ефективність водного обміну та поглинання поживних речовин. Надмірне зволоження призводить до розвитку гнильних процесів, а недостатній рівень – до стресу рослин і зниження урожайності [10]. Освітленість також виступає важливим чинником фотосинтезу, особливо в умовах теплиць чи закритого ґрунту, де природне світло є обмеженим. Нарешті, моніторинг рівня CO₂ дозволяє контролювати умови газообміну, які мають прямий вплив на фотосинтетичну продуктивність культур [11].

Таким чином, саме ці параметри — температура, вологість (повітря і ґрунту), освітленість та концентрація CO₂ — є базовими при розробці системи автоматичного збору аграрних даних. Їх вибір обумовлений як агротехнічними рекомендаціями, так і широким застосуванням у вже реалізованих проєктах смарт-фермерства.

Одним із ключових етапів проєктування системи автоматичного збору даних є вибір сенсорів, які забезпечують точне вимірювання параметрів навколишнього середовища. Для контролю вологості ґрунту, температури, освітленості та рівня вуглекислого газу в аграрному середовищі широко використовуються доступні на ринку сенсори, що відповідають вимогам точного землеробства.

Для вимірювання вологості ґрунту в системі обрано ємнісний сенсор вологості Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0, який забезпечує надійне визначення рівня вологи без прямого електричного контакту з ґрунтом. На відміну від традиційних резистивних моделей, даний сенсор є стійким до корозії та має довший строк служби, що є критично важливим у польових умовах. Він працює в аналоговому режимі (діапазон вихідного сигналу 0–3 В) та може бути легко інтегрований у більшість сучасних мікроконтролерів класу IoT, зокрема ESP32, завдяки сумісності з його ADC-входами. Такий вибір дозволяє забезпечити

стабільність вимірювань та зменшити потребу в обслуговуванні сенсорного блоку [12].

Для вимірювання температури та вологості повітря широко використовується комбінований цифровий сенсор DHT22 (AM2302). Він забезпечує точне вимірювання температури в діапазоні від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, а також відносної вологості повітря в межах 0–100% з точністю до $\pm 2\text{--}5\%$. Сенсор має цифровий вихід і потребує мінімального обслуговування, що робить його придатним для довготривалого використання в польових умовах. Основною перевагою DHT22 є висока точність у порівнянні з його молодшою версією DHT11, а також ширший діапазон вимірювань. Його можна зручно використовувати у системах на базі Arduino або ESP32 [13].

Для контролю рівня освітленості ефективно застосовується BH1750 – цифровий сенсор, що вимірює інтенсивність світла у люксах. Завдяки вбудованому інтерфейсу I²C, він забезпечує зручність інтеграції, широкий діапазон вимірювання (1–65 535 люкс) та високу точність. Попередньо відкалібрований на заводі, цей сенсор ідеально підходить для моніторингу умов освітлення у теплицях [14].

Моніторинг вмісту вуглекислого газу здійснюється за допомогою MH-Z19B, що базується на недисперсійному інфрачервоному (NDIR) принципі. Він має діапазон вимірювання 400–5000 ppm та працює через UART або PWM-інтерфейс. Завдяки вбудованій температурній компенсації і високій точності, MH-Z19B є одним із найнадійніших сенсорів для екологічного моніторингу та аграрних застосувань [15].

Таким чином, вибір сенсорів базується на поєднанні технічних характеристик, стійкості до зовнішніх факторів, точності та можливості інтеграції з обраною платформою мікроконтролера.

Враховуючи специфіку обраних сенсорів, наступним кроком є визначення мікроконтролера, здатного забезпечити сумісність з відповідними типами сигналів, а також ефективну обробку та передачу отриманих даних. З цією метою розглянемо

найбільш поширені мікроконтролери, що застосовуються в IoT-системах для моніторингу аграрного середовища.

Одним із найвідоміших рішень є Arduino Uno – мікроконтролер на основі чипа ATmega328P, зображений на рисунку 2.1. Плата має просту архітектуру, підтримується широкою спільнотою та дозволяє підключати сенсори як із аналоговими, так і з цифровими виходами. Arduino Uno має 14 цифрових портів введення/виведення, з яких 6 можуть використовуватись для ШІМ-сигналів, а також 6 аналогових входів. Проте обмеженість в обчислювальних ресурсах (2 КБ SRAM) і відсутність вбудованих бездротових інтерфейсів обмежує застосування Arduino Uno у сучасних IoT-проєктах без додаткових модулів [16].



Рис. 2.1 Мікроконтролер Arduino Uno

Більш сучасною альтернативою є ESP32 – 32-бітний мікроконтролер із двоядерним процесором, вбудованими модулями Wi-Fi та Bluetooth, а також розширеним набором периферії. ESP32 підтримує до 34 цифрових портів, має до 18 аналогових входів, вбудовані інтерфейси UART, I2C, SPI, а також підтримує апаратне шифрування та роботу з інтервалами сну (deep sleep), що важливо для енергоощадних систем. Така гнучкість та функціональність дозволяє будувати повністю автономні вузли збору даних з передачею до серверів або хмарних платформ [17].

На рисунку 2.2 зображено плату ESP32 DevKitC, яка розглядається як базовий мікроконтролер для побудови системи автоматичного збору даних.

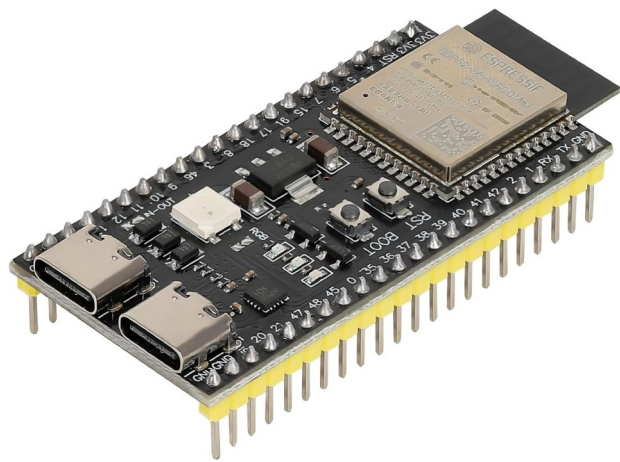


Рис. 2.2 Мікроконтролер ESP32 DevKitC

Для обґрунтованого вибору саме цієї моделі мікроконтролера нижче у таблиці 2.1 наведено порівняльну характеристику ESP32 та популярного серед розробників Arduino Uno. Ця таблиця дозволяє наочно оцінити переваги ESP32 для завдань, що стоять перед проектованою IoT-системою.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика мікроконтролерів Arduino Uno та ESP32

Характеристика	Arduino Uno	ESP32
Процесор	ATmega328P (8-біт)	Xtensa LX6 (32-біт, 2 ядра)
Частота, МГц	16	До 240
ОЗП, КБ	2	520
ПЗП, КБ	32	≥4096
Аналогові входи	6	до 18
PWM-виходи	6	до 16
Wi-Fi	Відсутній	Є
Bluetooth	Відсутній	Є
Живлення	5 В / 7–12 В	3.3 В або 5 В (через Vin)
Орієнтовна вартість	\$4–8	\$6–10

З урахуванням вищенаведеного, доцільно віддати перевагу ESP32, оскільки він має вищу продуктивність, підтримує бездротові протоколи зв'язку, більшу кількість портів введення/виведення та ширші можливості масштабування. Це дозволяє інтегрувати сенсори без потреби в додаткових модулях і спрощує загальну архітектуру системи збору даних.

2.2 Архітектура та реалізація апаратної частини системи

Проектована система автоматичного збору даних на основі IoT-технологій реалізована за модульною архітектурою, яка передбачає взаємодію сенсорних пристроїв, мікроконтролера та засобів передавання і зберігання інформації. Основна мета системи полягає в безперервному моніторингу аграрного середовища з подальшою передачею отриманих параметрів на сервер або хмарну платформу для зберігання та аналізу.

На рисунку 2.3 представлено структурну схему системи, що ілюструє взаємозв'язок основних апаратних і програмних компонентів.

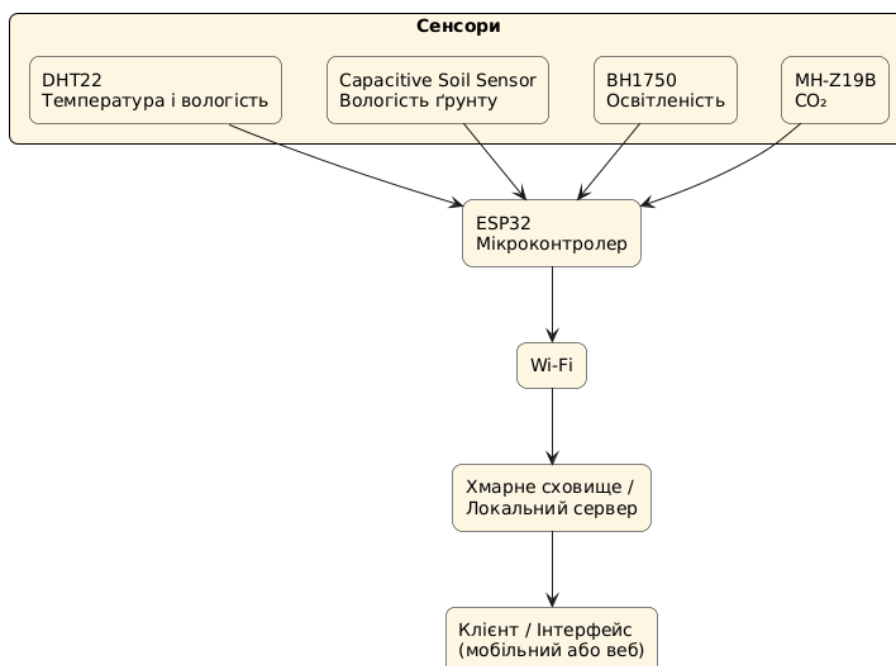


Рис. 2.3 Структурна схема системи автоматичного збору даних на основі IoT

Згідно із загальною логікою побудови IoT-систем, дані з датчиків (температури, вологості повітря, вологості ґрунту, освітленості, рівня CO₂) надходять до мікроконтролера ESP32. Цей мікроконтролер не лише забезпечує збір інформації з різноманітних сенсорів, а й здійснює її попередню обробку та формування пакетів даних для відправки. Вбудований Wi-Fi-модуль дозволяє здійснювати бездротову передачу даних до локального сервера або хмарного сховища. В подальшому інформація може бути візуалізована на клієнтських пристроях – комп'ютерах або мобільних додатках.

Зібрана система побудована на основі мікроконтролера ESP32, до якого підключаються всі необхідні сенсори для моніторингу параметрів навколишнього середовища. Сигнали з сенсорів передаються на відповідні порти мікроконтролера згідно з їхніми електричними характеристиками та підтримуваними інтерфейсами зв'язку.

Для зручності аналізу фізичного підключення компонентів системи, дані наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.2

Фізичне підключення сенсорів до мікроконтролера ESP32

Сенсор	Пін сенсора	Пін ESP32	Інтерфейс підключення
DHT22 (температура, вологість)	VCC	3.3 B	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	DATA	GPIO 4	Цифровий
Soil Moisture (вологість ґрунту)	VCC	3.3 B	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	AO	GPIO 34 (ADC)	Аналоговий (ADC)
BH1750 (освітленість)	VCC	3.3 B	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	SDA	GPIO 21	I ² C (дані)
	SCL	GPIO 22	I ² C (синхронізація)
MH-Z19B (CO ₂)	VCC	5 B	Живлення

Сенсор	Пін сенсора	Пін ESP32	Інтерфейс підключення
	GND	GND	Заземлення
	TX	GPIO 16	UART (передача даних)
	RX	GPIO 17	UART (прийом даних)

На рисунку 2.4 представлено макетну реалізацію підключення основних сенсорів системи автоматичного збору аграрних даних відповідно до зазначених у таблиці 2.1 з'єднань. Усі компоненти живляться від джерела напруги 3.3 В або 5 В (для МН-Z19В), з'єднання заземлення реалізоване через спільну шину GND.

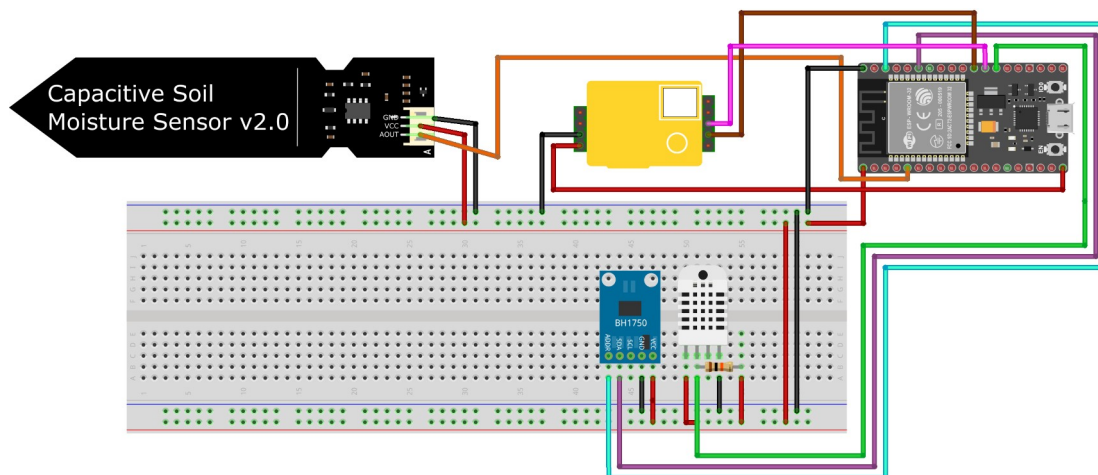


Рис. 2.4 Макетна схема підключення сенсорів до мікроконтролера ESP32

У розробленій системі для передачі зібраних сенсорами даних використовується бездротовий модуль мікроконтролера ESP32, який забезпечує з'єднання через Wi-Fi та передає дані на зовнішній сервер за допомогою протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Це легкий та оптимізований для IoT-застосувань протокол, що працює за моделлю "публікація-підписка" (publish-subscribe) та передбачає взаємодію між клієнтом (пристроєм) і центральним сервером – MQTT-брокером.

У межах запропонованої системи ESP32 виступає як MQTT-клієнт, що публікує повідомлення з показниками сенсорів у відповідні топіки (topics), наприклад `sensor/temperature`, `sensor/humidity`, `sensor/soil`, `sensor/co2`. Кожен з топіків може містити дані у форматі JSON або у вигляді простого текстового значення. Надіслані повідомлення можуть бути збережені, оброблені або візуалізовані на стороні сервера чи користувацького інтерфейсу.

Як брокер у цій системі може бути застосований публічний MQTT-сервер з відкритим доступом (наприклад, `broker.hivemq.com`). Це дозволяє швидко реалізувати передачу даних без необхідності встановлення власного серверного забезпечення, що особливо зручно під час розробки прототипів. Такий підхід спрощує впровадження IoT-системи та забезпечує стабільну роботу навіть у рамках обмежених ресурсів.

Серед переваг MQTT-протоколу над традиційними HTTP-запитами варто відзначити менше навантаження на мережу, знижене енергоспоживання та підтримку багатоточкової взаємодії між пристроями. Завдяки цим властивостям MQTT набув широкого розповсюдження у сфері Інтернету речей, зокрема для задач дистанційного моніторингу в аграрному секторі [18].

В результаті проєктування апаратної частини системи було сформовано оптимальну структуру з урахуванням вимог до функціональності, сумісності компонентів і простоти реалізації. Усі сенсори підключено до мікроконтролера ESP32 згідно з технічними характеристиками, а передача даних реалізована за допомогою бездротового з'єднання через протокол MQTT. Обрана архітектура забезпечує надійний збір екологічних параметрів і гнучкість у подальшому масштабуванні або модифікації системи.

У даному розділі було розроблено апаратну частину системи автоматичного збору даних для підвищення ефективності вирощування культур на основі IoT-технологій. На основі аналізу функціональних вимог та умов експлуатації було здійснено обґрунтований вибір сенсорів, призначених для моніторингу ключових

параметрів аграрного середовища, зокрема температури, вологості повітря, вологості ґрунту, рівня освітленості та концентрації вуглекислого газу. Для забезпечення інтеграції сенсорів та бездротової передачі даних обрано мікроконтролер ESP32, який має необхідну кількість інтерфейсів і підтримку Wi-Fi-зв'язку.

На основі обраних компонентів побудовано загальну архітектуру системи, а також реалізовано схему фізичного підключення сенсорів до мікроконтролера. Передача даних реалізується за допомогою MQTT-протоколу, що забезпечує ефективну та масштабовану взаємодію між пристроями. Сформована архітектура є модульною та гнучкою, що дозволяє масштабувати систему, інтегрувати додаткові сенсори або адаптувати її під зміну умов навколишнього середовища без потреби в суттєвій реконфігурації апаратної частини.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Налаштування середовища розробки для мікроконтролерів ESP

У межах проектування програмного забезпечення для системи автоматичного збору аграрних даних передбачалось використання середовища розробки Arduino IDE, яке є одним із найпоширеніших інструментів для створення програм для мікроконтролерів, зокрема ESP32. Arduino IDE обрано завдяки його простоті, підтримці великої кількості бібліотек, наявності готових прикладів та активній спільноті, що значно полегшує розробку, налагодження та модифікацію програмного коду.

На рисунку 3.1 зображено середовище Arduino IDE з відкритим кодом і вибраною платою ESP32 Dev Module. Після встановлення IDE та додавання підтримки ESP32 через "Менеджер плат" користувач може компілювати скетчі та завантажувати їх на мікроконтролер через USB.

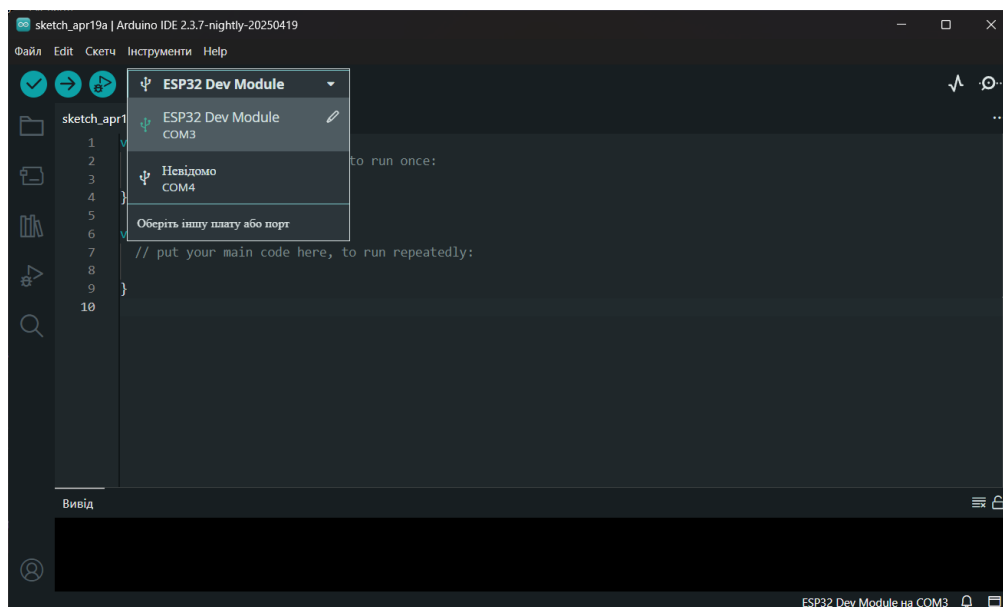


Рис. 3.1 Середовище розробки Arduino IDE з підключеним мікроконтролером ESP32

Таблиця 3.1 містить перелік бібліотек, необхідних для роботи з сенсорами, використаними у системі.

Таблиця 3.1

Бібліотеки, необхідні для програмної реалізації системи

Назва бібліотеки	Призначення	Сумісність з ESP32
DHT.h	Зчитування температури та вологості (DHT22)	Так
BH1750.h	Зчитування рівня освітленості	Так
Adafruit_Sensor.h	Базовий інтерфейс для сумісності з іншими сенсорами	Так
PubSubClient.h	Реалізація MQTT-зв'язку	Так
Wire.h	Робота з I ² C-шиною (для BH1750)	Так

Інсталяція необхідних бібліотек здійснюється через вбудований менеджер бібліотек Arduino IDE, інтерфейс якого показано на рисунку 3.2. У проєкті використовуються лише перевірені бібліотеки, що є стабільними та активно підтримуються спільнотою.

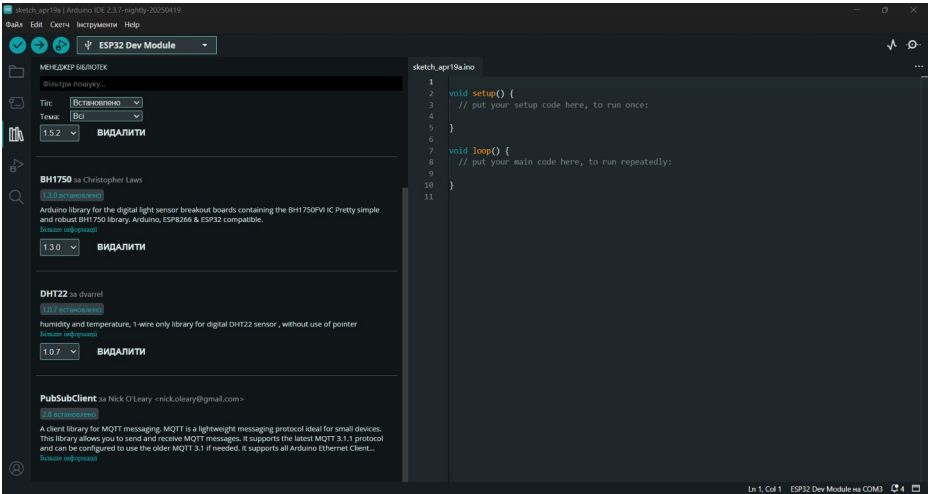


Рис. 3.2 Встановлення необхідних бібліотек у Arduino IDE

Програмний код, передбачений для реалізації системи, складається з основного скетчу (.ino), що містить ініціалізацію обладнання, основний цикл опитування сенсорів, обробку отриманих значень та формування MQTT-повідомлень. Дані передаються у форматі JSON або як текстові значення на попередньо визначені топіки MQTT.

Налаштування мікроконтролера ESP32 у середовищі Arduino IDE передбачає вибір порту USB, вибір моделі плати (наприклад, ESP32 Dev Module) та параметрів компіляції. Після успішної компіляції програма завантажується у мікроконтролер, і її виконання можна спостерігати через монітор порту, вбудований у середовище.

Таким чином, Arduino IDE забезпечує просте, доступне та надійне середовище для реалізації програмної частини IoT-системи збору даних, що дозволяє зосередитись на логіці роботи сенсорів та комунікації, а не на складнощах налаштування інструментів розробки.

3.2 Програмний алгоритм збору та обробки даних

Програмний алгоритм, зображений на рисунку 3.3, реалізує логіку роботи системи автоматичного збору даних, побудований на базі структури, притаманної середовищу Arduino IDE. Основними елементами цього підходу є функції `setup()` та `loop()`, які визначають етапи ініціалізації системи та безперервної роботи відповідно.

Функція `setup()` виконується один раз після запуску мікроконтролера або його перезавантаження. Вона відповідає за конфігурацію вхідних/вихідних портів, ініціалізацію підключених сенсорів, встановлення Wi-Fi-з'єднання, а також підключення до MQTT-брокера. У цій частині програми виконується попередня підготовка системи до основного функціонування.

Основна логіка реалізована у функції `loop()`, яка викликається повторно протягом усього часу роботи пристрою. Саме тут виконуються регулярне зчитування даних із сенсорів, їх обробка, перетворення у формат JSON, а також передача сформованого повідомлення через MQTT до зовнішнього сервера або хмарної платформи.

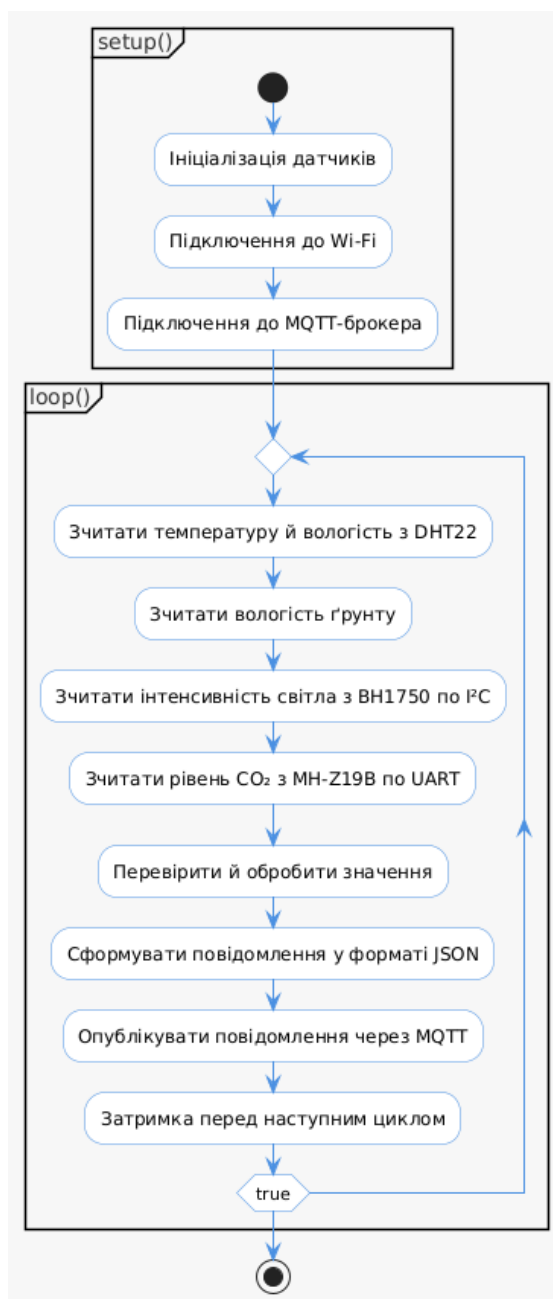


Рис. 3.3 Алгоритм функціонування програмного забезпечення мікроконтролера ESP32

У циклічній частині програми, що реалізується у функції `loop()`, послідовно зчитуються дані з усіх підключених сенсорів. Кожен із них має власний інтерфейс взаємодії та відповідну бібліотеку. Отримані значення піддаються базовій обробці — перевіряються на коректність, за потреби округлюються, а також нормалізуються до стандартного діапазону.

Нижче подано особливості роботи з кожним із сенсорів, що використовуються у системі.

Для зчитування температури та вологості повітря використовується цифровий сенсор DHT22. Його значення обробляються за допомогою функцій бібліотеки DHT.h, які повертають результат у градусах Цельсія та відсотках. Перед використанням значення перевіряються на наявність помилок (NaN), що забезпечує надійність переданих даних. На рисунку 3.4 представлено приклад реалізації цієї логіки у коді.

```
float temperature = dht.readTemperature();  
float humidity = dht.readHumidity();  
  
if (isnan(temperature) || isnan(humidity)) {  
    Serial.println("Помилка зчитування DHT22");  
}
```

Рис. 3.4 Фрагмент коду зчитування температури та вологості з сенсора DHT22

Зчитування значення вологості ґрунту здійснюється з аналогового виходу ємнісного сенсора, підключеного до одного з ADC-входів ESP32 (наприклад, GPIO 34). Отримане сире значення масштабується у відсоткову шкалу методом лінійної нормалізації. Реалізацію цього етапу відображено на рисунку 3.5.

```
int rawValue = analogRead(SOIL_PIN);  
int soilHumidity = map(rawValue, 4095, 1500, 0, 100);  
soilHumidity = constrain(soilHumidity, 0, 100);
```

Рис. 3.5 Фрагмент коду нормалізації сигналу вологості ґрунту з аналогового сенсора

Зчитування значень з цифрового сенсора освітленості BH1750 та сенсора концентрації вуглекислого газу MH-Z19B реалізується за допомогою простих функцій з відповідних бібліотек. Обидва сенсори повертають числові значення, які можуть бути безпосередньо використані у подальшому для формування повідомлення. Фрагменти коду зчитування цих значень подано на рисунку 3.6.

```
// Зчитування освітленості (BH1750)
float lux = lightMeter.readLightLevel();

// Зчитування концентрації CO2 (MH-Z19B)
int co2 = mhz19.getCO2();
```

Рис. 3.6 Зчитування освітленості (BH1750) та рівня CO₂ (MH-Z19B) за допомогою інтерфейсів I²C та UART

Після зчитування та обробки всіх параметрів середовища, система формує структуроване повідомлення у форматі JSON, яке передається до MQTT-брокера. Такий формат дозволяє ефективно організувати обмін даними, а також спрощує подальше зберігання, обробку та візуалізацію інформації на стороні сервера.

Усі зібрані показники — температура, вологість повітря, вологість ґрунту, рівень освітленості та концентрація CO₂ — об'єднуються у єдиний JSON-об'єкт, де кожен параметр представлений як пара «ключ — значення». Структуру сформованого повідомлення у форматі JSON зображено на рисунку 3.7.

```
{
  "temperature": 23.4,
  "humidity": 61,
  "soil": 42,
  "light": 127,
  "co2": 410
}
```

Рис. 3.7 Структура сформованого JSON-повідомлення з сенсорних даних

У таблиці 3.2 наведено перелік основних ключів JSON-повідомлення, їхнє призначення та одиниці виміру.

Таблиця 3.2

Поля JSON-повідомлення та їх значення

Ключ	Опис параметра	Одиниці виміру
temperature	Температура повітря	°C
humidity	Вологість повітря	%
soil	Вологість ґрунту	%
light	Рівень освітленості	lux
co2	Концентрація CO ₂	ppm

Після формування повідомлення у форматі JSON система виконує його публікацію до MQTT-брокера у визначений топик. У реалізованій системі використовується топик з умовною назвою `iot/greenhouse/data`, який об'єднує всі зчитані сенсорні параметри. Публікація здійснюється за допомогою функції `publish()` з бібліотеки `PubSubClient`.

Перед виконанням операції надсилання перевіряється наявність активного з'єднання з брокером. У разі втрати з'єднання викликається функція повторного підключення, яка забезпечує стабільність та безперервність передачі даних. На рисунку 3.8 зображено приклад публікації сформованого повідомлення у MQTT-брокер.

```
if (client.connected()) {
    client.publish("iot/greenhouse/data", payload.c_str());
} else {
    reconnectMQTT(); // Повторне з'єднання з брокером
}
```

Рис. 3.8 Передача JSON-повідомлення до MQTT-брокера з перевіркою з'єднання

У даному прикладі `payload` – це змінна типу `String`, що містить повністю сформоване JSON-повідомлення. Метод `s_str()` перетворює його у формат, сумісний із функцією публікації. Повторне підключення виконується лише у випадку втрати зв'язку, що дозволяє зберігати стабільність роботи системи у безперервному режимі.

Щоб уникнути перевантаження мікроконтролера та зменшити кількість зайвих публікацій у мережу, після кожного циклу зчитування даних і надсилання повідомлення виконується пауза (затримка), реалізована за допомогою функції `delay()`. Такий підхід дозволяє зберігати стабільну роботу пристрою впродовж тривалого часу та зменшує навантаження на MQTT-брокер.

Оптимальна періодичність зчитування визначається залежно від типу сенсора та динаміки зміни контрольованого параметра. Наприклад, температура та вологість повітря можуть змінюватися повільніше, ніж, скажімо, рівень освітленості в тепличних умовах. У той же час, сенсор CO_2 рекомендується опитувати з інтервалом щонайменше 10 секунд для отримання стабільних значень.

У таблиці 3.3 наведено рекомендовані інтервали опитування для кожного сенсора, що використовуються в системі.

Таблиця 3.3

Періодичність опитування сенсорів у системі

Сенсор	Контрольований параметр	Інтервал опитування
DHT22	Температура, вологість повітря	5 секунд
Soil Moisture Sensor	Вологість ґрунту	5 секунд
BH1750	Рівень освітленості	2–5 секунд
MH-Z19B	Концентрація CO_2	10 секунд

Інтервали можна налаштовувати вручну в програмному коді або реалізувати адаптивний режим опитування, якщо в майбутньому до системи буде додано вимоги до енергозбереження або підвищеної точності.

3.3 Інтеграція мобільного додатку або веб-платформи для моніторингу в реальному часі

Інтеграція програмного забезпечення мікроконтролера з мобільним додатком або веб-платформою є важливим компонентом IoT-системи, що забезпечує доступ до зібраних даних у зручному форматі. Основна мета цієї інтеграції — надати кінцевому користувачу можливість спостерігати за показниками стану аграрного середовища в режимі реального часу, а також отримувати візуалізовану аналітику на основі сенсорних вимірювань.

Запропонована система передбачає передавання даних, зібраних мікроконтролером ESP32, через MQTT-протокол до віддаленого брокера. Далі інформація може бути оброблена серверною частиною або спеціалізованим хмарним сервісом і передана на клієнтський інтерфейс — мобільний додаток або вебпанель. У результаті користувач отримує доступ до актуальних показників температури, вологості, освітленості, вологості ґрунту та концентрації CO₂ через інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.



Рис. 3.9 Схема передачі даних від сенсорів до інтерфейсу користувача

Зібрані сенсорні дані передаються до клієнтського інтерфейсу, де виводяться у зручному для користувача вигляді. Інтерфейс реалізований у вигляді інформаційної панелі, що відображає актуальні значення температури повітря, вологості повітря, вологості ґрунту, рівня освітленості та концентрації CO₂.

Кожен параметр представлений у вигляді графічного індикатора з кольоровим поділом зон значень, що дозволяє швидко оцінити стан середовища. Таке представлення забезпечує візуальну наочність та оперативне сприйняття інформації. Приклад реалізованої панелі моніторингу зображено на рисунку 3.10.

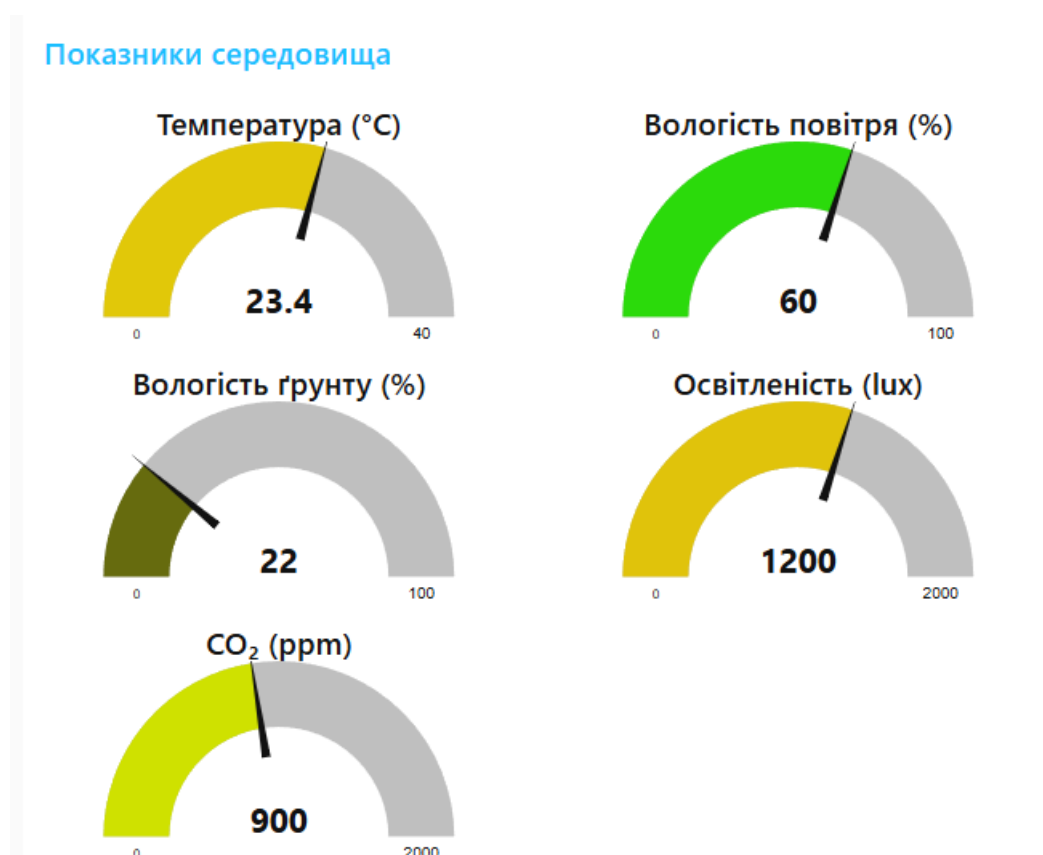


Рис. 3.10 Інтерфейс користувача для візуалізації параметрів аграрного середовища в режимі реального часу

Інтеграція з графічним інтерфейсом користувача дозволяє зробити систему більш доступною та зручною в експлуатації, зокрема для аграріїв без технічної підготовки. Такий підхід підвищує загальну ефективність IoT-системи,

забезпечуючи наочне представлення даних у режимі реального часу та оперативне реагування на зміни стану середовища. Запропонований варіант інтерфейсу може бути адаптований до мобільних платформ, хмарних сервісів або вбудований у більш складну аналітичну систему для розширеного моніторингу та автоматичного управління.

3.4 Сценарій розгортання та експлуатації IoT-системи в польових умовах

Розроблена система автоматичного збору даних може бути ефективно використана в аграрному секторі для моніторингу параметрів навколишнього середовища як у теплицях, так і на відкритих сільськогосподарських полях. Зокрема, система призначена для контролю мікрокліматичних умов, стану ґрунту, рівня освітленості та концентрації CO₂, що є критично важливим для оптимізації процесів вирощування культур та підвищення врожайності.

До складу системи, яка розгортається в польових умовах, входять такі основні компоненти:

- **мікроконтролер ESP32**, який виконує функції збору, попередньої обробки та передачі даних із підключених сенсорів;
- **сенсори середовища**, зокрема:
 - датчик температури та вологості повітря **DHT22**;
 - аналоговий датчик вологості ґрунту;
 - цифровий датчик освітленості **BH1750**, що працює через інтерфейс **I²C**;
 - датчик концентрації вуглекислого газу **MH-Z19B**, який використовує інтерфейс **UART**;
- **блок живлення**, що забезпечує автономну роботу системи — наприклад, акумулятор у поєднанні з сонячною панеллю або підключення до зовнішньої електромережі;

- **модуль бездротового зв'язку Wi-Fi**, який відповідає за з'єднання з локальною мережею та передачу зібраних даних на віддалений сервер або хмарну платформу за допомогою протоколу **MQTT**.

Компоненти системи розміщуються відповідно до їхніх функціональних характеристик і вимог експлуатації. Сенсори встановлюються безпосередньо в зоні вимірювання: датчик вологості ґрунту занурюється у верхній шар землі, сенсори температури, вологості повітря, освітленості та CO₂ закріплюються на стійках на висоті, що відповідає агротехнічним нормам (зазвичай 1–1,5 м від поверхні ґрунту). ESP32 та блок живлення монтуються у водонепроникний корпус зі ступенем захисту не менше IP65, що забезпечує безпечну експлуатацію у польових умовах з високою вологістю, дощем та іншими атмосферними впливами.

Підключення та обмін даними між компонентами забезпечується через протокол MQTT, що передбачає передачу пакетів даних до брокера MQTT, встановленого на сервері або у хмарному середовищі. Для забезпечення стабільності зв'язку важливо розмістити систему у зоні впевненого покриття Wi-Fi. За необхідності застосовується ретрансляція сигналу або використання додаткових точок доступу, які розширюють зону дії мережі.

Користувач взаємодіє з системою через зручний вебінтерфейс або Node-RED Dashboard, де він може переглядати актуальні та історичні значення параметрів у реальному часі. Інтерфейс дозволяє налаштовувати частоту збору даних, порогові значення для сповіщень та інші параметри моніторингу, адаптуючи систему до конкретних аграрних завдань.

При розгортанні IoT-системи можуть виникати певні обмеження та виклики. Одним із основних є забезпечення надійного Wi-Fi покриття у віддалених районах, що може вимагати додаткового обладнання або альтернативних каналів зв'язку, таких як LoRa або GSM. Іншою важливою проблемою є стабільне енергозабезпечення, особливо за умов відсутності центральної електромережі. Тут можуть бути застосовані автономні рішення на основі сонячних панелей з

аккумуляторами. Крім того, система потребує регулярного обслуговування, що включає періодичну перевірку датчиків, очищення обладнання від бруду та контроль стану корпусів.

Попри зазначені обмеження, запропонована архітектура має низку значних переваг для впровадження в аграрну практику. Вона є гнучкою, масштабованою та забезпечує оперативний доступ до критично важливих даних, які необхідні для прийняття обґрунтованих рішень щодо ведення сільськогосподарської діяльності. Завдяки використанню стандартних компонентів та поширених протоколів система легко інтегрується у вже існуючі технологічні середовища, що сприяє її широкому впровадженню та адаптації.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи вирішено поставлені завдання та досягнуто мети дослідження. У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз літературних джерел та існуючих IoT-рішень у сфері сільського господарства. Визначено основні фактори, що впливають на ефективність вирощування культур (кліматичні показники, стан ґрунту тощо) та обґрунтовано необхідність їх постійного моніторингу. Також узагальнено інформацію про сучасні датчики і платформи збору даних, що сформувало теоретичну базу для розробки власної системи.

У другому розділі на основі проведеного аналізу здійснено проектування системи автоматичного збору даних. Обрано оптимальний набір сенсорів для контролю параметрів середовища та відповідну апаратну платформу (мікроконтролер) з урахуванням вимог бездротової передачі даних і енергоефективності. Розроблено архітектуру апаратної частини: побудовано структурну схему підключення датчиків, модулів зв'язку та живлення. Таким чином, сформовано технічне рішення, готове для реалізації прототипу.

У третьому розділі дипломної роботи було розроблено детальний сценарій розгортання IoT-системи в умовах реального аграрного господарства. Наведено рекомендації щодо вибору місць розташування сенсорів, налаштування програмних та апаратних компонентів, визначено ключові етапи експлуатації та моніторингу отримуваних даних. Запропонований сценарій дозволяє чітко уявити потенційні переваги системи, такі як оперативність прийняття агротехнічних рішень, економія ресурсів (води, добрив, енергії) та підвищення врожайності завдяки точному контролю умов вирощування.

Основні результати роботи. У ході дослідження отримано такі ключові результати:

- спроектовано концепцію та виготовлено експериментальний зразок IoT-системи автоматичного моніторингу агропараметрів, яка включає мережу сенсорів (вологоміри ґрунту, термометри, тощо) та мікроконтролерний модуль збору даних;
- розроблено програмну інфраструктуру системи: прошивку для мікроконтролера ESP32 для зчитування даних і бездротової передачі, серверне програмне забезпечення для зберігання і обробки інформації, а також клієнтський застосунок для відображення показників у реальному часі;
- проведено випробування прототипу в умовах, близьких до реального застосування, що підтвердило його функціональність – система успішно збирає та передає дані, генерує сповіщення при виході параметрів за допустимі межі;
- встановлено, що використання запропонованої системи моніторингу дозволяє підвищити оперативність і точність контролю за станом посівів, що створює передумови для оптимізації таких процесів, як зрошення та удобрення, а отже, потенційно сприяє підвищенню урожайності і ефективності аграрного виробництва.

Практичне значення. Практична цінність виконаної роботи полягає у створенні дієвої IoT-системи, яку можна впровадити на реальних сільськогосподарських об'єктах. Запропоноване рішення є відносно недорогим у реалізації, масштабованим та гнучким – його можна адаптувати під різні типи культур і господарств. Впровадження такої системи в практику дасть змогу фермерам автоматизувати збір даних про критичні показники довкілля, мінімізувати ручну працю при моніторингу та своєчасно вживати необхідних заходів. Очікуваний ефект від використання результатів роботи – більш раціональне використання водних і енергетичних ресурсів, зменшення втрат врожаю через пізнє виявлення проблемних умов, а також загальне підвищення продуктивності і стійкості агротехнологічних процесів. Таким чином, отримані результати мають

значення для розвитку систем точного землеробства та можуть бути основою для подальших досліджень і впроваджень у сфері «розумного» сільського господарства.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1) Top 10 applications of iot in agriculture | startus insights. *StartUs Insights*. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/iot-in-agriculture/> (дата звернення: 05.04.2025).
- 2) IoT-Enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3396> (дата звернення: 05.04.2025).
- 3) Factors affecting yield of crops. *IntechOpen - Open Science Open Minds | IntechOpen*. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/70658> (дата звернення: 06.04.2025).
- 4) Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1485> (дата звернення: 06.04.2025).
- 5) Automated greenhouse management with iot: monitoring and controlling. *webbylab*. URL: <https://webbylab.com/blog/smart-greenhouse-solutions-iot-based-environmental-monitoring-and-control/> (дата звернення: 06.04.2025).
- 6) Sharp N. 7 types of agricultural sensors driving the smart farming revolution. *ESCATEC - Worldclass Electronics Manufacturing*. URL: <https://www.escatec.com/blog/7-types-of-agricultural-sensors-driving-the-smart-farming-revolution> (дата звернення: 06.04.2025).
- 7) Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: a review of smart technologies enabling sustainability. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525000814#se0070> (дата звернення: 08.04.2025).
- 8) Prediction of environment variables in precision agriculture using a sparse model as data fusion strategy.

- URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317321000561?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.04.2025).
- 9) Cherlinka V. Soil temperature for optimal crop growth and development. *EOS Data Analytics*. URL: https://eos.com/blog/soil-temperature/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.04.2025).
 - 10) Soil moisture: An important variable in agriculture - MAGDAPROJECT. *MAGDAPROJECT*. URL: https://www.magdaproject.eu/knowledge/soil-moisture-an-important-variable-in-agriculture/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.04.2025).
 - 11) Greenhouse environmental monitoring and control. *Greenhouse Management: A Guide to Operations and Technology*. URL: https://www.greenhouse-management.com/greenhouse_management/greenhouse_management_chapters/ch07_greenhouse_environmental_monitoring_control.htm?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 10.04.2025).
 - 12) *Rajguru electronics- Largest electronics Components Distributor in India*. URL: [https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2\(1\).0.pdf](https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2(1).0.pdf) (дата звернення: 10.04.2025).
 - 13) Digital Digital Digital Digital relative relative relative relative humidity humidity humidity humidity & temperature emperature emperature emperature sensor AM2302/DHT22. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf> (date of access: 10.04.2025).
 - 14) *HandsOn Tech – Open Source Electronics Platform*. URL: <https://www.handsontec.com/dataspecs/sensor/BH1750%20Light%20Sensor.pdf> (дата звернення: 10.04.2025).
 - 15) *Winsen Gas Sensor_CO2 Sensor_Air Quality Sensor_Dust Sensor_CO Sensor-Winsen Electronics*. URL: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf (дата звернення: 16.04.2025).

- 16) Uno r3. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/#features> (дата звернення: 17.04.2025).
- 17) ESP32 technical reference manual.
URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 20.04.2025).
- 18) MQTT vs. HTTP for iot. *HiveMQ – Unlock the value of your data with MQTT.*
URL: https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-http-protocols-in-iiot/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 20.04.2025).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КАФЕДРА
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система автоматичного збору даних на основі IoT-технологій»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

освітньо - професійної програми Інформаційні системи та технології

Виконав: Мельник Я.В. ІСД - 42

Науковий керівник роботи

Сагайдак В.А.

Київ - 2025

- **Актуальність:** У сучасному сільському господарстві виникає потреба в точному та оперативному моніторингу умов вирощування культур. IoT-технології дають змогу автоматизувати збір даних із сенсорів у режимі реального часу, що підвищує ефективність використання ресурсів і сприяє зростанню врожайності.
- **Мета дослідження:** Розробити IoT-систему для автоматичного збору даних про умови вирощування сільськогосподарських культур з метою підвищення ефективності агровиробництва.
- **Об'єкт дослідження:** Процес моніторингу параметрів середовища при вирощуванні сільськогосподарських культур.
- **Предмет дослідження:** IoT-технології, сенсори та програмне забезпечення для збору, передачі та аналізу агро даних.

Завдання

- Проаналізувати використання IoT у сільському господарстві.
- Обґрунтувати вибір сенсорів і мікроконтролера.
- Спроекувати апаратну архітектуру системи.
- Розробити програмне забезпечення для збору й моніторингу даних.
- Сформувати сценарій розгортання системи в польових умовах.

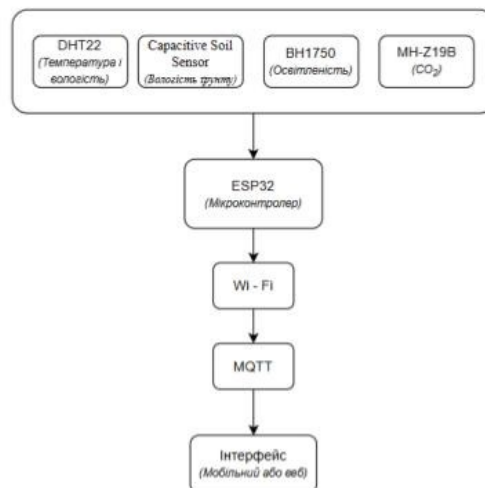
Застосовані методи дослідження

- **Аналіз джерел** — вивчення IoT-рішень у агросекторі.
- **Проектування системи** — архітектура IoT-комплексу, вибір компонентів.
- **Моделювання алгоритмів** — розробка логіки збору та передачі даних.
- **Програмування** — написання прошивки для ESP32 та налаштування MQTT.
- **Структурно-функціональний аналіз** — оцінка працездатності системи за критеріями надійності, точності, розширюваності.

Архітектура IoT-системи

Архітектура системи включає:

- **Сенсори** для вимірювання вологості ґрунту та температури повітря.
- **Контролер ESP32**, що збирає дані та передає їх через Wi-Fi.
- **MQTT-брокер**, який приймає повідомлення від пристрою.
- **Мобільний додаток**, що відображає дані в реальному часі.
- Потік даних — від датчиків до користувача — забезпечує безперервний моніторинг.



Обґрунтування вибору мікроконтролера

Обраний мікроконтролер: **ESP32**

- Вбудований Wi-Fi та Bluetooth – підходить для IoT
- Низьке енергоспоживання – важливо для автономної роботи
- Підтримка багатьох інтерфейсів (UART, I²C, ADC)
- Доступна ціна та велика спільнота розробників



Сенсори та параметри вимірювання

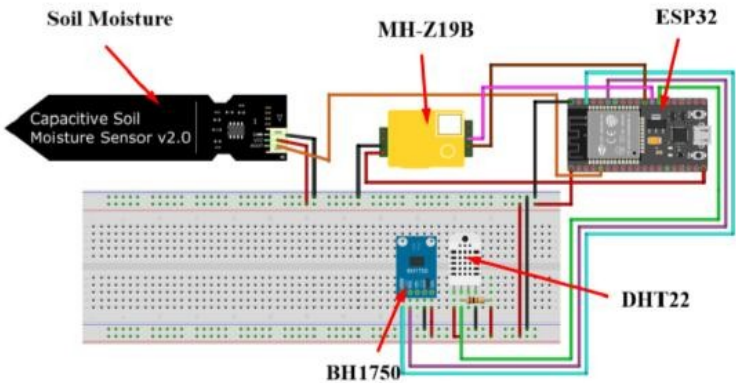
Підключені сенсори:

- **DHT22** — температура повітря, вологість
- **Аналоговий датчик вологості ґрунту** — вологість ґрунту
- **BH1750** — освітленість (I²C)
- **MH-Z19B** — концентрація CO₂ (UART)



Схема підключення системи

Сенсор	Пін сенсора	Пін ESP32	Інтерфейс підключення
DHT22 (температура, вологість)	VCC	3.3 В	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	DATA	GPIO 4	Цифровий
Soil Moisture (вологість ґрунту)	VCC	3.3 В	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	AO	GPIO 34 (ADC)	Аналоговий (ADC)
BH1750 (освітленість)	VCC	3.3 В	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	SDA	GPIO 21	I ² C (дані)
	SCL	GPIO 22	I ² C (синхронізація)
MH-Z19B (CO ₂)	VCC	5 В	Живлення
	GND	GND	Заземлення
	TX	GPIO 16	UART (передача даних)
	RX	GPIO 17	UART (приймання даних)



Алгоритм збору та передавання даних

Датчики фіксують **агроекологічні параметри середовища**

ESP32 обробляє дані та формує JSON-повідомлення.

Передача здійснюється через MQTT-протокол.

MQTT-брокер приймає повідомлення.

Сервер або хмара обробляє дані.

Користувач бачить результати у веб або мобільному додатку.



Інтерфейс користувача

- Інтерфейс створено у **Node-RED Dashboard**.
- Відображає агро дані: вологість, температура, освітленість тощо.
- Інформація оновлюється автоматично через MQTT.
- Дані подано у вигляді цифрових індикаторів.
- Система легко масштабується і налаштовується.



Розгортання IoT-системи в польових умовах

Сценарій розгортання:

- Встановлення сенсорів: у ґрунт, на стійки, відповідно до агротехнічних норм
- Монтаж ESP32 і блоку живлення в герметичному корпусі (IP65)
- Підключення до Wi-Fi та передача даних через MQTT
- Перегляд інформації через Node-RED Dashboard або веб інтерфейс
- Можливе живлення від акумулятора або сонячної панелі

Виклики:

- Покриття Wi-Fi у віддалених районах (альтернатива — LoRa, GSM)
- Потреба в стабільному енергозабезпеченні та періодичному обслуговуванні

Переваги системи

- Постійний моніторинг агроєкологічних показників у реальному часі
- Зменшення водоспоживання завдяки оптимізації поливу
- Підвищення ефективності та точності прийняття рішень
- Скорочення трудових витрат на ручний контроль ділянок
- Гнучкість системи – можливість розширення та автоматизації

Висновки

- Розроблена IoT-система автоматичного збору даних дозволяє підвищити ефективність агровиробництва за рахунок точного моніторингу параметрів середовища. Створена архітектура, алгоритми та інтерфейс можуть бути легко масштабовані та адаптовані під потреби фермерських господарств. Результати дослідження підтверджують доцільність використання IoT у сільському господарстві.

Апробація:

- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT», ДУІКТ, 2025. Тема: " Оптимізація автоматизованого збору даних у сільському господарстві на основі IoT-технологій "