

БАКАЛАВРСКА РОБОТА

БР. ІІ - 81.00.00.000 ІЗ

Група ІІ-22-3

Сворак Богдан

2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Сворак Богдан Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Програмні рішення для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки

(назва роботи)

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня Сворак Б.І.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Крихівський Михайло Васильович, к.т.н, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

доц. Бандура В.В.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут, факультет інформаційних технологій
Кафедра інженерії програмного забезпечення
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____ **ІПЗ**
доцент. _____ **В.В. Бандура**

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Сворак Богдан Ігорович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту (роботи) "Програмні рішення для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки"

керівник проекту (роботи) _____ **Крихівський Михайло Васильович, к.т.н, доцент**

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 21 ” квітня 2026 р. № 179/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Результати і матеріали отримані під час проходження переддипломної практики

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

1. Аналіз вимог до програмного забезпечення

2. Аналіз вимог і постановка задачі

3. Проектування системи

4. Реалізація проекту

5. Тестування та впровадження

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

1 1 Семишарова еталонна модель CISCO- (рис. 1.1, ст. 16)

2 Пропонована модель життєвого циклу даних (рис. 2.1, ст. 50)

3 Котедж на сонячній енергії з автоматизованою системою фертигації всередині (рис. 3.1, ст. 74)

4 Сенсорна мітка для моніторингу (рис. 3.6, ст. 85)

5.Знімки екрана реалізованого за стосунку (рис. 3.12, ст.95)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

2. Дата видачі завдання 2026 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Визначення та обґрунтування теми роботи	17.01.2026	виконано
2	Огляд існуючих концепцій, рішень та сервісів в даній області	21.02.2026	виконано
3	Побудова моделі або алгоритму власного рішення	01.03.2026	виконано
4	Документування реалізації власного оригінального рішення вибраними засобами	21.04.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи	02.05.2026	виконано

Студент

_____ Сворак Б.І.

(підпис)

Керівник роботи

_____ Крихівський М.В.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить 104 сторінок, 19 рисунків, список використаних джерел із 40 найменувань.

Метою роботи є дослідження та розробка програмних рішень для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки з метою підвищення ефективності моніторингу та управління процесами.

Об'єкт дослідження: системи Інтернету речей у сільському господарстві.

Предмет дослідження: методи, моделі та засоби інтеграції сенсорів, обробки та передачі даних у IoT-системах агротехнічного призначення.

Результати дослідження: проведено аналіз сучасних IoT-рішень у сільському господарстві, досліджено методи інтеграції сенсорів і обробки даних, зроблено архітектуру програмної системи та реалізовано прототип для моніторингу агропоказників із подальшою оцінкою ефективності.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи Інтернету речей у агротехніці, принципи роботи сенсорних систем, а також класифікацію IoT-рішень і роль хмарних технологій у сільському господарстві.

У другому розділі досліджено методи та програмні рішення для інтеграції сенсорів, розглянуто сучасні платформи управління агротехнічними процесами та підходи до обробки даних у IoT-системах.

У третьому розділі представлено проєктування та реалізацію системи збору й обробки сенсорних даних, описано програмне забезпечення для моніторингу агропоказників і проведено оцінку ефективності.

Висновок: застосування програмних рішень для інтеграції сенсорів у IoT-системи агротехніки дозволяє підвищити точність збору даних, оптимізувати управління ресурсами та забезпечити ефективність сільськогосподарського виробництва.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IoT, СЕНСОРИ, АГРОТЕХНІКА, ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО, МОНІТОРИНГ, ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБРОБКА ДАНИХ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

ANNOTATION

Bachelor's thesis of 108 pages, 19 figures, and a reference list containing 40 sources.

The aim of the work is to study and develop software solutions for integrating sensors into Internet of Things (IoT) systems for agricultural engineering in order to improve monitoring and management of agricultural processes.

Research object: Internet of Things systems in agriculture.

Research subject: methods, models, and software tools for sensor integration, data processing, and transmission in agricultural IoT systems.

Research results: modern IoT solutions in agriculture were analyzed, methods of sensor integration and data processing were studied, the architecture of a software system was developed, and a prototype for monitoring agricultural parameters was implemented and evaluated.

The first section describes the theoretical foundations of IoT in agriculture, principles of sensor systems, as well as classification of IoT solutions and the role of cloud technologies in farming.

The second section analyzes methods and software solutions for sensor integration, including modern platforms for agricultural management and approaches to data processing in IoT systems.

The third section presents the design and implementation of a system for collecting and processing sensor data, describes software for monitoring agricultural indicators, and evaluates the effectiveness of the developed system.

Conclusion: the use of software solutions for integrating sensors into agricultural IoT systems improves data accuracy, optimizes resource management, and increases the efficiency of agricultural production.

KEY WORDS: INTERNET OF THINGS, IoT, SENSORS, AGRICULTURE, PRECISION FARMING, MONITORING, CLOUD TECHNOLOGIES, DATA PROCESSING, AUTOMATION.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В АГРОТЕХНІЦІ	10
1.1 Основи Інтернету речей та сенсорних систем у сільському господарстві ..	10
1.2 Принципи збору, передачі та відстеження даних у IoT-системах	14
1.3 Розумне сільське господарство: класифікація IoT-рішень та роль хмарних технологій	18
1.4 Висновок по розділу	35
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ СЕНСОРІВ В IoT-СИСТЕМАХ	36
2.1 Інформаційні системи та платформи для управління агротехнічними процесами	36
2.2 Методи інтеграції та обробки даних сенсорів у IoT-системах	48
2.3 Інформаційно-комунікаційні технології у системах точного землеробств..	51
2.4 Висновок по розділу	72
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ СЕНСОРІВ	73
3.1 Проектування архітектури системи збору та обробки сенсорних даних	73
3.2 Реалізація сенсорного модуля та програмного забезпечення для моніторингу агропоказників	82
3.3 Оцінка ефективності системи та перспективи подальшого розвитку	87
3.4 Висновок по розділу	102
ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	105

					БР.ІІ – 81.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Програмні рішення для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Сворак Б.І					7	
Перевір.		Крихівський М.В.				ІФНТУНГ ІІ-22-3		
Реценз.		Зікратий С.В.						
Н. Контр.		Піх М.М.						
Затверд.		Бандура В. В.						

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку цифрових технологій сільське господарство зазнає суттєвих трансформацій, пов'язаних із впровадженням концепції точного землеробства та Інтернету речей (IoT). Зростання попиту на продовольство, необхідність раціонального використання ресурсів, а також вплив кліматичних змін обумовлюють потребу у впровадженні інтелектуальних систем моніторингу та управління агротехнічними процесами. Використання сенсорних пристроїв для збору даних про стан ґрунту, мікроклімат, рівень вологості, температури та інших параметрів дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень у сільському господарстві.

Актуальність теми зумовлена необхідністю створення ефективних програмних рішень для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей, які забезпечують безперервний моніторинг, обробку та аналіз даних у реальному часі. Існуючі підходи до автоматизації агротехнічних процесів часто характеризуються фрагментарністю, недостатньою масштабованістю та складністю інтеграції різнорідних пристроїв і платформ. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці універсальних програмних систем, здатних забезпечити ефективну взаємодію між сенсорами, комунікаційними протоколами, хмарними сервісами та користувацькими інтерфейсами.

Метою роботи є дослідження та розробка програмних рішень для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки з метою підвищення ефективності збору, обробки та використання даних у сільському господарстві.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз предметної області та існуючих IoT-рішень у сільському господарстві; дослідити теоретичні основи функціонування сенсорних систем та Інтернету речей; визначити принципи збору, передачі та обробки даних; дослідити сучасні програмні платформи та технології для інтеграції сенсорів; спроектувати архітектуру системи; реалізувати програмне забезпечення для моніторингу агропоказників; провести тестування системи та оцінити її ефективність.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об’єктом дослідження є системи Інтернету речей у сільському господарстві, що забезпечують автоматизований збір та обробку даних.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмні засоби інтеграції сенсорів, передачі даних і їх обробки в IoT-системах агротехнічного призначення.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел для вивчення сучасних підходів до побудови IoT-систем, порівняльний аналіз технологій передачі даних і платформ, моделювання архітектури системи, експериментальні методи для реалізації програмного забезпечення та оцінки його ефективності.

У роботі передбачається розробка програмної системи інтеграції сенсорів, яка забезпечує збір даних у реальному часі, їх передачу через мережеві протоколи, обробку в хмарному середовищі та візуалізацію для користувача. Особлива увага приділяється масштабованості системи, надійності передачі даних, сумісності з різними типами сенсорів та зручності використання. Очікується, що впровадження такої системи дозволить підвищити ефективність управління агротехнічними процесами, оптимізувати використання ресурсів та покращити якість сільськогосподарської продукції.

Бакалаврська робота містить 104 сторінок, 19 рисунків, 3 розділи, список використаних джерел із 40 найменувань.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В АГРО-ТЕХНІЦІ

1.1 Основи Інтернету речей та сенсорних систем у сільському господарстві

Сільське господарство протягом кількох десятиліть зазнає швидкої еволюції методологій та технологій для підвищення продуктивності та екологічної стійкості; сьогодні розвиток нових технологій дозволяє впроваджувати інтенсивне використання ресурсів (наприклад, ґрунту, води, добрив тощо) з метою виробництва високоякісної фруктової та овочевої продукції в достатніх кількостях для задоволення потреб у продуктах харчування, зберігаючи при цьому конкурентоспроможні ціни. Зокрема, інтенсивне сільське господарство дозволяє задовольняти основні потреби населення в умовах постійного зростання, але, з іншого боку, воно спричинило серйозні екологічні та екологічні збитки, такі як вирубка лісів, опустелювання, нерегульоване використання, а саме зловживання пестицидами та добривами, і, як наслідок, забруднення ґрунтових вод [1]. Тому метою є досягнення сталого сільського господарства з екологічної та екологічної точки зору, а також, очевидно, з точки зору економічної сумісності. Ключовим фактором для досягнення цього результату є правильне та оптимізоване використання різних вхідних ресурсів, таких як добрива, вода та засоби захисту рослин, у процесах сільськогосподарського виробництва. Завдяки розвитку технологій на основі Інтернету речей (ІоТ), сьогодні доступна величезна кількість недорогих та енергоємних модулів і датчиків, які можна використовувати на сільськогосподарських угіддях для виявлення та збору точних кліматичних та ґрунтових даних, а також інформації щодо росту чи хвороб вирощуваних культур, та надсилення всіх зібраних даних через Wi-Fi на хмарну програмну платформу для оптимізованого управління фермою.

Розроблена система являє собою комплексне багатоплатформне рішення, що використовує інтелектуальну систему фертигації, що працює в польовій

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережі бездротових сенсорів (WSN), для підтримки фермера та менеджера по всьому ланцюжку поставок від поля до розподілу продукції, а також для надання додаткових послуг клієнтам [2]. Фактично, розроблена система допомагає дилерам та торговцям перевіряти умови транспортування та зберігання харчових продуктів, а також їх походження, використовуючи низькоенергетичну смарт-мітку Bluetooth low energy (BLE), розміщену всередині харчового контейнера; таким чином, наявність єдиної багатофункціональної програмної платформи дозволяє користувачеві (як фермеру, так і покупцю) перевіряти всі події та обробки, що виконуються з продукцією, від посіву до споживчого столу. Щоб скористатися безліччю пропонованих послуг розробленої системи, інтегрована хмарна програмна платформа дозволяє нам керувати виробництвом сільськогосподарських культур та збутом агропродовольчої продукції тощо.

Переваги розробленої системи оптимального управління фермерським господарством, інтегрованої з автоматизованою системою фертигації, можуть охоплювати кілька типів вирощування, таких як деревні культури, садівництво та будь-які типи теплиць. Була розроблена недорога та енергетично автономна система фертигації для правильного дозування та змішування визначеної кількості та типу добрив у воді для зрошення. Кілька систем фертигації, встановлених на різних оброблюваних землях, також далеко одна від одної, можуть звертатися до однієї хмарної платформи і, таким чином, до однієї агрономічної бази даних, що містить дані, отримані з математичних моделей для різних розглянутих культур. Фактично, агрономічні моделі дозволяють визначати оптимальні параметри вирощування, такі як типи та кількість добрив, частота та тривалість поливів; всі ці операції калібруються на основі типів культур, погодних умов та фізичних і хімічних величин, пов'язаних з ґрунтом і повітрям, отриманих безпосередньо на полі [3]. Алгоритм прийняття рішень також підтримується деревоподібною бездротовою сенсорною мережею (WSN), встановленою на землі, що дозволяє отримувати оновлені дані в режимі реального часу, пов'язані зі станом культур. Відповідно до вищезазначених функцій, запропонована система дозволяє нам заощадити водні ресурси, добрива, що вносяться в ґрунт, та енергію порівняно з

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

класичними методами, а також забезпечити повну відстежуваність вирощеної продукції.

Програмна платформа безперервно отримує дані бездротової сенсорної мережі (WSN) через центральний блок керування від вузлів-координаторів та прогнози погоди з надійних метеорологічних веб-сайтів відповідно, а потім використовує їх у математичних агрономічних моделях для підтримки фермерів або агрономів у процесах прийняття рішень, пов'язаних з обробками, необхідними для оптимального росту або будь-яких хвороб сільськогосподарських культур. Зокрема, за допомогою комерційно розроблених модулів та датчиків була реалізована недорога та надійна WSN; крім того, завдяки компактній секції збору сонячної енергії та мінімізації споживання енергії вузлом за допомогою відповідної реалізації прошивки було досягнуто тривалої енергетичної автономності кожного сенсорного вузла.

Система підтримки рішень (СППР), реалізована в програмній платформі, використовує постійно оновлювані бази даних про добрива та засоби захисту рослин, включаючи всі технічні характеристики та способи використання, що дозволяє правильно вибрати найбільш підходящий продукт для кожного конкретного застосування або обробки, а також щодо стратегій боротьби з резистентністю, стаючи таким чином ефективним інструментом для адаптації агротехніки до змін клімату та конкретного географічного розташування [4]. Крім того, розроблена програмна платформа дозволяє відстежувати агропродовольчу продукцію, забезпечуючи зберігання інформації про обробку, яку пройшли продукти під час фаз вирощування, що дозволяє потенційним споживачам, зацікавленим у придбанні продукції, переглядати дані дистанційно на смартфоні/планшеті. Крім того, за допомогою багатоплатформного застосунку фермер або агроном може ідентифікувати, зчитуючи певний QR-код (швидкий відгук), частину оброблюваної землі та переглядати або оновлювати відповідну інформацію про вирощувані культури в цій конкретній області, або, нарешті, може отримати дані про проведення певної обробки вирощуваних культур.

Крім того, було розроблено систему відстеження та просування на

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі сенсорної мітки BLE, що кріпиться до пластикового або дерев'яного контейнера, де зберігаються свіжі або вже оброблені сільськогосподарські продукти. Мітка BLE з низьким енергоспоживанням оснащена кількома датчиками для моніторингу параметрів, корисних для визначення стану свіжості та умов зберігання різних видів харчових продуктів (тобто температури, вологості, загального рівня летких органічних сполук (TVOC), концентрації аміаку (NH₃) та вуглекислого газу (CO₂) [5]. Різноманітність виявлених параметрів робить реалізований пристрій надзвичайно універсальним для моніторингу різних типів харчових продуктів (овочі, м'ясо, риба тощо). унікальна функція, якої немає в інших конкуруючих системах, про які повідомлялося в літературі, а також у тих, що доступні на ринку. Крім того, розроблена смарт-мітка BLE може бути повторно використана протягом тривалого часу на одному контейнері або, якщо контейнер пошкоджено, її можна легко видалити та встановити на інший контейнер. Крім того, технологія iVeason використовується для підтримки системи відстеження в моніторингу сільськогосподарської та харчової продукції, що зберігається, по всьому ланцюжку постачання (ЛП), тим самим надаючи споживачам послугу з доданою вартістю. Чергуючи фазу iVeason з фазами отримання та передачі з низьким робочим циклом, розроблений пристрій BLE діє як перепрограмувана мітка, здатна контролювати показники свіжості типології харчових продуктів, що зберігаються. Прототип смарт-мітки BLE був протестований для перевірки її правильної роботи та оцінки енергетичної автономності, яка виявилася близько 5,6 місяців. Був розроблений мобільний додаток для дистанційного моніторингу параметрів відстеження та зберігання, отриманих мітками BLE, розміщеними всередині контейнерів з сільськогосподарською та харчовою продукцією. Як мітка BLE, так і система відстеження були протестовані в різних реальних робочих сценаріях, використовуючи апельсини та заморожене філе тріски, розміщене в пластикових та поліетиленових контейнерах, демонструючи їх правильну роботу.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Принципи збору, передачі та відстеження даних у сенсорних IoT-системах

Отже, розроблена програмна платформа для оптимізованого управління фермерським господарством дозволяє впровадити інноваційну бізнес-модель, натхненну принципами відстеження продукції, щоб гарантувати споживачам її якість, а також якість органічно вирощених продуктів харчування та форм справедливої торгівлі агропродовольчої продукції. Фактично, хмарний програмний додаток, спеціально розроблений для розробки нових бізнес-моделей, забезпечує нові форми справедливої торгівлі харчовими продуктами та інші впроваджені послуги для збільшення потенційного ринку сільськогосподарської продукції фермерських господарств [6].

Інтернет речей (скорочено IoT) – це комп'ютерна мережа підключених до Інтернету фізичних об'єктів, здатних збирати та обмінюватися даними за допомогою вбудованих технологій для взаємодії один з одним та із зовнішнім середовищем. Ферми, що використовують IoT, прагнуть мінімізувати експлуатаційні витрати, забезпечуючи при цьому кращі виробничі результати, такі як вища врожайність, зменшення втрат худоби та менше споживання води. Структура Інтернету речей від CISCO складається з наступних семи рівнів рисунок 1.1.

- *Рівень фізичних пристроїв та контролерів.* Це найнижчий рівень, який відповідає за дані. На цьому рівні розташовані датчики, мікроконтролери, мікропроцесори та виконавчі механізми, тобто пристрої, які збирають дані та передають їх для подальшої обробки. Цей рівень гарантує правильність та високу точність зібраних даних, збір яких спрощує подальшу обробку.

- *Рівень з'єднання.* Цей рівень відповідає за протоколи зв'язку. Зв'язок між сенсорними пристроями та мікроконтролерами здійснюється через RFID (радіочастотна ідентифікація), BLE (низькоенергетичний Bluetooth), NFC (ближній польовий зв'язок), Zigbee тощо. Також можливо безпосередньо підключати датчики до мікроконтролерів через кабельне з'єднання. Мікроконтролер та мікропроцесори використовують такі протоколи, як MQTT (Message Queuing Telemetry

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Transport), CoAP (Constrained Application Protocols) для передачі даних до шлюзу. Шлюз використовує HTTP (HyperText Transfer Protocol), MQTT або CoAP для подальшого зберігання даних у хмарі або на сервері.

- *Рівень периферійних обчислень.* Периферійні обчислення в термінології CISCO можна називати туманними обчисленнями [7]. Основною метою периферійних обчислень є обробка необроблених даних. Ці обчислення виконуються шлюзовим пристроєм, який виконує низькорівневий аналіз даних, щоб відкинути непотрібні дані та перетворити різномірні дані у форму, що спрощує прийняття рішень для машинного навчання та алгоритмів аналізу даних.

- *Шар накопичення даних.* Дані з пристроїв шлюзу збираються та зберігаються в хмарі для подальшої обробки.

- *Шар абстракції даних.* Для отримання більш інтелектуальної інформації впроваджено різні алгоритми інтелектуального аналізу даних.

- *Рівень додатків.* На цьому рівні розгортаються панелі інструментів інтелектуальних додатків (таких як мобільні), які отримують дані з хмари. На основі запитів споживачів постачальник хмарних послуг працює з даними, щоб користувач міг отримати корисну інформацію. Деякі інтелектуальні пристрої можуть розгорнути вбудований додаток та отримувати дані з хмари для виконання алгоритмів машинного навчання.

- *Рівень користувача та бізнес-рівень.* Цей рівень стосується аспектів керування користувачами та бізнес-рівня повністю розгорнутої програми.

У сільськогосподарській практиці системи Інтернету речей (IoT) можуть складатися з мережі інтелектуальних пристроїв та хмарної платформи, до якої вони підключені. Поруч із ними розташована система для зберігання, обробки та захисту даних, що збираються датчиками. Впровадження цифрових технологій у сільськогосподарське виробництво передбачає максимально безперервний збір даних з великої кількості датчиків, безпілотних транспортних засобів та літальних апаратів. Отримана інформація про процеси є великими даними (big data), що мають властивості мінливості, високої динаміки, масштабності, багатовимірності та асиметрії [8]. Універсальним правилом у технологіях Інтернету речей

					БР.ІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та пов'язаних з ними процесах агрегації великих даних є те, що чим величезні дані збираються в одному місці, тим розумнішою стає система і тим ціннішу інформацію можна отримати для споживачів.

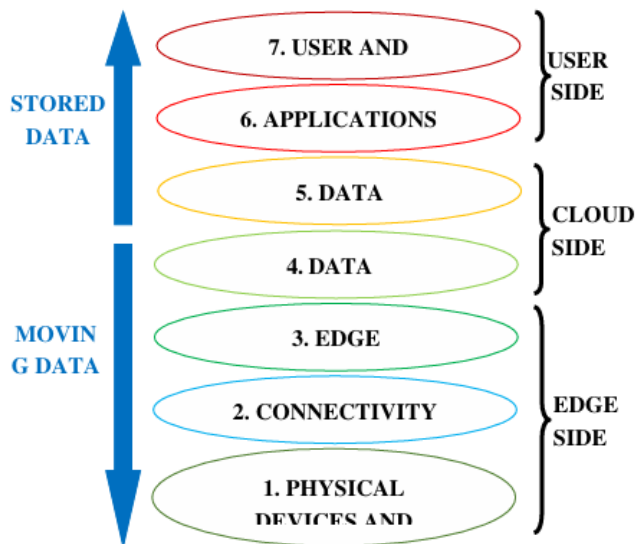


Рисунок 1.1 - Семишарова еталонна модель CISCO

Для зберігання та обробки зібраних даних перспективним є використання хмарних технологій (тобто технологій розподілених обчислень, що використовують мережеві методи доступу до спільних обчислювальних ресурсів). Хмарна інфраструктура включає комп'ютерні мережі, сервери, сховища даних та операційні системи. Постачальники хмарних послуг зазвичай надають свої послуги, використовуючи одну з наступних технологій [3]:

- SaaS (Програмне забезпечення як послуга). Усе необхідне програмне забезпечення розміщене на хмарних серверах та надається в оренду. Також є такі послуги, як зберігання даних, файлів та записів, веб-сервіси електронної пошти та різні інструменти, пов'язані з управлінням проектами, які можна налаштувати залежно від сільськогосподарської компанії.
- PaaS (платформа як послуга). Клієнтам надається середовище для розробки власних додатків, включаючи операційну систему, бази даних та інструменти обробки.

- IaaS (Інфраструктура як послуга). Надаються потужності та ресурси для зберігання даних, встановлення операційних систем та розробки додатків. Головною метою IaaS є усунення залежності від платформ та ресурсоємної інсталяції, надання їх як частини хмарного сервісу [9].

У сучасному сільському господарстві спостерігаються стабільні тенденції розвитку цифрових платформ в агропромисловому комплексі, реалізованих на технологіях PaaS. У цьому випадку більшість даних з датчиків зберігається в хмарі, що звільняє аграрну компанію від необхідності мати великі сервери для зберігання даних за період спостереження. Цікавим є поєднання хмарних та периферійних обчислень. У цьому випадку безпосереднє керування технологічним процесом на основі даних датчиків здійснюється з сервера, розташованого на території ферми. Час від часу периферійна база даних буде синхронізована з хмарною базою даних, а алгоритми керування будуть оновлюватися для підвищення якості та ефективності прийняття рішень. Забезпечення необхідного рівня безпеки інформаційних підсистем та ресурсів, цілісності та конфіденційності даних досягається за допомогою закритих хмарних сервісів. Хмарні технології дозволяють об'єднати сільськогосподарські компанії в єдину інтегровану інформаційно-комунікаційну систему з використанням елементів штучного інтелекту для розробки алгоритмів керування на основі аналізу великих даних. Алгоритми керування на основі самонавчальних нейронних мереж будуть постійно коригуватися та вдосконалюватися в міру надходження нових даних. Наявність єдиної інформаційної бази дозволить розробляти рекомендації для різних сільськогосподарських компаній, враховуючи спостережувані тенденції (прогнозовані погодні умови, поширення хвороб, шкідників тощо) та накопичений досвід інших компаній. Впровадження Інтернету речей у сільському господарстві досягає найбільшого ефекту, коли процеси внутрішньо сільськогосподарського виробничого циклу пов'язані з іншими ланками ланцюжка створення вартості. Створюються складні високоавтоматизовані виробничо-логістичні ланцюги, що охоплюють оптові та роздрібні торговельні компанії, логістику, сільськогосподарських виробників та їхніх постачальників в єдиний процес з адаптивним

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управлінням. Такі ланцюги дозволяють знизити собівартість та роздрібні ціни на харчові продукти, тим самим збільшуючи їх доступність для споживачів та виробничо-збутові потужності [10].

1.3 Розумне сільське господарство: класифікація IoT-рішень та роль хмарних технологій

Досягнення в технологіях Інтернету речей та штучного інтелекту революціонізували сільське господарство, забезпечивши інтелектуальні системи, які можуть моніторити, контролювати та візуалізувати різні сільськогосподарські операції в режимі реального часу та з інтелектом, порівняним з людським у розрахунках та аналізі [4]. «Розумне сільське господарство» – це термін у сільськогосподарському секторі, спрямований на оптимізацію діяльності фермерів з метою підвищення продуктивності виробництва та інтелектуалізації сільськогосподарської системи [5]. Очікувані переваги від впровадження технологій розумного сільського господарства – це збільшення виробництва, зниження витрат за рахунок зменшення потреби в паливі, добривах та пестицидах, зниження витрат на оплату праці та покращення якості кінцевого продукту [6].

Інтернет речей – це перспективне сімейство технологій, яке може запропонувати різноманітні рішення для модернізації сільського господарства. Зокрема, управління та аналіз даних Інтернету речей можуть бути використані для автоматизації процесів, прогнозування ситуацій та покращення багатьох дій у режимі реального часу [7]. Збір даних з кількох етапів ланцюгів поставок дозволяє створювати прозорі системи виробництва продуктів харчування на основі даних [8]. У [4] зазначається, що цифровізація сільського господарства за допомогою штучного інтелекту та Інтернету речей вийшла зі стадії концепції та досягла стадії впровадження. Різні компоненти та нові технології, такі як датчики, додатки, програми та обладнання, включені до Інтернету речей у сільському господарстві.

Виділено чотири рівні Інтернету речей. Перший компонент – це датчик,

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який збирає дані в режимі реального часу, потім – комунікаційний пристрій, який обробляє передачу даних (другий рівень). Третій рівень відповідає за аналіз даних, а сервісний рівень – за виконання будь-яких необхідних дій.

Наведено різні визначення Інтернету речей, розглянуто технології, що підтримують Інтернет речей, та класифіковано функціональні області застосування Інтернету речей. Найбільш широко досліджуваними питаннями в галузі Інтернету речей є застосування Інтернету речей у сільськогосподарському секторі, за яким йдуть застосування Інтернету речей у харчовій промисловості та в інших секторах, таких як енергетика, охорона здоров'я та промисловість [11].

Сільськогосподарський Інтернет речей використовується в найрізноманітніших галузях сільського господарства. Все більше оглядових робіт присвячено застосуванню Інтернету речей у сільськогосподарському секторі; див. [4, 7, 10-19]. Зазначається, що більшість досліджень присвячені виробництву сільськогосподарських культур і, меншою мірою, тваринництву, найпопулярнішим напрямком є зрошення. Водночас, більшість досліджень зосереджені на підвищенні продуктивності сільськогосподарського сектору шляхом вирішення технічних проблем з точки зору математичного та імітаційного моделювання, тоді як інші дослідження зосереджені на виявленні та аналізі ризиків, пов'язаних з розгортанням Інтернету речей по всьому ланцюжку поставок [12].

Розглядається застосування технологій розумного сільського господарства у виробництві сільськогосподарських культур, тваринництві та зборі врожаю, а також описуються переваги та проблеми впровадження запропонованого рішення для кожного розглянутого дослідження. У роботі перераховані сфери використання Інтернету речей у розумному сільському господарстві, від зрошення та удобрення до систем управління фермерським господарством та блокчейну, а також питання безпеки, проблеми та кілька майбутніх напрямків досліджень [13]. Розглядаються потенційні застосування Інтернету речей та штучного інтелекту (ШІ) у розробці інтелектуальних сільськогосподарських машин, систем зрошення, боротьби з бур'янами та шкідниками, удобрення, вирощування в теплицях, сховищ, захисту рослин **безпілотними літальними апаратами**

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(БПЛА), моніторингу здоров'я врожаю тощо. Серед застосувань Інтернету речей у сільському господарстві 4.0, перераховує відбір проб ґрунту та картографування, зрошення, удобрення, боротьбу з хворобами, управління теплицями, вертикальні ферми, гідропоніку та фенотипування.

Дослідження зосереджене на вирощуванні сільськогосподарських культур на відкритому повітрі та керівниках фермерських господарств як основних користувачів та осіб, що приймають рішення, тоді як дослідження зосереджене на відстеженні посівів, польових обстеженнях та аналізі, що надає фермерам дані про відповідні стратегії управління фермерським господарством [14]. Публікації були переглянуті за такими критеріями: тип сільськогосподарської рослини, розмір ферми, дані зондування, використане обладнання (датчики, виконавчі механізми тощо), джерела живлення, швидкість або частота збору даних, методи зберігання даних, комунікаційні технології, методи та алгоритми аналізу даних. Впровадження вертикальних ферм та вертикальних садів може бути корисним для підтримки сталого навколишнього середовища, а також для покращення продовольчої безпеки міст.

Зі зростанням складності ланцюгів постачання продуктів харчування зростає і важливість прозорості у виробництві продуктів харчування [8]. Застосування Інтернету речей у ланцюжку постачання сільськогосподарської харчової продукції може не тільки забезпечити справді прозорий ланцюг поставок, але й зменшити втрати їжі та води, викиди вуглецю, використання пестицидів, а також покращити управління ґрунтами, якість та безпеку харчових продуктів, управління запасами та доходами [15]. Було проведено систематичний огляд літератури щодо застосування технології блокчейн у ланцюжку створення вартості сільськогосподарської харчової продукції. Наведено огляд публікацій щодо інтеграції блокчейну та Інтернету речей у розробку інтелектуальних додатків у точному землеробстві. Застосування Інтернету речей у сільськогосподарському та харчовому секторах підвищує відмовостійкість, маневреність та гнучкість системи; сприяє екологічним, соціальним та економічним аспектам сталого розвитку [16].

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розумні сільськогосподарські технології та дані

Розумне сільське господарство - це не окрема технологія, а сукупність різних технологій [19], які можна використовувати окремо або в поєднанні, залежно від потреб процесу. Технології Інтернету речей (сенсори, ідентифікація та розпізнавання, апаратне забезпечення, програмне забезпечення з хмарними платформами, комунікація та мережі, програмне забезпечення та алгоритми, аналітика даних та зберігання даних, позиціонування та безпека) розглядаються та поділяються на чотири області: додатки, проміжне програмне забезпечення, мережі та об'єкти.

Постійно зростаючий інтерес до технологій Інтернету речей надає огляд сучасних технологій Інтернету речей, що використовуються в сільськогосподарському секторі, їхньої потенційної цінності для фермерів та викликів, з якими стикається Інтернет речей під час його впровадження. Представлено огляд понад ста статей про інформаційно-комунікаційні технології, що використовуються в сільському господарстві 4.0. Це дослідження було проведено щодо того, як цифрові технології впливають (функціонально, економічно, екологічно та соціально) на сільськогосподарське виробництво, трансформують ланцюги постачання сільськогосподарської харчової продукції, а також розглядають проблеми, що виникають під час їх впровадження. Описано допоміжні технології Інтернету речей, які можуть підвищити прозорість виробництва харчових продуктів.

У різних дослідницьких оглядах наукових публікацій розглядаються різні технології, що використовуються в сільському господарстві, такі як: системи позиціонування (завдяки GPS), дистанційні датчики (включаючи БПЛА), аналіз даних, інструменти підтримки рішень, автоматизація та робототехніка [17]; безпілотні літальні та наземні апарати, обробка зображень, машинне навчання, великі дані, хмарні обчислення та бездротові сенсорні мережі (скорочено WSN) [6]; хмарні обчислення WSN, великі дані, вбудовані системи, протоколи та архітектури безпеки, комунікаційні протоколи та веб-сервіси [22]; Інтернет речей, блокчейн, великі дані та штучний інтелект [21]; робототехніка, дрони, дистанційні датчики та комп'ютерний зір з програмним забезпеченням для машинного

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навчання та обчислень [18]; Інтернет речей, хмарні обчислення, машинне навчання та штучний інтелект [12]; трактори на базі Інтернету речей, роботи та хмарні обчислення [20]. Технічні деталі штучного інтелекту, Інтернету речей та проблеми, пов'язані з впровадженням цифрових технологій.

Багато досліджень наголошують на інтеграції таких технологій, як блокчейн, великі дані, хмарні обчислення, машинне навчання, технології обробки зображень, RFID, бездротова мережева мережа (WSN) тощо, з Інтернетом речей (IoT) для застосування в сільському господарстві та виробництві продуктів харчування. Багато досліджень, зосереджені на покращенні системи в цілому шляхом зменшення енергоспоживання, затримки, збільшення пропускної здатності тощо. Сільськогосподарські хмарні рішення IoT для моніторингу та управління сенсорними мережами, дронами, автономними транспортними засобами, роботами, сільськогосподарською технікою, теплицями та ланцюгами постачання продуктів харчування. Наведено огляд використання периферійних та туманних обчислень у тваринництві, виробництві сільськогосподарських культур, рибництві, лісовому господарстві та огороженні ферм, моніторингу навколишнього середовища та ланцюгах постачання продуктів харчування. Наведено огляд того, як різні технології, такі як IoT, БПЛА, Інтернет підземних речей (скорочено IoUT), аналітика великих даних, методи глибокого навчання та методи машинного навчання, можуть бути використані для управління різними операціями, пов'язаними з сільськогосподарською фермою. Для кожної з цих технологій проведено детальний огляд її використання в Сільському господарстві 4.0. Наведено огляд останніх досліджень щодо застосування технологій Інтернету речей (IoT) та БПЛА у сільському господарстві. Описано основні принципи технології IoT, включаючи інтелектуальні датчики, мережі та протоколи, додатки та рішення IoT, що використовуються в інтелектуальному сільському господарстві. Зазначається, що інтеграція різнорідних даних з різних датчиків, що використовуються в системах інтелектуального землеробства, є суттєво складною через проблеми сумісності програмного та апаратного забезпечення.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

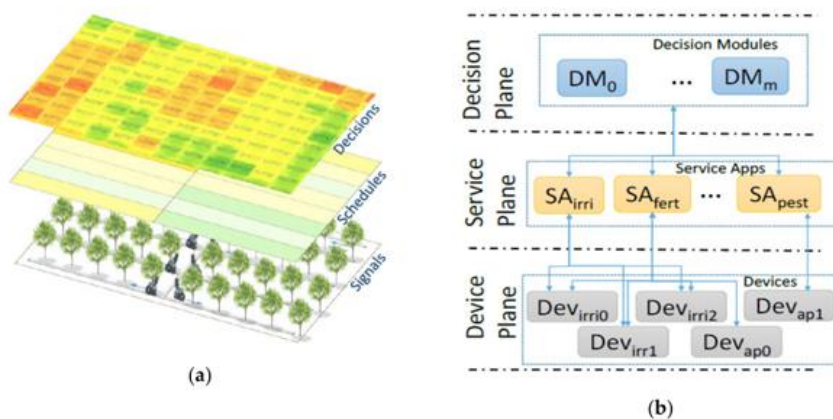


Рисунок 1.2 - (а) Структура програмного забезпечення системи підтримки рішень (СППР та (б) її трирівнева архітектура з площинами рішень, послуг та пристроїв відповідно.

Технології Agriculture 4.0 базуються на таких чотирьох етапах [20]: зондування даних, збір даних, передача даних та обробка даних. Проблеми збору, обробки та зберігання, а також доступу до даних з датчиків та інших пристроїв Інтернету речей у розумному сільському господарстві. Параметри, що контролюються датчиками в розумних сільськогосподарських застосунках на основі Інтернету речей, де зазначається, що найчастіше використовуваними датчиками є датчики температури, вологості, ґрунту та інтенсивності сонячного світла. Більшість дослідників зазначають, що дані, що збираються датчиками, є величезними (і ця кількість зростає день у день), розподіленими (прив'язаними до місця розташування та часу), неоднорідними (можуть бути структурованими, напівструктурованими або неструктурованими).

Інтернет речей, будучи мережею невеликих та віддалено розташованих об'єктів, має дуже обмежені ресурси з точки зору обробки та зберігання даних. Якість та вартість пристроїв і датчиків, а також надійність системи є основними викликами для дрібних фермерів, які прагнуть впровадити передові технології [4]. Крім того, оскільки пристрої Інтернету речей є гетерогенними, існує проблема сумісності та синхронізації пристроїв для кращої продуктивності [4], оскільки первинного аналізу або попередньої обробки даних може бути недостатньо для зберігання даних з різних джерел [23]. Іноді зберігання та обробка даних

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинні відбуватися в режимі реального часу, що вимагає додаткових обчислювал

льних ресурсів [6]. Існує нагальна потреба в модернізації пристроїв Інтернету речей для підвищення їхньої надійності, витривалості, інтелектуалізації тощо, одночасно зменшуючи витрати та експлуатаційні труднощі. Рішенням може бути хмарний сервіс для застосунків Інтернету речей, оскільки він може забезпечити величезну обчислювальну потужність, величезний обсяг сховища та має високу масштабованість [4]. Хмара також враховує багато інших елементів, таких як енергоефективність, оптимізація використання апаратного та програмного забезпечення, масштабованість, продуктивність та гнучкість [18].

Хмарні технології, що використовуються в сільському господарстві

Хмарні обчислення. Хмара з практично необмеженою обчислювальною потужністю та ємністю сховища – це технологія, яка може витримувати навантаження Інтернету речей [7]. Сервер Інтернету речей може бути реалізований з використанням інфраструктури хмарних обчислень, яка має переваги завдяки низькій вартості впровадження та масштабованості. Хмарні обчислення в застосунках розумного сільського господарства можуть бути використані для збору та зберігання інформації з віддалених датчиків, для обробки даних (таких як аналіз даних, візуалізація та прийняття рішень) та відображення результатів користувачам [24].

Використовуючи хмарні системи Інтернету речей, можна зберігати великі дані з багатьох датчиків у комп'ютерній хмарі. Також можна розміщувати додатки, необхідні для надання послуг та управління.

Архітектура Інтернету речей. Ці ресурси надійно доступні з будь-якого місця в будь-який час, а інформація може бути надана у формі, зрозумілій для фермерів або агрономів [6]. Фермери можуть отримати доступ до всієї інформації, доступної на ринку, стосовно сільськогосподарської практики та обладнання, а також до порад від різних аналітичних організацій [20]. Хмарні обчислення мають стати центральною системою інфраструктури систем управління знаннями

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та систем підтримки рішень і можуть бути незамінними в системах з вимогами до обробки великих даних, особливо в режимі реального часу [25].

В оглядах, що розглядають застосування Інтернету речей у сільському господарстві, зазначається, що більшість розглянутих систем залежать щонайменше від одного хмарного сервісу [17]. Найпопулярнішими методами зберігання даних були використання серверної бази даних, платформи віддаленого керування даними та хмарного сервера [7, 14]. Будь-який пристрій Інтернету речей містить інтерфейс підключення до Інтернету для передачі даних на сервер [22]. Найпоширеніші платформи для Інтернету речей базуються на хмарних обчисленнях [10]. Як правило, початкова обробка даних здійснюється на локальному сервері, а основні хмарні сервіси використовувалися для завантаження, зберігання, обробки, аналізу, прийняття рішень та генерації сповіщень другого рівня [26].

Представлено схему хмарної мережі IoT для сільського господарства, призначеної для реалізації моделей машинного навчання для збору та аналізу сільськогосподарських даних. Зазначається, що хмара IoT потребує подальшого дослідження через наявність обмежень, таких як масштабованість, надійність, конфіденційність, безпека, неоднорідність використовуваного обладнання, оптимізація енергоспоживання та вартість.

Туманні обчислення. Величезна кількість даних, що генеруються пристроями Інтернету речей, може призвести до високих витрат на передачу до хмари, як з точки зору грошей, так і затримки [7]. У випадку, коли фермери працюють з високоавтоматизованим обладнанням або БПЛА, низька затримка та надійність є першорядними для їхньої безпеки та забезпечення негайного реагування на різні події [6]. Щоб мінімізувати затримку, витрати та покращити якість обслуговування, було запропоновано периферійні та туманні обчислення, МЕС (мобільні периферійні обчислення), МСС (мобільні хмарні обчислення) та хмарні технології, які є розширенням парадигми хмарних обчислень [27]. Вони обробляють дані на периферійному рівні мережі на маршрутизаторі та/або шлюзі Інтернету речей для покращення продуктивності системи Інтернету речей (наприклад,

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час відгуку, пропускна здатність, енергоефективність), а також для забезпечення більшої безпеки та конфіденційності. Такі обчислювальні системи включають кілька механізмів, подібних до хмарних обчислень, але розгорнутих на периферійних вузлах, розташованих між пристроями Інтернету речей та хмарною інфраструктурою. Їх можна розглядати як частину проміжного програмного забезпечення Інтернету речей. Таким чином, ці парадигми можуть доповнювати хмарні обчислення.

Локальні туманні вузли знаходяться в безпосередній близькості до периферійних пристроїв і можуть надавати свої обчислювальні та сховищні ресурси для підвищення надійності підтримуваної системи, безпеки з відмовостійкістю, масштабованості, багатокористувацькості, розширеної аналітики та автоматизації, економічної ефективності. Як результат, локальні туманні вузли дозволяють зменшити обсяг даних, що передаються в хмару [6,18]. Досліджуються переваги транспортної мережі, в якій транспортні засоби відіграють роль туманних серверів, що зменшує затримку та покращує якість обслуговування передачі даних. Шлюзи Інтернету речей як туманні сервери збирають дані з датчиків та включають послуги агрегації даних, фільтрації, шифрування та кодування відеопотоку. Вони також можуть прогнозувати та/або категоризувати події на основі алгоритмів машинного навчання, розгорнутих у хмарах. Таким чином, можна досягти оптимального балансу між периферійним сховищем з обробкою та частиною робочого навантаження, яка повинна виконуватися в хмарі [28]. Робиться висновок, що розробникам важливо з самого початку правильно визначити, де відбуватиметься обробка даних, оскільки це впливає на вибір вузлів, обсяг даних, що передаються, та використовувані протоколи зв'язку.

Периферійні обчислення. Для використання технологій розумного сільського господарства, і зокрема хмарних обчислень, необхідно підтримувати постійне підключення до Інтернету. У сільській місцевості підключення до Інтернету може бути або взагалі відсутнім, або з'єднання нестабільне та часто переривається [17]. Технологією, яка може зменшити цю проблему, є периферійні обчислення, які пропонують перенести обчислення та зберігання даних на край

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережі, щоб забезпечити достатню якість обслуговування для ресурсоемних, чутливих до затримки та пропускну здатності послуг. Якщо на початку розвитку комунікацій Інтернету речей (IoT) різні кінцеві точки пристроїв IoT не виконували великого обсягу аналізу та обробки даних, то зараз вони взаємодіють один з одним та обробляють більше даних на краю мережі [16]. Зі збільшенням технічних можливостей периферійних вузлів (CPU-пам'яті) обробка даних здійснюється безпосередньо на периферійних вузлах мережі, і лише результати надсилаються в хмару [29].

Нещодавні дослідження показують, що архітектури периферійних обчислень є оптимальним рішенням для мінімізації затримки, підвищення конфіденційності та зниження витрат на пропускну здатність у системах на основі Інтернету речей. Наведено огляд технології периферійних обчислень та її еталонних архітектур, а також представлено пропозицію щодо багаторівневої архітектури з модульним підходом. Вона протестована з точки зору зниження витрат на пропускну здатність між периферією та хмарию шляхом створення платформи Інтернету речей в інтелектуальному агропромисловому комплексі. Запропонована еталонна архітектура дозволяє особі, яка приймає рішення, керувати складними системами, такими як розумні міста, розумна енергетика, охорона здоров'я або точне землеробство. Розглядається проект AREThOU5A для управління зрошувальною водою на фермі, наведено схему його системної архітектури з серверною підсистемою, розгорнутою в хмарі та відповідальною за зберігання необроблених даних вимірювань, виконання процедур обробки даних та адміністрування функції сповіщень електронною поштою.

Огляд застосувань периферійних обчислень у сільському господарстві вказує на те, що периферійні обчислення в сільському господарстві є більш поширеними, ніж може здаватися, оскільки вони іноді є підкомпонентом в інших галузях досліджень, наприклад, в Інтернеті речей. Однак системи, що розробляються, часто перебувають на стадії прототипу, і критичні питання сумісності з масштабованістю не були достатньо розглянуті. Інфраструктура периферійних обчислень, що використовувалася, була спеціалізованою, і для досягнення

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значного впливу на фермерське господарство потрібно було розробити надійні платформи для периферійних послуг, а не окремі реалізації.



(a)



(b)

Рисунок 1.3 - Зображення робота Vitirover на сонячній енергії в дії на землі (а); дрон Falcon 8, який використовується для моніторингу кількості хлорофілу всередині виноградників за допомогою інфрачервоних (ІЧ) датчиків (b).

Різні підходи до опису архітектури Інтернету речей обговорюються, де описано використані апаратні технології та протоколи зв'язку, їх переваги та недоліки. Було розглянуто такі дослідницькі питання. Які архітектури зберігання та обробки найкраще підходять для застосувань Сільського господарства 4.0 та відповідають його особливостям? Чи можуть універсальні архітектури задовольнити потреби застосувань Сільського господарства 4.0? Які можливості горизонтального розвитку дозволяють перейти від досліджень до індустріалізації? Які можливості вертикального оцінювання для переходу від алгоритмів, навчених у хмарі, до вбудованих або автономних продуктів? Зроблено висновок, що не існує універсальної та унікальної архітектури для застосувань Інтернету речей у розумному сільському господарстві, яка б відповідала всім потребам усіх випадків використання.

Наведено аналіз найпопулярніших архітектур хмарних обчислень, їх комбінацій з туманними та периферійними обчисленнями, а також порівняння архітектур за такими критеріями, як близькість до користувача, затримка та тремтіння, стабільність мережі, висока пропускну здатність, надійність, масштабованість, економічна ефективність та доступність. Також було зазначено, що хмара

БР.ІІ - 81.00.00.000 ПЗ

					Арк.
					28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

розвиток туманних та периферійних обчислень та їх аналогів для бездротових мереж МЕС дозволяє розміщувати можливості обробки ближче до користувачів, покращуючи час відгуку, процедури, які можна виконувати на периферійних пристроях, обмежені обчислювальними та потужними можливостями цих пристроїв. Традиційні централізовані хмарні обчислення продовжуватимуть бути важливою частиною обчислювальних систем і не можуть бути повністю замінені туманними та периферійними обчисленнями, оскільки деякі ресурсомісні завдання можуть виконуватися лише на рівні хмари, яка має обчислювальну потужність та ємність для зберігання даних. У сільському господарстві 4.0 це особливо актуально для обробки супутникових знімків та навчання алгоритмів штучного інтелекту.

Комунікаційні протоколи для хмарних та периферійних обчислень

Порівняння використовуваних технологій та протоколів Інтернету речей на рівнях застосування, передачі даних, Інтернету та мережевого інтерфейсу було проведено в роботі. Аналізується наукова література з комунікаційних технологій Інтернету речей у розумному сільському господарстві. Для передачі зібраних даних від датчиків до центру керування використовуються дротові, бездротові та гібридні технології. Бездротові комунікаційні технології Інтернету речей (Wi-Fi, ZigBee, LoRa, RFID, Проаналізовано мобільний зв'язок та Bluetooth), що використовуються для підключення до різних пристроїв на різних рівнях сільськогосподарського виробництва. Різні технології порівнюються з точки зору технічних характеристик та вартості. Лише в одній публікації використовувалася дротова технологія передачі даних CAN. Результати показують, що кожна технологія має свої переваги та обмеження, а різні технології бездротового зв'язку підходять для різних сценаріїв. Найпоширенішими технологіями передачі даних для збору даних датчиків були Zigbee та Wi-Fi [30]. Бездротові протоколи, такі як ZigBee та LoRa, є вигідними для сільськогосподарського застосування порівняно з іншими протоколами завдяки низькому енергоспоживанню, а також бажаному діапазону зв'язку [11].

Безпрецедентні можливості збору та управління даними, що

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пропонуються Інтернетом речей, базуються на кількох факторах базової архітектури та технології комунікаційної мережі, одним з найважливіших з яких є протокол, що використовується між вузлами Інтернету речей, шлюзами та серверами додатків. Пропонується огляд досліджень протоколів Інтернету речей з акцентом на їх основні характеристики, продуктивність та частоту використання в сільськогосподарських застосуваннях. Розглянуто протоколи для обміну даними між пристроями Інтернету речей MQTT, CoAP, XMPP, AMQP, DDS, REST HTTP та Web Socket. Їх порівнювали за показниками ефективності (затримка, пропускна здатність та енергоспоживання). Було показано, що найпопулярнішим для зв'язку між пристроєм та шлюзом Інтернету речей є протокол MQTT, який є лідером майже за всіма показниками продуктивності. Протокол MQTT для Інтернету речей також обговорювався з питаннями автентифікації та безпеки під час передачі даних та проблемами захисту пристроїв Інтернету речей від фізичних та логічних атак.

Передача повідомлень з Інтернету речей до хмари вимагає комплексного захисту, навіть при використанні протоколу Transport Layer Security (TLS). Запропоновано систему, яка стандартизує передачу повідомлень від пристрою до хмарної платформи і навпаки та забезпечує наскрізну безпеку. Проведені експерименти демонструють ефективність розробленої системи та гарантують унікальну ідентифікацію пристроїв у домені. Зазначається, що під час проектування комунікаційної мережі слід використовувати один і той самий протокол від пристроїв Інтернету речей до шлюзу, від шлюзу до хмари (платформи Інтернету речей), від хмари до пристрою кінцевого користувача і навпаки, щоб керувати цими виконавчими механізмами. Ця структура є необов'язковою, і в різних частинах архітектури комунікаційної мережі можуть використовуватися різні протоколи залежно від вимог платформи Інтернету речей, вимог до апаратного та програмного забезпечення шлюзів тощо. У контексті протоколів та стандартів Інтернету речей перевагу надавали програмному та апаратному забезпеченню з відкритим вихідним кодом [31], оскільки воно може вирішити проблеми сумісності щодо протоколів та пристроїв.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інформаційні системи управління фермерським господарством (FMIS)

Розглядаються інформаційні системи управління фермерськими господарствами. Такі системи еволюціонували від простого програмного забезпечення для ведення обліку до складних хмарних систем, які можуть маніпулювати великими обсягами даних та надавати можливості підтримки рішень. Розробка платформи Інтернету речей для сільського господарства має на меті перейти від обслуговування лише певної худоби або сільськогосподарських культур до універсальної платформи, яка може підтримувати будь-яку худобу або сільськогосподарську культуру. Це дозволить легко модифікувати систему, яка може підтримувати широкий спектр застосувань, від управління та моніторингу виробництва сільськогосподарських культур і тваринництва до продажу продукції споживачам і місцевим магазинам [20]. Така система не залежатиме від жодних регіональних та географічних обмежень і може бути посередником для кількох застосувань Інтернету речей у сільському господарстві.

Було проведено огляд публікацій з метою визначення та опису поточного стану розробки FMIS. В результаті детального аналізу було виявлено 81 особливість FMIS та 53 перешкоди для впровадження FMIS. Деякі перешкоди були очевидними, такі як проблеми системної інтеграції та вартість FMIS. Інші виявлені перешкоди були менш очевидними, такі як низький рівень розуміння FMIS та відсутність необхідних навичок у основного користувача FMIS. Також були описані ключові пов'язані аспекти, такі як сільськогосподарські сфери (поля, теплиці, сади, ферми або система в цілому), технології моделювання (типи використовуваних діаграм), моделі реалізації FMIS.(як додаток або як платформа, вебсайт або настільний комп'ютер) та визначені зацікавлені сторони (від покупця та фермера до уряду та дослідницьких інститутів).

Були проаналізовані основні архітектури систем та сфери використання, впровадження та прибутковості, а також рішення ІСФМ для точного землеробства як найбільш інформаційномісткої області застосування. Цей огляд комерційних рішень включав аналіз 141 міжнародного програмного пакету, які були розділені на 11 функцій за допомогою кластерного аналізу. Академічні ІСФМ є

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш складними системами, що враховують застосування стандартів, автоматизований збір даних та сумісність між різними програмними пакетами. Комерційні програми ІСФМ орієнтовані на повсякденні офісні завдання фермерського господарства, пов'язані з бюджетуванням та фінансами (такі як ведення обліку, управління технікою та документація, з урахуванням нових тенденцій, що вимагають нових функцій, пов'язаних з відстеженням, забезпеченням якості та продажами).

Системи прийняття рішень для сільського господарства включають збір даних, обробку даних, методи оптимізації для прийняття рішень. Процес побудови системи прийняття рішень розглянуто на прикладі розробки системи поливу рослин. У цій роботі наголошується на необхідності вищого рівня ІСФМ, яка використовує не лише дані від одного виробника, але й дані від інших місцевих, регіональних або національних виробників для аналізу даних та прийняття рішень. Труднощі у впровадженні такої інформаційної системи для постачальників сільськогосподарських послуг перелічені. Розроблено структуру інформаційної системи для розумного сільського господарства з використанням хмарних технологій. Об'єктно-комунікаційна модель для управління даними представлена у вигляді таблиць сутностей. Ця модель забезпечує обмін даними між виробничими системами, швидкий (контрольований) доступ третіх сторін та швидку інтеграцію аналітики та інструментів підтримки рішень. Процеси прийняття рішень впроваджені в усю схему, включаючи рішення щодо продукції, постачання на ринок, закупівлю ресурсів тощо.

Блокчейн у сільському господарстві

Централізовані системи доступу до даних Інтернету речей стикаються з проблемами системних збоїв з повною втратою доступу до даних, проблемами доступу до великих даних та проблемами безпеки. Блокчейн – це технологія, яка надає можливість робити публічні транзакції доступними для різних груп користувачів без необхідності офіційної третьої сторони для моніторингу транзакцій. За допомогою блокчейну можна створювати інтелектуальні системи, здатні перевіряти, захищати, моніторити та аналізувати сільськогосподарські дані [21].

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані дані свідчать про те, що технологія блокчейн, разом з передовими інформаційно-комунікаційними технологіями, а також Інтернетом речей, може покращити управління ланцюгом створення вартості сільськогосподарських продуктів харчування у чотирьох основних аспектах: відстежуваність, інформаційна безпека, виробництво та стале управління водними ресурсами [14]. Було визначено шість проблем у впровадженні передових технологій у сільськогосподарське виробництво, включаючи ємність для зберігання, масштабованість, витік конфіденційної інформації, високу вартість, регулювання, пропускну здатність та затримку передачі даних за умови браку кваліфікованого персоналу. Зазначається, що блокчейн – це перспективна технологія, яка забезпечує безпеку та конфіденційність даних.

Блокчейн – це децентралізований спосіб зберігання даних у вигляді ланцюга взаємопов'язаних блоків [19]. Блокчейн дозволяє записувати таку інформацію: транзакції між постачальником та фермером, а також інформацію, що стосується сільськогосподарських культур, матеріалів та хімічних продуктів; ферму, методи вирощування та управління, годівлю тварин та додаткову інформацію, таку як погодні умови, добробут тварин, хвороби та лікування; фабрику та обладнання, методи обробки, номери партій та фінансові операції з виробниками та дистриб'юторами; складське зберігання, умови зберігання (наприклад, температура та вологість), методи транспортування, час транзиту та всі фінансові операції між дистриб'юторами та роздрібними торговцями; інформацію про харчові продукти, таку як наявна кількість, якість, термін придатності, час, проведений на полицях або на складі. Інструменти блокчейну можуть підвищити прозорість, відстежуваність та стійкість у ланцюгах постачання продуктів харчування «від ферми до виделки». Це забезпечує безпечний та надійний доступ до високоякісних даних у хмарних та туманних обчисленнях [33].

Огляди публікацій про інтеграцію блокчейну та Інтернету речей для розумного сільського господарства розглянуті, щоб відповісти на такі два питання: як інтеграція блокчейну та Інтернету речей покращує збір даних, валідацію даних та управління даними; як Інтернет речей архітектура, інтегрована в

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

блокчейн, може покращити можливості та процес прийняття рішень у режимі реального часу учасниками сільськогосподарського ланцюжка створення вартості для перетворення традиційного або традиційного сільського господарства на розумну систему землеробства. Розглядається застосування технології блокчейн для сільського господарства на основі збору даних, перевірки даних, безпеки даних, зберігання даних та передачі/обміну даними через зовнішній інтерфейс програмного застосунку. Дані, які можуть бути включені в блокчейн, це екологічні (з використанням даних датчиків), виробничі дані (дані з ланцюжка створення вартості), адміністративні дані (фінансові, урядові), дані зовнішнього ланцюга поставок (торгівля, доставка). Запропоновано архітектуру блокчейну, інтегровану в Інтернет речей, яка складається з рівня презентації, бізнес-рівня, функціонального рівня, рівня інтеграції та рівня даних блокчейну (інтеграція інформаційних систем та баз даних на бізнес-рівні, обробка даних на функціональному рівні, зберігання та безпека даних на рівні даних блокчейну, відображення інформації через рівень презентації).

Архітектура мережі Інтернету речей, заснована на шаблонах проектування блокчейну, яка поєднує Інтернет речей, туманні обчислення, штучний інтелект (скорочено ШІ) та блокчейн у узгоджену модель. Блокчейн використовується не лише для зберігання та перевірки даних з різних пристроїв Інтернету речей, але й як монітор та верифікатор транзакцій для гетерогенних туманних та хмарних мереж. Дані маніпулюють на пристрої Інтернету речей і не потребують передачі назад у хмару комп'ютера. Було показано, що технологія блокчейн може зробити зв'язок Інтернету речей більш безпечним, прозорим та захищеним від несанкціонованого доступу в системах точного землеробства. Перевагами блокчейну над хмарою як сховища даних є децентралізація, захист від змін даних, стійкість до несанкціонованого поширення даних, прозорі транзакції, менш дорога інфраструктура та можливість периферійних/туманних обчислень на кінцевих точках Інтернету речей. Обговорюються основні функції та сильні сторони спільних блокчейн-платформ, що використовуються для управління різними підсекторами точного землеробства (такими як вирощування

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сільськогосподарських культур, випас худоби та ланцюги постачання продуктів харчування). Представлені питання безпеки та конфіденційності з відкритими проблемами блокчейну, які перешкоджають розвитку блокчейн-систем у точному землеробстві.

1.4 Висновок по розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи Інтернету речей в агротехніці. Проаналізовано принципи функціонування IoT та сенсорних систем у сільському господарстві, що забезпечують автоматизований збір і моніторинг даних. Досліджено процеси збору, передачі та відстеження інформації в IoT-системах, а також визначено роль сенсорів у контролі агропоказників. Окрему увагу приділено концепції розумного сільського господарства, класифікації IoT-рішень та використанню хмарних технологій для обробки й зберігання даних. Отримані результати формують теоретичну основу для подальшого дослідження програмних рішень інтеграції сенсорів у системи агротехніки.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ СЕНСОРІВ В ІoT-СИСТЕМАХ

2.1 Інформаційні системи та платформи для управління агротехнічними процесами

Інформаційні системи та платформи передачі даних з пристроїв Інтернету речей для управління фермерським господарством обговорюються на основі хмарних технологій. Загальні вимоги до розробки FMIS у сільському господарстві були описані. Була розроблена інформаційна система для управління фермерським господарством з використанням хмарних обчислень, великих даних та Інтернету речей. Ця розробка була виконана на платформі FIWARE з використанням FMIS, до якої додатково був розроблений інструмент фінансового аналізу для ферми [34]. Розроблений додаток був успішно протестований на посівах озимої пшениці протягом сезону. Були зафіксовані всі завдання, які фермер виконував протягом цього сезону, включаючи використання обладнання та ресурсів, таких як насіння, пестициди, добрива тощо. Крім того, були доступні всі фінансові операції, пов'язані зі збором врожаю (наприклад, закупівля палива та заробітна плата працівників). Для валідації фінансового аналізу, який виконується на основі стандартних значень, фермерів попросили надати власні оцінки типових витрат на кожне виконане завдання з точки зору обладнання та робочої сили. Додаток зосереджений на фінансовому аналізі ферми на основі всіх операцій ферми, а також на оцінці прибутковості. Була розрахована змінна вартість, яка безпосередньо відносилася до конкретного поля або культури, та постійна вартість, яка фіксувалася для ферми, а потім розподілялася між полями або культурами.

Розроблено масштабовану систему моніторингу на основі Інтернету речей з можливостями прогнозування для сільського господарства. Запропонована система Інтернету речей була розроблена та експериментально протестована шляхом моніторингу температура та вологість у комерційній теплиці для вирощування томатів у Мексиці протягом шести місяців. Було реалізовано прогнозне

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделювання мікроклімату теплиці на основі даних за допомогою штучної нейронної мережі. Отримані результати показали, що модель ШНМ може бути успішно використана для прогнозування температури на 24 години за допомогою простої тришарової ШНМ з 8 нейронів у прихованому шарі. Прогнози температури були точно виконані за 24 години наперед з похибкою 1°C. Отримані результати підтверджують, що запропонована структура Інтернету речей може полегшити для фермерів моніторинг своїх посівів та збільшити виробництво сільськогосподарських культур.

Представлено сільськогосподарську інформацію (тобто хмарну автономну інформаційну систему для сільського господарства), яка надає інформацію як послугу для управління різними типами даних Інтернету речей. Запропонована система є автономною, призначеною для різних галузей сільського господарства (рослини, тварини та обладнання, погодні параметри, ґрунт, наявність шкідників, продуктивність, потреба в удобренні та зрошенні), базується на хмарних обчисленнях та нечіткій логіці. Система підтримує QoS (якість обслуговування) та має графічний інтерфейс користувача. Також були розроблені веб-додаток та мобільний додаток. Продуктивність запропонованої системи в хмарному середовищі оцінювалася на основі інструментарію CloudSim, який показав покращення вартості, пропускної здатності мережі, часу виконання та затримки [35]. Система збирає інформацію від різних користувачів через попередньо налаштовані пристрої Інтернету речей (мобільні телефони, ноутбуки та iPad), сільськогосподарську інформацію було протестовано в індійському селі на задоволенні фермера.

Запропоновано систему для розумного сільського господарства IoT-Agro. Для виробників кави було розроблено веб-платформу. Ця платформа дозволяє відстежувати екологічні змінні кавової зони за ділянкою, фермою та регіоном; приймати власні рішення щодо управління посівами кавових дерев на основі реальних даних; та планувати передзбиральні заходи на основі оцінки виробництва кави на рік, уникаючи грошових втрат у виробництві. Цей IoT-Agro оцінює виробництво кави на основі даних про погоду та даних управління

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сільськогосподарськими культурами (добри́во, контро́ль та очи́щення) за допомогою моделей навчання. Додаток був протестований зацікавленими сторонами, від фермерів та операторів до дослідників. Зберігання кліматичних даних на рівні аналітики даних допомагає фермерам отримувати доступ до корисної інформації; виконувати технічні розрахунки щодо потреб у зрошенні та раннього попередження для прогнозування хвороб рослин; оцінювати врожайність своїх культур за допомогою моделей штучного інтелекту; планувати час збору врожаю з урахуванням зміни клімату. Фермери можуть коригувати плани управління сільськогосподарськими культурами: удобрення, живлення, посадки, зрошення. Зберігання даних на найвищому рівні дозволяє їм проводити регіональне планування для забезпечення економічної стабільності, просування ринків, коригування пропозиції та впливу на ціни на користь виробників.

Було запропоновано модель MooCare, розроблену для допомоги виробникам у керуванні щоденним поголів'ям великої рогатої худоби з метою підвищення продуктивності. Використовуючи пристрої Інтернету речей, MooCare автоматизує та персоналізує годівлю тварин. Модель дозволяє локальне розгортання на фермі або хмарному обчислювальному ресурсі, доступному з Інтернету. Ця модель містить такі функції: отримання даних про продуктивність корови (на основі ідентифікатора тварини та датчика доїння), прогнозування виробництва молока твариною (за допомогою моделі ARIMA для визначення прогнозованого значення), постачання концентрату індивідуально кожній корові залежно від її виробництва молока (регулюється виконавчим механізмом) та надсилання попереджувальних повідомлень виробнику з використанням порогових значень [36]. Оцінки включають моделювання на основі даних про лактацію корів з реальної ферми, розташованої в південному регіоні Бразилії. Результати обчислень показали, що модель може забезпечити адекватний прогноз виробництва молока, надійність прогнозу склала 94,3%.

Запропоновано гнучку платформу для безґрунтового вирощування в повністю рециркуляційних теплицях з використанням помірно солоної води. Цю систему було впроваджено в реальному прототипі в теплиці на південному сході

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Іспанії в рамках проекту ЄС Drain-Use. Було використано два цикли вирощування помідорів. Перший – для перевірки правильності архітектури, а другий – для аналізу покращень системи порівняно з урожаєм у відкритому ґрунті. Було отримано економію понад 30% на споживанні води та до 80% на поживних речовинах.

Запропоновано стратегію зрошення, засновану на зональному зрошенні, нечіткій логіці, бездротовому зв'язку та Інтернеті речей, для моніторингу зрошення та підтримки вологості ґрунту в ідеальних умовах ріст рослин при мінімальному споживанні води та енергії. Розроблену зональну систему зрошення було застосовано для зрошення рослин томатів у теплиці. Експеримент тривав вісім днів. Площа площею шість квадратних метрів, що розглядалася, була розділена на дві зони. У кожній зоні знаходився бездротовий блок із соленоїдним клапаном та датчиком вологості ґрунту, а також сенсорний блок для вимірювання температури навколишнього середовища. Raspberry Pi використовувався як сервер та хост НМІ. Система надсилає дані датчиків на сервер через радіочастотний зв'язок. Контролер з нечіткою логікою (скорочено FLC) обробляє ці дані та приймає рішення щодо керування зрошенням. Розроблена система може контролювати та керувати зрошенням теплиць з будь-якого місця та в будь-який час за допомогою інтерфейсу людина-людина (НМІ), розробленого як частина Node-RED від IBM. Експерименти показали, що поєднання контролера з нечіткою логікою зі стратегією зонування перевершує інші алгоритми з точки зору мінімізації споживання води та енергії.

Було розроблено систему Інтернету речей (IoT) з новим датчиком азоту, фосфору та калію (NPK) зі світлозалежним резистором та світлодіодами. Дані, зібрані розробленим датчиком NPK з вибраних сільськогосподарських полів, надсилаються до хмарної бази даних Google для підтримки швидкого пошуку даних. Для виявлення дефіциту поживних речовин на основі отриманих даних використовується нечітка логіка. Фермеру надсилається SMS-повідомлення з попередженням про кількість добрив, що потрібно використовувати, через регулярні проміжки часу. Було розроблено апаратний прототип датчика та програмне

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення Python для мікроконтролера Raspberry Pi-3. Цю модель було протестовано на трьох різних зразках ґрунту (червонозем, гірський ґрунт та пустельний ґрунт). Аналіз розробленого датчика NPK з точки зору пропускну́ї здатності, наскрізної затримки та тремтіння було проведено за допомогою симулятора Qualnet. Експерименти показали, що розроблена система IoT може підвищити врожайність сільськогосподарських культур.

Як правило, розроблена система має багаторівневу архітектуру (чотири рівні або три рівні). Три рівні в архітектурі IoT-Agro такі: сприйняття сільськогосподарських даних, периферія та аналітика даних. Рівень сприйняття сільськогосподарських даних складається з пристроїв з підтримкою IoT (датчики, виконавчі механізми, метеостанції, мітки та зчитувачі RFID), які контролюють погодні умови в режимі реального часу та стан продукції по всьому ланцюжку створення вартості (ви́рощування, збирання врожаю, післязбиральна обробка, сушіння та зберігання). Цей рівень надає дані компонентам аналізу на рівні аналітики даних. Периферійний рівень розташований близько до кінцевих точок для локальних обчислень та обробки даних у режимі реального часу, щоб зменшити навантаження на рівень аналітики даних та підвищити надійність сільськогосподарських даних IoT. Цей рівень включає взаємопов'язані периферійні пристрої, фізичні або віртуальні об'єкти (наприклад, маршрутизатори, комутатори, точки бездротового доступу, ретранслятори, вбудовані системи та сервери), географічно розподілені по фермах для збору всіх даних з рівня сприйняття сільськогосподарських даних. Рівень аналітики даних складається з центрів обробки даних та традиційних хмарних серверів з практично необмеженими обчислювальними та сховищними ресурсами. На цьому рівні розгортаються сервіси IoT-Agro на основі аналізу даних. Програмна платформа з відкритим кодом, складається з локального, периферійного та хмарного рівнів. На локальному рівні кіберфізичні системи взаємодіють з пристроями для ви́рощування сільськогосподарських культур для збору та моніторингу даних у режимі реального часу. Периферійний рівень платформи відповідає за моніторинг та управління основними завданнями точного землеробства на периферії мережі для підвищення надійності системи у

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

разі збоїв доступу до мережі. Хмарна платформа збирає поточні та минулі записи та розміщує модулі аналізу даних за допомогою платформи FIWARE. Архітектура системи у вигляді модулів скорочує час проектування, конфігурації та обслуговування.

Представлено пропозицію щодо багаторівневої глобальної архітектури периферійних обчислень з модульним підходом для зменшення витрат на пропуску здатність між периферіями та хмарами. Еталонну архітектуру було протестовано шляхом створення платформи Інтернету речей (IoT) в інтелектуальному агропромисловому комплексі в громаді Кастилія і Леон для оптимізації управління сільськогосподарськими підприємствами. Результати тестування продемонстрували переваги розробленої архітектури в таких аспектах: аналіз даних у режимі реального часу на рівні локальних пристроїв та периферійних вузлів, а не в хмарі; зниження операційних та управлінських витрат за рахунок зменшення трафіку та передачі даних у хмару; краща продуктивність додатків завдяки нижчим рівням затримки на периферії мережі, ніж у хмарі. Вищий рівень безпеки та конфіденційності був досягнутий завдяки інтеграції технологій блокчейн у шари архітектури Інтернету речей та бізнес-рішень.

Великий обсяг даних, що надходять від датчиків Інтернету речей, вимагає високої швидкості обробки та прийняття рішень у режимі реального часу. Для хмарної обробки даних Інтернету речей у розумному сільському господарстві зазвичай використовуються архітектури Lambda або Карра. Однак вони не спеціалізовані для розумного землеробства. Представлено оптимізовану версію архітектури Карра з метою покращення управління пам'яттю та швидкості обробки даних для швидкого та ефективного управління даними Інтернету речей у сільському господарстві. Параметри запропонованої архітектури Карра були налаштовані для обробки даних аналізу поведінки тварин у точному тваринництві. Було показано, що поєднання обчислювальної системи Apache Samza з базою даних Apache Druid забезпечує вищу продуктивність. Результати цього дослідження показали вплив налаштування параметрів на швидкість обробки.

Розроблено загальний архітектурний фреймворк для моделювання

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

агропродовольчих систем на основі Інтернету речей, що поєднує технічні та бізнес-аспекти. Описано застосування запропонованого фреймворку до 19 випадків використання в різних регіонах Європи; продемонстровано його ефективність для моделювання архітектур на основі Інтернету речей у широкому діапазоні різних сільськогосподарських районів. Експериментальні розробки щодо використання різних протоколів зв'язку для передачі даних від датчиків до мережі в системах Інтернету речей для різних сільськогосподарських застосувань [37]. Представлено адаптивний мережевий механізм для системи розумного господарства з використанням протоколів LoRaWAN та IEEE 802.Нас . Система має можливість налаштування протоколу залежно від стану мережі. Наприклад, IEEE 802.Нас підходив для передачі даних, що потребують високих швидкостей, таких як зображення або відео. На противагу цьому, протокол LoRaWAN підходив для надсилання даних, що містять невеликі пакети даних, такі як дані зчитування датчиків. Адаптивний механізм, що поєднує переваги обох протоколів, забезпечує надійність системи під час виконання завдання моніторингу. Запропонований механізм був реалізований на рівні програми та протестований шляхом збору даних у теплиці. Отриманий результат показав, що запропонована система покращує продуктивність мережі та забезпечує надійність з точки зору середньої затримки та загальної кількості зібраних даних датчиків.

Розроблено та впроваджено гнучке програмне забезпечення проміжного шару безпеки Інтернету речей, яке можна використовувати в наскрізному хмарному та туманному зв'язку, від інтелектуальних пристроїв на межі мережі до хмарних додатків. Було вирішено завдання проміжного шару для протоколів зв'язку між двома різними сегментами мережі (від хмари до шлюзу та від шлюзу до межі), що забезпечує високий рівень безпеки. Розроблене програмне забезпечення здатне справлятися з переривчастим мережевим з'єднанням, а також з обмеженнями пристроїв щодо обчислювальної потужності, пам'яті, енергії та пропускної здатності мережі. Для забезпечення безпеки у разі переривання зв'язку було розроблено алгоритм "відновлення сеансу". Якщо нещодавно відключений пристрій хоче відновити попереднє перерване з'єднання, можна повторно

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати зашифровані сеанси з недавнього минулого. Було описано алгоритм "вибір оптимальної схеми" для вибору найкращого варіанту наскрізної схеми безпеки, придатної для захисту додатку на основі Інтернету речей, залежно від вимог користувача та обмежень ресурсів на межі мережі. У проведеному експерименті було використано прототипи клієнта та сервера. Сервер розміщено в основній хмарі та шлюзі та прослуховує запити клієнтів від шлюзу та вузлів Інтернету речей. Клієнтська частина системи надає інтерактивний інтерфейс, в якому можна вибрати один з п'яти різних рівнів безпеки. Результати експерименту показали, що впроваджене проміжне програмне забезпечення забезпечує швидку та ресурсозалежну безпеку завдяки використанню статичних попередньо розподілених ключів для різних вимог IoT-застосунків, досягаючи компромісу між вищим рівнем безпеки та швидшою передачею даних.

Використання туманних обчислень у системах Інтернету речей

Системи управління на основі хмарних обчислень чутливі до стабільності інтернет-з'єднання. Зі збільшенням обсягу даних, що генеруються пристроями Інтернету речей, обмеження доступності Інтернету та пропускної здатності впливають на роботу хмарних додатків. Інтелектуальні сільськогосподарські додатки, які аналізують та керують сільськогосподарською врожайністю за допомогою систем Інтернету речей, можуть страждати від перебоїв через відключення від хмарних сервісів, які зазвичай трапляються в сільській місцевості. Використання туманних обчислень дозволяє системі Інтернету речей швидше обробляти дані та справлятися з переривчастим підключенням. Переміщення обчислень до туманних вузлів, розташованих на краю комп'ютерної мережі, підвищує доступність та зменшує затримку обробки даних. Запропоновано архітектуру управління як послуга (management-as-a-service), що базується на туманних обчисленнях, для динамічної обробки подій Інтернету речей. Запропонована архітектура базується на парадигмі туманних обчислень для задоволення вимог до доступності та продуктивності. Вона складається з механізму правил та процесора складних подій. Механізм правил дозволяє визначати динамічні правила управління в хмарі. Контролер - це процесор складних подій на основі туману, який

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує масштабований та надійний зв'язок, глобальне та адаптивне керування. Запропоноване рішення може бути використане в середовищах, де немає доступу до Інтернету. Можливості запропонованої архітектури демонструються на прикладах, зокрема, для "розумного" сільського господарства розглядалася система керування опаленням та вентиляцією в теплиці. Було показано, що вартість інфраструктури при застосуванні запропонованої архітектури становить приблизно половину вартості хмарно-орієнтованої системи. Крім того, використання протоколу зв'язку MQTT дозволяє використовувати на практиці різні типи пристроїв.

Туман повинен надсилати велику кількість даних до хмари, і це може переважити канал невикористаним трафіком даних. Пропонується підхід до зменшення обсягу даних, які туман зберігає та передає до хмари, шляхом фільтрації даних туману. Проведений експеримент використовує два набори даних з реального світу в контексті розумного сільського господарства, де перший містить значення температури та вологості, а другий - вологість ґрунту та температурні умови. В результаті експерименту було виявлено, що при максимальному зменшенні даних туману потрібно зберігати та передавати до хмари лише 3%-6% вихідних даних, згенерованих датчиками. Пропонується комбінація хмарних та туманних обчислень, при якій базові обчислення та прийняття рішень на основі даних датчиків виконуються на пристроях на межі комп'ютерної мережі, а результати аналізу потім передаються до хмари. Це дозволяє досягти збільшення швидкості обчислень та зниження вартості передачі даних. Розроблено архітектуру сервісної платформи Інтернету речей та змодельовано запропоновану платформу для поливу та удобрення рослин на основі аналізу даних зображень листя. Використовувалися датчики температури, вологості та рН ґрунту, а також камери для зйомки зображень стану листя на базі Raspberry Pi. Для зв'язку між пристроями використовувався протокол MQTT, а потім дані передавались до вузла туману через протокол Wi-Fi. У разі виявлення пошкоджень система, враховуючи дані про температуру та вологість, приймає рішення про запуск механізму автоматичного подачі води та поживних речовин.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система управління зрошенням полів отримує дані про вологість ґрунту від датчиків, встановлених у кількох точках посівного поля. Можуть виникнути проблеми з підключенням або відмова датчиків, що призводить до збоїв у передачі даних. Представлена інтелектуальна система зрошення з використанням туманних обчислень та глибоких нейронних мереж. Методи глибокого навчання можуть прогнозувати дані про вологість ґрунту, використовуючи дані про погоду, врожайність та зрошення. Було запропоновано різні архітектури глибоких нейронних мереж для побудови моделей та прогнозування вологості ґрунту. Було проведено два обчислювальні експерименти для розрахунку прогнозів зрошення з використанням експериментальних даних [38]. Були використані дані про вологість ґрунту з датчиків та дані про погоду з громадської метеостанції. Результати обчислень показали, що прогнозні моделі були досить ефективними та сприяють економії зрошувальної води.

Обговорювалися такі дві проблеми: (i) застосування туманних обчислень в управлінні ланцюгами поставок швидкопсувних продуктів з використанням ожини; та (ii) вимоги до даних, обчислень та зберігання для туманних вузлів на кожному етапі ланцюга поставок. Обговорювалися переваги впровадження туманних обчислень для моніторингу та контролю під час транспортування ожини від виробника, до продавця. Запропоновано трирівневу модель. Рівень 1 - це датчики (температури, вологості, вуглекислого газу та яскравості) у вантажівці та RFID-мітки на кожній коробці з ягодами. Рівень 2 - це туманні обчислення, де розумні зчитувачі з мікроконтролерами діють як мобільні туманні вузли. Вантажівка також є туманним вузлом, включаючи RFID-мітки, розумні зчитувачі, бортовий блок підтримки рішень (скорочено ODSU) та блок сповіщення про події. ODSU отримує відфільтровані показники датчиків від розумного зчитувача та зіставляє їх зі стандартним профілем температури та вологості продукту. Якщо значення параметрів перевищують максимально можливі значення або падають нижче мінімальних порогових рівнів температури та вологості, ODSU спрацьовує сигналізацію або виконує автоматичне коригування. Блок сповіщення про події – це спрацьовує ODSU після вжиття коригувальних дій у разі порушення

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порогового значення та надсилає сповіщення у вигляді повідомлень та електронних листів водієві та менеджеру. Рівень 3 – це хмарні обчислення, де передача даних у хмару здійснюється за допомогою GPRS або мережі стільникового зв'язку, коли вантажівка знаходиться в зоні доступу. Якщо дані, завантажені мобільним блоком протитуманного випромінювання, включають історію показників датчиків, що перевищують поріг, то термін придатності коробок (палет) та кількість палет закінчилися [39]. На третьому рівні зберігається та аналізується історія операцій ланцюга поставок, а також виконуються такі розрахунки, як визначення кількості продукції, що підлягає доставці до роздрібних магазинів (дистриб'юторських) центрів нижче за течією, та визначення оптимальних маршрутів на кожному рівні ланцюга поставок.

Інтеграція блокчейну в системи Інтернету речей

Використання Інтернету в IoT у сільському господарстві створює широкий спектр проблем, таких як безпека (наприклад, захист від кібератак), ризик конфіденційності даних (отруєння даних та атаки вилучення) тощо [23]. Інтеграція з блокчейном приносить такі покращення традиційній теплиці: доступність, масштабованість, збільшення пропускної здатності, конфіденційність та позала-нцюжкове зберігання даних. Представлено підхід до оптимізації тепличної системи за допомогою блокчейну. Розроблено концептуальну архітектуру оптимального мікроклімату в теплиці. Запропонована система складається з трьох шарів: шару блокчейну, шару IoT та шару теплиці. Шар IoT надає інформацію з різних датчиків (температури, вологості та вуглекислого газу (CO₂)) у теплиці. Шар блокчейну базується на прогнозуванні, оптимізації та управлінні на основі смарт-контрактів. Оптимальний смарт-контракт обробляє отримані дані у три етапи. На першому етапі фільтр Калмана використовується для оцінки наступного значення з використанням історичних даних теплиць. Модуль прогнозування на основі фільтра Калмана допомагає точно налаштувати та скоригувати середовище, перш ніж воно стане шкідливим для рослин. На другому етапі прогнозовані дані передаються до модуля оптимізації, де розраховуються оптимальні параметри на основі певних умов та системних обмежень, таких як

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужність. На третьому кроці оптимальні налаштування для покращення продуктивності використовуються для регулювання та керування виконавчими механізмами в теплиці за допомогою каскадного нечіткого контролера як алгоритму керування. Все це забезпечує кращий ріст рослин на основі оптимального налаштування теплиці та використання ресурсів. Виконавчими механізмами є генератор CO₂, природний вентиляційний отвір, примусовий вентиляційний отвір, система туманоутворення, обігрівач, чилер, вентилятор циркуляції повітря та осушувач повітря. Фермер може взаємодіяти з тепличною системою через веб-додаток, розроблений на основі запропонованої архітектури. Для оцінки продуктивності тепличної системи було розроблено та впроваджено емулятор теплиці. Збираються дані датчиків теплиці, а потім інтерфейс теплиці обробляє їх для керування виконавчим механізмом та зберігає дані в мережі блокчейн. Отримані результати показують, що запропонований підхід до оптимізації призводить до збільшення врожайності та зменшення споживання енергії.

Пропонується безпечна інфраструктура збереження конфіденційності (SP2F) для інтелектуальних сільськогосподарських БПЛА. Запропонована структура SP2F має два основні механізми: дворівневий механізм конфіденційності (для автентифікації даних та пом'якшення атак отруєння даних) та механізм виявлення аномалій на основі глибокого навчання. Експерименти проводилися на двох публічних наборах даних на основі Інтернету речей, а саме: ToN-IoT та IoT Botnet, для двох сценаріїв: до застосування (з оригінальними наборами даних) та після застосування (з трансформованими наборами даних) дворівневої конфіденційності [40]. Було отримано, що запропонована конструкція SP2F проста у впровадженні та розгортанні, і може ефективно виявляти більшість атак у складній та гетерогенній мережі інтелектуальних сільськогосподарських БПЛА. Запропонований підхід значно покращив загальну продуктивність запропонованої платформи SP2F. Включення мережевого сховища на основі блокчейну та зовнішнього сховища на основі IPFS в інфраструктуру туману та хмари забезпечує перевіреність, відстежуваність та масштабованість по всій комп'ютерній мережі.

2.2 Методи інтеграції та обробки даних сенсорів у IoT-системах

Після огляду кількох моделей життєвого циклу даних, що використовуються в науковій бібліографії, було визнано, що модель життєвого циклу даних Геологічної служби є найбільш придатною для використання в якості основи для розробки нашого підходу до категоризації. Ця модель була створена для забезпечення належного опису, зберігання, доступу та повторного використання дослідницьких проектів та продуктів даних. Вона складається з первинних та наскрізних елементів. Первинні елементи такі:

1. **План:** Цей елемент стосується оцінювання, вирішення та документування всіх інших елементів моделі.
2. **Отримання:** Другий елемент включає збір, генерацію та оцінку даних для повторного використання.
3. **Процес:** Цей елемент охоплює дії з підготовки наборів даних (наприклад, шляхом вилучення, перетворення та завантаження) для їх подальшого аналізу та/або інтеграції.
4. **Аналіз:** Четвертий елемент обертається навколо дослідження, інтерпретації та перетворення для вилучення знань та/або нових даних.
5. **Збереження:** Цей елемент представляє дії для зберігання даних та забезпечення їх доступу та використання в майбутньому.
6. **Публікація/Поширення:** Шостий елемент включає діяльність з розповсюдження та обміну інформацією.

Наскрізні елементи мають життєво важливе значення, оскільки вони стосуються певних дій, які необхідно виконувати для всіх основних елементів на постійній основі. Ці елементи:

1. **Опис:** Цей елемент підкреслює важливість метаданих, що базуються на стандартах, а також достатньої документації для всіх етапів життєвого циклу. Це призводить до меншої кількості помилок та полегшує поточне та майбутнє використання даних.
2. **Управління якістю:** Другий наскрізний елемент стосується заходів

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення якості та контролю якості для всіх етапів життєвого циклу.

3. Резервне копіювання та безпека: Третій наскрізний елемент підкреслює важливість *запобігання* фізичним втратам даних та сприяє безпечним методам управління даними.

Ще одна популярна модель життєвого циклу даних була розроблена. Ця модель пропонує загальний та високоадаптивний підхід, який можна використовувати для різних цілей (наприклад, як навчальне рішення для творців даних, для розміщення та організації ресурсів, для управління ризиками цифрових активів). Ця модель складається з: повних дій життєвого циклу (опис) та представлення інформації, планування збереження, спостереження та участь громади, курування та збереження), послідовні дії (концептуалізація, використання та отримання, оцінка та вибір/захоплення, збереження, документування, доступ, використання та повторне використання, трансформація) та епізодичні дії (утилізація, переоцінка та міграція). Модель життєвого циклу даних, пропонує цікавий підхід, що в основному зосереджений на управлінні дельтами в розумних містах. Ця модель охоплює вісім етапів життєвого циклу: виявлення, захоплення, курування (зберігання), публікацію, витік, використання та візуалізацію. Так звана комплексна сценарно-агностична модель життєвого циклу даних, яка може бути використана в багатьох різних наукових галузях, підкреслює важливість якості даних на всіх етапах життєвого циклу та має на меті вирішити кілька проблем, пов'язаних з даними. Вона має три основні стовпи: (1) збір даних (включаючи збір/фільтрацію/якість/опис дельта-порівнянь), (2) обробка даних (охоплюючи збір/якість/аналіз даних) та (3) збереження даних (включаючи класифікацію/якість/розповсюдження/поширення даних). Кілька інших моделей життєвого циклу даних можна знайти в науковій бібліографії. Однак подальший аналіз таких моделей виходить за рамки цієї роботи.

Запропонована модель життєвого циклу даних

Модель життєвого циклу даних, розроблена та прийнята в контексті цієї роботи, зображена на рисунку 2.1.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

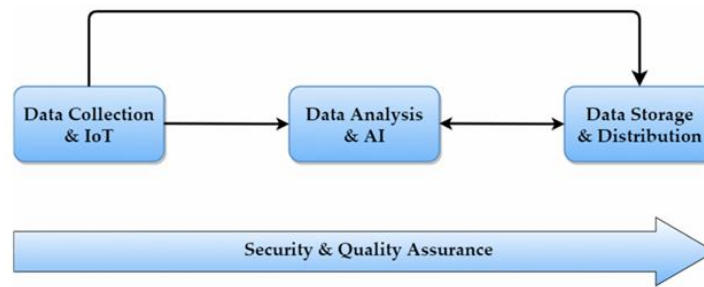


Рисунок 2.1 - Пропонована модель життєвого циклу даних.

Базуючись на етапах дельта-життєвого циклу моделі Геологічної служби, наша модель має три складові елементи:

1. Збір даних та Інтернет речей (IoT): Найважливіший елемент відповідає за прямий чи опосередкований збір існуючих даних та/або генерацію нових даних. Крім того, він охоплює управління джерелами (наприклад, даними з датчиків, баз даних, історичними даними) для збору даних. Цей елемент також підкреслює життєво важливе значення технологій IoT у зборі даних та в цілому. Термін «Інтернет речей» стосується взаємопов'язаних комп'ютерів та повсякденних предметів, які можуть передавати та отримувати дані через мережу та часто включають повсюдний інтелект [16].

2. Аналіз даних та штучний інтелект (ШІ): другий елемент включає обробку даних з різних джерел, а також вилучення цінних знань та створення доданої цінності з даних. Він також стосується перетворення необроблених даних у більш складну форму для полегшення подальшого аналізу та/або інтеграції. ШІ відіграє центральну роль у цьому елементі та охоплює низку різних методів (наприклад, комп'ютерний зір, нечітка логіка, еволюційні алгоритми, машинне навчання; семантична обробка).

3. Зберігання та розповсюдження даних: Третій елемент стосується необхідних процесів та/або ресурсів для постійного або тимчасового зберігання наборів даних, а також для надання кінцевим користувачам відкритого або обмеженого доступу.

Забезпечення якості, конфіденційності та безпеки на всіх етапах життєвого циклу даних є головними пріоритетами для особистого асистування. Тому

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в запропоновану нами модель включено наскрізний елемент під назвою «Безпека та забезпечення якості». Ми дотримувалися порівняльного підходу до моделі, який можна легко адаптувати до потреб академічних користувачів з різних наукових галузей, а також різних інших зацікавлених сторін. Такий компактний підхід пропонує сумісність та легке зіставлення з основними існуючими моделями життєвого циклу даних, водночас пропонуючи кращу генерацію/розмірність порівняно з більш точно налаштованими підходами.

Метод категоризації

Для класифікації аналізованих рішень, ми розробили двосторонній підхід, заснований на моделі життєвого циклу даних, представлений вище, а також на технологічній категоризації рішень (визначено 38 технологічних підкатегорій). Категоризацію було проведено відповідно до основної(их) точки(ок) фокусу кожного рішення. Оскільки багато рішень охоплюють різні технології та/або етапи життєвого циклу даних, знаходження рішення в одній категорії не виключає можливості використання та/або сприяння цим рішенням технологій з інших категорій.

2.3 Інформаційно-комунікаційні технології у системах точного землеробства

Різні технології збору даних та Інтернету речей (наприклад, бездротові сенсорні мережі (WSN), геоінформаційні системи (ГІС), супутниковий зв'язок) були використані в кількох рішеннях, проаналізованих для цілей цієї роботи. Термін ГІС стосується комп'ютерних систем для зберігання, аналізу, відображення та управління геопросторовими даними [17].

Супутниковий зв'язок

Використання приймачів, встановлених на польовому обладнанні, для отримання геопросторової інформації в режимі реального часу, відіграє каталітичну роль у фізичному плануванні. Стомбо підкреслює важливість глобальних навігаційних супутникових систем у польовому відборі проб та навігації

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортних засобів, а також в оптимізації використання добрив та пестицидів. Він також наголошує на перевагах у точності та складності систем порівняно зі старими технологіями позиціонування, що використовуються в сільському господарстві [18]. Згадується кілька штучних супутників (наприклад, американські супутники Landsat, європейську супутникову систему Sentinel 2, систему GooEyed, WorldView), які надають багатогранну/петральну інформацію про зображення. Ці штучні супутники можуть бути дуже корисними (наприклад, надаючи інформацію про ґрунт та воду за допомогою нормалізованих різницевого індексів рослинності (NDVI)) [19]. NDVI - це індекс рослинності, який використовує видимий та ближній спектри для виявлення живої рослинності. Його можна використовувати з різних причин (наприклад, для оцінки наслідків лісових/земельних пожеж та повеней, прогнозування погіршення стану земель, виявлення випадків посухи) [20].

Інтернет речей та бездротові сенсорні мережі

Рішення, засновані на технологіях Інтернету речей (IoT) та бездротових сенсорних мережах (WSN), можуть бути корисними. Пропонується рішення для оптимізованого зрошення, яке використовує різні датчики (включаючи зонди вологості ґрунту, датчики температури ґрунту, датчики температури навколишнього середовища, датчики вологості, датчики CO₂ та світлозалежний опір) для отримання вимірювань у режимі реального часу. На основі цих вимірювань досягається точне керування водопровідним клапаном за допомогою прогнозування потреб у ґрунтовій воді на основі нейронної мережі [21]. Пропонується недорогу мережеву платформу на базі IoT для датчиків та виконавчих механізмів. Ця платформа інтегрує протоколи міжмашинного зв'язку (M2M) та людсько-машинне інтерфейсу (HMI). Технології периферійних обчислень, засновані на вищезгаданому багатопrotocolному підході, також використовуються для розробки процесів керування кількома сценаріями РА. Експериментальні результати щодо цієї платформи показали кілька переваг. Пропонується хмарне рішення на основі Інтернету речей (додаткову інформацію про хмарні обчислення можна знайти в наступному підрозділі) для профілактики захворювань у

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пенсильванії. У цьому рішенні набори датчиків температури та вологості надсилають свої вимірювання на хмарну платформу через шлюз. Ці вимірювання зберігаються та аналізуються на хмарній платформі, а система підтримки рішень повідомляє фермера через службу коротких повідомлень (SMS) про перший напад хвороби рослин. Деякі з переваг цього рішення включають підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізацію впливу на навколишнє середовище шляхом оцінки точної кількості необхідних фунгіцидів [23]. Представлено автономний бездротовий датчик температури радіочастотної ідентифікації (RFID), що монтується на листку. Маючи вагу менше 3 граматик, цей датчик можна встановити на листку для вимірювання різниці температур між листком і повітрям. Це вимірювання використовується для моніторингу рівня водного стресу рослин. Потреби датчика в енергії покриваються гнучкою сонячною панеллю, а дальність бездротового зчитування становить приблизно 3 м. Польові випробування запропонованого датчика підтвердили його здатність розрізняти коливання рівня води в рослинах і, таким чином, його придатність для використання в фізкультурі.

Аналіз даних та штучний інтелект

Для цілей цієї роботи було розглянуто різні інструменти та технології аналізу даних, штучного інтелекту, що підтримують особисту асистенцію, включаючи аналітику великих даних, комп'ютерний зір, об'єднання/реконструкцію даних, рекомендаційні системи, еволюційні алгоритми, нечітку логіку, методи грамуляції/інтерполяції, машинне навчання, евристичні/декомпозиційні/шумоусувальні/зіставлення шаблонів алгоритми, семантичну обробку, прогнозні моделі, інструменти моделювання/візуалізації та інші.

Аналіз даних для визначення зон управління

Як згадувалося у вступі, здатність визначати просторову та часову мінливість сільськогосподарських культур має першорядне значення для фермерського господарства. У цьому напрямку приймаються зони управління для визначення субрегіонів у певній галузі, які характеризуються подібними ґрунтовими, ландшафтними та обмежувальними факторами врожайності [25]. У цих

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

субрегіонах фермери можуть застосовувати однорідні методи управління з точки зору зрошення, використання пестицидів та добрив, густоти посівів, обробітку ґрунту, відбору проб ґрунту тощо. Використання зон управління призводить до підвищення ефективності та прибутковості, а також підтримує екологічну стійкість.

Геостатистичні та кластерні моделі, методи інтерполяції та ГІС особливо корисні для розрахунку зон управління. Буттафуоко та ін. підкреслюють внесок методів інтерполяції кригінгу в розрахунок правдоподібних зон управління для природоохоронної території. Ці геостатистичні методи допомагають подолати кілька труднощів у визначенні підпольових ділянок. Такі труднощі часто виникають через складну комбінацію факторів, які можуть впливати на ефективність певних вхідних даних (наприклад, удобрення, зрошення, використання пестицидів) [26]. Продемонстровано зважену багатовимірну просторову кластерну модель для визначення зон управління зрошенням. Конкретна модель базується на машинному навчанні та просторовій статистиці. Порівняння з іншими методами кластеризації показало значну перевагу цієї моделі щодо роздільності точок та їх просторового розподілу [27]. Проаналізовано рішення, в якому геостатистичні моделі на основі ГІС використовуються для прогнозного картографування властивостей ґрунту. Це рішення мало важливі переваги порівняно з існуючими трудомісткими, трудомісткими та дорогими методами аналізу ґрунту. Для семи властивостей ґрунту (загальний азот, рН ґрунту, органічний вуглець ґрунту, доступний фосфор, пісок, глина та ємність катіонного обміну) було використано шість методів геостатистичної інтерполяції, що значно покращило роздільну здатність ґрунтових карт, надаючи детальну інформацію. Результати також можуть бути використані дрібними фермерськими господарствами для збільшення виробництва та зменшення потреб у зрошенні [28].

Моделі підземних вод також мають велике значення для ПА, оскільки вони моделюють та прогнозують умови водоносного горизонту, використовуючи різні гідравлічні параметри та вхідні набори даних. Метаевристичні алгоритми використовуються для визначення оптимальних та близьких до оптимальних

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів у моделях підземних вод. Порівняно два метаевристичні алгоритми, тобто оптимізацію рою частинок та пошук за шаблоном. Результати цього порівняння показали, що останній підхід пропонує більш точне та ефективне калібрування параметрів водоносного горизонту.

Прогнозні моделі та підтримка рішень

Рішення щодо управління фермерським господарством можуть мати значний екологічний, економічний та екологічний вплив. Тому технології прогнозування та підтримки рішень особливо корисні для фермерського господарства. Технології та інструменти, які можуть підтримувати прийняття рішень, включають: аналітику великих даних, машинне навчання (що охоплює глибоке навчання, нейронні мережі та методи опорних векторів (SVM) серед інших технологій), прогнозні моделі, супутникові знімки, датчики, що вимірюють різні дані, методи грануляції, Інтернет речей тощо. Термін «великі дані» описує великі, складні та постійно зростаючі набори даних з різноманітних, а іноді й автономних джерел. Кілька визначень посилаються на різноманітність, швидкість та обсяг даних (також відомі як «3V») як складові частини великих даних. Подібна модель «4V» доповнює модель «3V», де четвертою «V» є достовірність даних, тоді як модель «5V» також використовує значення даних як п'яту «V» [30]. Машинне навчання стосується інструментів та методологій, спрямованих на те, щоб дозволити обчислювальним програмам змінювати та/або адаптувати свої дії, щоб вони стали точнішими та ближчими до бажаного результату [31].

Продемонстровано модель прогнозування кількості опадів з використанням аналітики великих даних та нейронних мереж. Ґрунтуючись на результатах дослідження, автори наголошують, що ця конкретна модель має потенціал для покращення точності прогнозування, а також для полегшення прийняття рішень фермерами щодо структури посівів та управління водними ресурсами [32]. Запропоновано новий предиктор для великих даних у кіберфізичних системах (КФС) ПА. КФС можна визначити як систему, що інтегрує обчислення з фізичними процесами. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та безпілотні наземні транспортні засоби (БНТ) – два популярних приклади КФС [33]. Використовуючи

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методи грануляції, генетичні алгоритми та SVM, це рішення вирішує проблему зниження ефективності подібних предикторів при обробці великомасштабних даних. Запропонований предиктор може полегшити прийняття рішень з питань управління та/або посадки. Тестування рішення показало задовільну ефективність обчислень та точність прогнозування. Продemonстровано новий метод прогнозування, який можна використовувати для прогнозування врожайності сільськогосподарських культур шляхом інтеграції агрокліматичних та дистанційно зондованих показників. Інтеграція проводиться в рамках ймовірнісної байєсівської моделі, що включає дані та структурну невизначеність моделі. Конкретний метод використовує методи машинного навчання випадкових лісів та дерев, а також моделювання Монте-Карло за допомогою ланцюгів Маркова. Запропонована методика пропонує точний, статистично надійний та гнучкий інструмент для прогнозування врожайності в регіональному масштабі [35]. Пропонується платформу, яка може бути використана для прогнозування майбутніх погодних умов на основі великих даних з метеостанцій. Були використані методи нейронних мереж, а також розроблена методика декомпозиції на основі часових рядів. Прогнозовані результати можуть бути використані для оцінки ефективності прогнозування метеостанцій, а також для запобігання втратам врожайності, спричиненим екстремальними погодними явищами [36]. Продemonстровано модель прогнозування врожайності та білка, яка використовує методи глибоких нейронних мереж. Ця модель може бути використана для оптимізованого внесення добрив, що може збільшити прибутки та зменшити вплив на навколишнє середовище. Було виявлено, що запропонована методологія на основі глибокого навчання пропонує підвищену точність порівняно з іншими методами, що використовуються для прогнозування білка та врожайності (наприклад, множинна регресія, неглибокі мережі прямого зв'язку) [37].

Системи управління ризиками тісно взаємопов'язані із системами підтримки рішень і головним чином стосуються процесів, які виявляють існуючі ризики та планують дії для їх пом'якшення [38]. Запропоновано систему управління ризиками на основі Інтернету речей для сонячних теплиць. Це рішення включає

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прогнозування стихійних лих (наприклад, туман, серпанок та низькі температури) та використовує індикатори раннього попередження, включаючи низьку температуру, розріджене сонячне світло та хвороби, спричинені несприятливими умовами навколишнього середовища. Конкретна система має на меті забезпечити основу для аналізу взаємозв'язків між динамікою пошкодження овочів та метеорологічними подіями. Крім того, вона також може підтримувати прийняття рішень та заохочувати фермерів використовувати системи контролю середовища в теплицях, тим самим покращуючи якість своєї продукції [39]. Проаналізовано, як обробка великих геопросторових даних може відігравати ключову роль у фазах запобігання та пом'якшення ризику стихійних лих у сільськогосподарському секторі. Зокрема, дані телеметрії сільськогосподарської техніки, дані агрометеорологічних спостережень з бездротових сенсорних мереж, а також дані про просторову мінливість та стан врожаю з супутникових знімків виявилися особливо корисними не лише для основних цілей приватного управління, але й для зниження ризику стихійних лих [40].

Комп'ютерний зір

Комп'ютерний зір є основним складовим елементом багатьох ІКТ-рішень для особистого свідомого спілкування. Основна ідея комп'ютерного зору полягає в тому, щоб дозволити комп'ютерам розуміти різноманітні середовища на основі візуальної інформації. Отримання зображень та обробка/аналіз зображень є основними компонентами систем комп'ютерного зору. Отримання зображень стосується пристроїв, які перетворюють електронні сигнали від датчика на числові представлення. Обробка та аналіз зображень зосереджені на маніпулюванні зображеннями або відео та вилученні з них корисних знань.

Після пересадки рису кількість та густота рослин рису є ключовими факторами для вимірювання врожайності та якості зерен рису. Запропоновано метод обробки зображень, заснований на морфологічних операціях, для автоматичного визначення кількості рослин рису. Для цього аналізуються зображення, зібрані БПЛА за допомогою супутникової навігації. Результати дослідження показали високу ефективність запропонованого методу обробки зображень.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізовано, як використання згорткових нейронних мереж та генетичних алгоритмів в обробці супутникових зображень може полегшити особисту асистентську обробку. Результати їхнього дослідження показали, що ці технології є корисними для максимізації економічного фактора, а також для мінімізації викидів CO₂ та деградації земель. Проаналізовано метод комп'ютерного зору для виявлення плодів, який може бути використаний роботами для збору врожаю. Метод базується на технологіях згорткової нейронної мережі маскової області (mask RCNN). Специфічний підхід дозволив точно класифікувати плоди (стигли чи нестигли), позначити області обмежувальними рамками, а також вказати візуальне розташування точок збору плодів, аналізуючи форму та особливості країв зображень маски, які були згенеровані за допомогою цього методу. Вимірювання вмісту вологи на поверхні ґрунту є життєво важливим для оцінки взаємодії ґрунт-рослина-вода, вивчення зміни клімату, а також для обмеження водного бюджету. Запропоновано новий підхід до оцінки вмісту вологи в ґрунті на основі багатоспектральних супутникових знімків. Запропонований індекс вологості використовує дані цифрового підрахунку (DC) необроблених зображень у тепловому інфрачервоному, червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах. Продемонстровано середовище великих даних для аналізу ґрунту на основі зображень комп'ютерної томографії (КТ), що може сприяти кращому розумінню проблем сільськогосподарських угідь, а також підвищенню продуктивності та стійкості сільськогосподарських культур. У запропонованому рішенні також використовуються алгоритми 3D-реконструкції та статистичного аналізу. Модель на основі глибокого навчання для виявлення бур'янів, яка використовує зображення, отримані БПЛА. Ця модель використовує згорткові нейронні мережі з неконтрольованими навчальними наборами даних. Запропоноване рішення виявилось гнучким і забезпечувало аналогічні результати з іншими методами, що використовують контрольовані набори даних, не залежаючи при цьому від трудомісткого завдання створення великих сільськогосподарських навчальних наборів даних з анотаціями на піксельному рівні експертами.

Методи об'єднання даних та оцінки/бенчмаркінгу часто використовую -

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ться в технологіях, пов'язаних з комп'ютерним зором, для фізики та акупунктури. Термін "об'єднання даних" стосується об'єднання двох або більше зображень одного й того ж об'єкта в одне, чітке та узгоджене представлення. Представляють нову методологію об'єднання даних, яку можна використовувати для опису мінливості стану пологів. Ця методологія використовує інформацію з кількох джерел, включаючи: 2D мультиспектральні зображення з БПЛА, 3D моделі хмар точок сільськогосподарських культур та теплові зображення з БПЛА. Було виявлено, що запропонована методологія має вищу дискримінантну здатність, ніж методології, що використовують одне джерело даних. Запропоновано модель для швидкого прогнозування класів ґрунту на основі алгоритму об'єднання даних аналізу зовнішнього продукту. Були об'єднані дані з видимих ближніх інфрачервоних та середніх інфрачервоних спектрів. Ці дані використовувалися разом з іншою інформацією про ґрунт (колір, рН, органічна речовина, текстура) для класифікації ґрунту на основі моделі опорних векторів. Було виявлено, що запропонована модель об'єднання даних пропонує покращені результати класифікації ґрунту порівняно з результатами, отриманими з використанням одного джерела даних.

Представлено набір даних для класифікації та виявлення видів сільськогосподарських культур. Цей набір даних може слугувати еталоном даних для побудови моделей класифікації та виявлення на основі методів глибокого навчання. Вищезгадані моделі можуть використовуватися сільськогосподарськими роботами для більш ефективної ідентифікації та класифікації сільськогосподарських культур. Було виявлено, що цей набір даних забезпечує підвищену точність порівняно з іншими існуючими наборами даних. Демонструють еталонний набір даних, який може бути використаний для оцінки завдань машинного зору в асистентському апараті. Запропоновані показники оцінки можуть бути використані для кількох завдань сегментації та специфікації, що охоплюють розрізнення культур/бур'янів, фенотипування однієї рослини тощо. Головною метою цього набору даних є спрощення та вдосконалення складних процедур, що використовуються в асистентському апараті.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи візуалізації

Методи візуалізації часто використовуються разом із технологіями комп'ютерного зору. Візуалізація даних полягає у представленні великих обсягів даних для покращення обізнаності про ситуацію. Доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR) – це дві технології, які сьогодні набувають дедалі більшої популярності. Обидві вони використовують методи візуалізації даних. AR охоплює поєднання фізичних та віртуальних об'єктів (наприклад, на екрані комп'ютера або смартфона). VR означає занурення користувача в повний тривимірний досвід, де фізичні об'єкти пов'язані з віртуальним світом. Демонструють розширювану архітектуру для візуалізації та аналізу даних у фотосинтетично активному світі. Ця архітектура має три основні складові елементи: (1) модуль для імпорту даних з різних джерел, (2) підсистему обробки та візуалізації даних та (3) загальну клієнт-серверну архітектуру. Запропоноване рішення пропонує можливості як 2D, так і 3D візуалізації для задоволення різних потреб у фотосинтетично активному випромінюванні. Один із прикладів функціональності 2D візуалізації включає зображення карти, накладене на 2D-зображення з даними про фотосинтетично активне випромінювання. Продемонстровано передову систему садівництва на основі доповненої реальності (AR), спрямовану на підтримку нових фермерів/садівників у виконанні складних сільськогосподарських завдань на основі даних датчиків та різних баз даних. Ця система забезпечує візуальне керівництво для кількох сільськогосподарських операцій та здатна записувати положення/точки зору фермерів під час операцій. Крім того, вона накладає віртуальні рослини на поле, де працює фермер, та дозволяє порівнювати реальні та віртуальні рослини. Пропонують метод створення 3D-панорамних моделей з пар зображень, отриманих за допомогою мобільних стереосистем машинного зору. Ці 3D-моделі потім інтегруються в існуючі ГІС-платформи для створення геоінформаційної системи віртуальної реальності (VRGIS). VRGIS здатна ефективно отримувати просторову інформацію, що дозволяє здійснювати навігацію у VR. Для запропонованого рішення використовується кілька технологій, що охоплюють: обробку зображень, алгоритми зіставлення зі зразками, об'єднання даних,

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

побудову 3D-моделей поверхні, управління базами даних тощо. Інтегрована VRGIS може служити платформою для отримання польової інформації для ПА. Демонструють захоплену VR-симуляцію теплиці. Запропоноване рішення дозволяє навчати студентів за допомогою реалістичних інтерфейсів для землеробства в контрольованому середовищі (CEA) та кількох фізичних завдань у теплицях. Завдяки цим інтерфейсам можна запобігти витратам, пов'язаним з неправильним керуванням системою CEA невідповідними користувачами. Демонструють фреймворк, який інтегрує дані Інтернету речей у середовище доповненої реальності (AR), тим самим полегшуючи інтерпретацію цієї інформації, а також простий та ефективний моніторинг сільськогосподарських культур. Польові випробування запропонованого рішення показали меншу схильність до помилок порівняно з іншими методами візуалізації, а також потенціал для економії часу та зменшення відходів.

Інші інструменти аналізу даних

Кілька інших інструментів аналізу даних, заснованих на нечіткій логіці, семантичних технологіях, алгоритмах декомпозиції/шумозаглушення тощо, мають корисне застосування в ПА. Нечітку логіку можна визначити як багатозначну логіку зі спеціальними властивостями, яка використовується для моделювання явища нечіткості та значення природної мови з використанням градуйованого підходу. Основна ідея семантичних технологій полягає в тому, щоб допомогти комп'ютерам розуміти дані, надаючи інструменти та методології для представлення, інтеграції та отримання знань. Запропоновано семантичну структуру для ПА-застосунків на основі Інтернету речей, яка забезпечує міркування в режимі реального часу над гетерогенними потоками даних датчиків. Крім того, запропонована структура досягає семантичної інтеграції інформації з різних джерел, включаючи соціальні мережі, дані датчиків, державні постанови/сповіщення, підключені ферми тощо. Деякими перевагами вищезгаданого рішення є підвищення продуктивності, краща якість продукції, оптимізація використання ресурсів, швидша реакція на непередбачувані події, прозорість тощо. Пропонується недороге рішення для семантичного моніторингу виноградників. Це

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рішення приймає вхідні дані з недорогих камер, датчиків та плат обробки, встановлених на роботизованих системах. Потім ці дані семантично маркуються, щоб точно визначити, які місця потрібно контролювати. Таким чином, фермери можуть заощадити час і працю. Запропоноване рішення також може бути інтегровано в існуючі безпілотні транспортні засоби.

Нелінійність та низька точність керування – це два недоліки кількох гідравлічних робототехнічних систем для розсади, спричинені перешкодами від зовнішніх факторів. Щоб подолати ці проблеми, змодельовали систему керування гідравлічним роботом для розсади, поєднавши теорію нечіткого керування з теорією пропорційно-інтегрально-похідного (PID) керування. Змодельована система керування допомогла подолати проблеми, пов'язані з низькою точністю та нелінійністю, а також покращила загальну стабільність і продуктивність роботизованої системи. Представляють новий метод оптимізації системи внесення добрив зі змінною нормою. Цей метод базується на кількох методах, включаючи: загальні регресійні нейронні мережі (GRNN), багатоцільові еволюційні алгоритми та алгоритми декомпозиції. Було виявлено, що запропонований метод сприяє більш точному та рівномірному внесенню добрив порівняно з іншими існуючими методами. Запропоновано модель для отримання фенологічних даних сільськогосподарських культур, яка використовує методи поляриметричної декомпозиції радіолокатора із синтезованою апертурою, а також нейронні мережі, алгоритми випадкового лісу, регресії та k-найближчих сусідств. Цю модель використовували для різних типів сільськогосподарських культур, включаючи ріпак, кукурудзу, сою та пшеницю, і було виявлено, що вона забезпечує надійні результати фенологічного відновлення.

Методи аналізу даних, такі як алгоритми гармонійного аналізу часових рядів (HANTS), можуть бути використані для реконструкції даних, пов'язаних з NDVI. У часових рядах, отриманих із супутників щодо NDVI, несприятливі атмосферні компоненти часто призводять до прогалин у даних. Падхі та Дутта пропонують метод рухомого зміщення (MOM), який може бути використаний для попереднього заповнення часових рядів перед застосуванням алгоритмів

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

HANTS. Було виявлено, що запропонований метод покращує якість реконструкції NDVI в регіонах, де часто трапляються сезонні перешкоди. Ще одне рішення для реконструкції даних, особливо корисне для ПА. У цій роботі демонструється 4D-підхід до реконструкції, який сприяє моніторингу сільськогосподарських культур з високою просторово-часовою роздільною здатністю. Просторово-часова модель динамічних сцен використовується для моніторингу вирощування сільськогосподарських культур, зовнішній вигляд яких постійно змінюється. Також розроблено надійний алгоритм асоціації даних для вирішення проблем, пов'язаних зі значними змінами зовнішнього вигляду сільськогосподарських культур, спричиненими сценами з різних ракурсів у різний час. Було виявлено, що запропонована модель забезпечує якісно правильний та кількісно точний моніторинг сільськогосподарських культур.

Зберігання та розповсюдження даних

Обмін цінними знаннями та досвідом між різними учасниками сільського господарства, а також ефективні та безпечні варіанти зберігання мають життєво важливе значення для ПА. У зв'язку з цим для цього огляду літератури було проаналізовано рішення щодо платформ спільного використання, хмарного сховища, блокчейну та інших відповідних технологій.

Платформи спільного доступу та хмарне сховище

Продemonстровано розподілену платформу обміну даними для сільського та лісового господарства з багатоджерельних датчиків Інтернету речей. Платформа складається з центру обробки даних, адаптера даних, сховища даних, публікації даних та підсистем передачі даних. Підсистема публікації даних забезпечує стандартизовані інтерфейси запитів даних для даних реального часу з одного або кількох датчиків, а також для історичних даних. Запропонована платформа усуває розрив між даними з різних датчиків Інтернету речей та використанням цих даних у різних сільськогосподарських або лісових програмах. Продemonстровано систему обміну знаннями для сільського господарства. Ця система дозволяє обмінюватися двома джерелами даних: даними з датчиків (наприклад, вимірюваннями температури, вологості, CO₂), та робочою інформацією від

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кваліфікованих фермерів (наприклад, досвідом, змодельованим у цифровій формі розширюваної мови розмітки (XML)). Запропонована система допомагає підтримувати сільськогосподарські технології на високому рівні, а також просуває концепції планування сільського господарства. Представляють гетерогенну платформу обміну базами даних для сільського господарства на основі XML. Використовуючи архітектуру браузер/сервер (B/S), ця платформа дозволяє користувачам отримувати доступ до гетерогенних баз даних через свій веб-браузер. Бази даних, які можуть використовувати цю платформу, включають: практичну агро-техніку/сільське господарство, політику/сільськогосподарські наукові таланти/ринкову пропозицію/ринковий попит. Тестування цієї платформи довело її надійність та корисність для обміну даними в фермерських господарствах. Пропонують платформу обміну даними для інформаційних систем управління фермерським господарством. Ця платформа складається з сервісу збору даних та сервісу обміну даними. Тестування запропонованої системи виявило її гнучкість та розширюваність у зборі даних з різномірних джерел, включаючи веб-сервіси та пристрої послідовного зв'язку. Крім того, платформа виявилася дуже точною та ефективною для обміну даними між різними інформаційними системами управління фермерським господарством.

Хмарні обчислення та пов'язані з ними послуги можуть бути дуже корисними для ПА. Хмарні обчислення – це технології, що забезпечують легкий, повсюдний та на вимогу доступ до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що охоплює мережі, сховища, сервери, служби тощо з мінімальними потребами в управлінні/взаємодії. Продемонстровано хмарну систему обміну спостереженнями дистанційного зондування для картографування вологості ґрунту в ПА. Ця система складається з хмарної служби спостереження з датчиків, веб-служби обробки та підсистеми розподіленої бази даних. Тестування запропонованої системи показало її внесок у покращення зберігання даних спостереження Землі, а також у досягнення масштабного картографування вологості ґрунту. Пропонується нову, надійну та легко розширювану систему ПА на основі хмарних обчислень та хмарного сховища, що дозволяє фермерам контролювати свої врожаї та

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

планувати свої сільськогосподарські завдання з ПК, смартфона або планшета. Використання хмарного сховища замість локального сприяє мінімізації управлінських зусиль, а також оптимізації використання ресурсів.

Блокчейн та смарт-контракти

Технологія блокчейн набирає обертів у всьому світі в галузі управління та зберігання даних. Ця технологія також може бути досить корисною для фізкультури та охоронних систем. Блокчейн можна визначити як розподілений реєстр, який містить постійно зростаючий список записів даних. Усі вузли-учасники підтверджують достовірність та точність вищезгаданих записів даних. Термін «блок» (блокчейну) стосується запису, що містить дані, значення з хешем (цифровим відбитком даних блоку) поточного блоку, а також значення з хешем попереднього блоку. Зв'язок між хешем поточного блоку та хешем попереднього блоку служить основою для криптографічно пов'язаного ланцюга блоків. Точне зрошення охоплює точний розрахунок потреб культур у воді, а також точне застосування об'ємів води у потрібний час. Підкреслюють переваги інтеграції технологій блокчейн для забезпечення довіри та безпеки в системах точного зрошення, а також для пом'якшення різних векторів атак за допомогою запропонованої структури. Після аналізу кількох загроз даним, безпосередньо пов'язаних з природоохоронною діяльністю (наприклад, зловмисні атаки або спотворення даних про навколишнє середовище, що зберігаються на централізованих серверах), підкреслюють роль технології блокчейн та її криптоекономічних функцій безпеки у забезпеченні захисту даних та технологічної інфраструктури від зловмисних атак. Автори також наводять приклад використання технології блокчейн для безпечної національної розподіленої бази даних, яка відповідає міжнародним сільськогосподарським стандартам та угодам про іменування.

Розумні контракти стосуються повністю цифрових контрактів у формі невеликих скриптових програм, які використовуються та зберігаються в блокчейнах, забезпечуючи таким чином логіку, захищену від несанкціонованого доступу. Представлено децентралізовану платформу послуг відстеження, використовуючи блокчейн для забезпечення цілісності та надійності даних, а також

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розумні контракти для незворотних та відстежуваних фінансових транзакцій між користувачами.

Це рішення використовує датчики Інтернету речей для збору даних про стан довкілля щодо сільськогосподарських культур. Ці дані зберігаються за допомогою мережі «від одного до одного» (P2P). Оскільки ця конкретна платформа має потенціал масштабованості шляхом застосування відстеження даних до кожного компонента виробничого ланцюжка сільськогосподарської продукції, вона може забезпечити відстеження «від ферми до виделки». Демонструють рішення для збору та розподілу даних датчиків роботів у довіреному інформаційному просторі за допомогою смарт-контрактів та технологій блокчейн. Крім того, використовуючи технології Інтернету речей та нечіткої логіки, запропоноване рішення дозволяє формувати коаліції між роботами з довірою всіх учасників для виконання завдань у сфері особистого аудиту, які потребують співпраці.

Багатоцільові платформи

Кілька розглянутих рішень для управління активністю, що охоплюють цифрові платформи, мобільні додатки та системи управління активністю (CPS), підтримують кілька етапів життєвого циклу даних.

Управлінські інформаційні системи та цифрові платформи

Запропоновано інформаційну систему управління фермерським господарством (FMIS), яка може бути використана для картографування земель, збору даних з різних джерел, моніторингу параметрів, обробки даних, а також для підтримки прийняття рішень. Зокрема, прийняття рішень підтримується шляхом інформування фермера про нові технології, доступні ресурси, конкурентів, ціни, фінансові прогнози, нормативні акти тощо. Також була розроблена відповідна онтологія для представлення знань, які можна використовувати для розуміння основних концепцій та зв'язків, що стосуються FMIS. Демонструється FMIS, яка дозволяє фермерам легко проводити аналіз прибутковості на основі певних параметрів ферми, зареєстрованих транзакцій та виконаних сільськогосподарських завдань. Ця FMIS використовує технології хмарних обчислень та була протестована в польових умовах на посівах озимої пшениці. Вона має потенціал для

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сприяння прийняттю рішень фермерами щодо практики управління фермерським господарством та використання ресурсів. Описують та оцінюють середовище з відкритим кодом для управління даними в управлінні фермерським господарством. Це рішення має на меті забезпечити повну та безкоштовну підтримку поширеного недорогого обладнання, яке використовується для підтримки різних датчиків навколишнього середовища та згенерованих ними даних. Інструменти візуалізації та кілька інструментів управління даними легко доступні користувачам. Також доступний обмін даними між зареєстрованими користувачами та створення правил для виконання простих операцій. Представляють панель інструментів для фермерських господарств, яку можна використовувати для створення карт врожайності та якості плодів. Запропоноване рішення використовує дані ГІС, а також дані з різних бібліотек, що використовуються для обробки/аналізу просторових даних, і надає користувачеві корисну інформацію з точки зору управління фермерським господарством. Деякі з переваг вищезгаданої панелі інструментів включають легше прийняття рішень фермерами та оптимізоване використання води, добрив та пестицидів. Продемонстровано сільськогосподарську онтологію, яка може бути використана для застосування технологій обробки даних у сільському господарстві та може призвести до підвищення продуктивності та ефективнішого управління. База знань, створена в контексті цього рішення, містить кілька семантичних відносин та ієрархій, які можуть пов'язувати різноманітні доступні ресурси. Онтологія вирішує багато проблем, які виникають під час попередньої обробки, перетворення, аналізу та інтеграції реальних великих даних у сільськогосподарській сфері. Крім того, запропонована онтологія полягає в тому, що вона може служити основою для створення більших та точніших баз знань.

Технологія диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) є ще одним прикладом багатоцільової платформи для управління активним землеробством. Термін SCADA зосереджений на рівні контролю, а не на повноцінній системі управління. Це програмний пакет, який взаємодіє з програмованими логічними контролерами (ПЛК) та/або іншими комерційними апаратними модулями.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Представлено систему SCADA для автоматизованого управління зрошенням сільськогосподарських культур. Ця система дозволяє контролювати змінні процесу (наприклад, температуру/вологість ґрунту, температуру/вологість навколишнього середовища, тиск води) у режимі реального часу, а також керувати електромагнітними клапанами, які використовуються для зрошення. Оптимізація використання робочої сили та водних ресурсів, зниження витрат, зменшення кількості захворювань та менший стрес для рослин були визначені як деякі з потенційних переваг запропонованого рішення. Продемонстровано мобільну систему SCADA для автоматичного управління сільськогосподарськими культурами. Згідно з вимірюваннями різних датчиків, зрошення контролюється автоматично, і дозується належна кількість добрив та пестицидів. Ця система також здатна виявляти порушення на сільськогосподарському полі (наприклад, проникнення тварин) та відповідно подавати сигнали тривоги.

Киберфізичні системи

У цій роботі системи управління біопаливом (CPS) також розглядалися як багатоцільові платформи, оскільки вони часто використовують різні технології збору/аналізу/зберігання/обміну даними, штучного інтелекту, Інтернету речей тощо. Деякі відомі рішення CPS можуть бути використані для вимірювання властивостей ґрунту, а також для внесення змінних норм добрив та пестицидів на основі просторової та/або часової мінливості культур. Могілі та ін. демонструють використання автоматичної системи розподілу пестицидів на основі БПЛА, яка зменшує вплив небезпечних хімічних речовин на фермерів та оптимізує використання води та пестицидів. Вищезгадана система фотографує культури та аналізує зображення, щоб визначити, які ділянки потребують використання пестицидів. На основі результатів цього аналізу, а також даних геолокації з глобальної системи позиціонування (GPS), вона автоматично розподіляє необхідну кількість пестицидів на кожен ділянку за допомогою контролера широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), який регулює потік пестициду через розбризкувач. Продемонстровано нову роботизовану систему удобрення зі змінною нормою, яка здатна досягати точних норм удобрення відповідно до вимог ґрунту. Цією

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системою можна керувати дистанційно за допомогою застосунку для смартфона. Він використовує дані GPS для навігації та застосовує виконавчий механізм для правильного дозування добрив. Зниження витрат, а також зменшення забруднення навколишнього середовища та марнування ресурсів були одними з найважливіших переваг запропонованої системи. Продemonстровано роботизовану платформу, яка вимірює кілька властивостей ґрунту за допомогою вимірювань проникнення. Спеціальна платформа автоматично виявляє перешкоди, які потенційно можуть пошкодити вимірювальні зонди. Навігація може здійснюватися автономно за допомогою супутникового позиціонування або за допомогою дистанційного керування.

Завдяки сприянню методам фенотипування, робототехніки-постачальники (CPS) можуть надавати корисну інформацію для фермерського господарства (ФА). Термін «фенотипування» стосується комплексної оцінки анатомії та фізіології рослини, а також її складних онтогенетичних та біохімічних ознак. Завдяки фенотипуванню можна отримати корисні знання щодо росту, врожайності, стресу тощо рослини. Представляють недорогого, надійного та високопродуктивного робота для фенотипування. Здатна захоплювати зображення з кількох точок зору в межах рядів рослин, ця система долає певні проблеми (обмежена зона охоплення через захоплення з однієї точки зору, неможливість зібрати всі необхідні фенотипові дані тощо), з якими стикаються інші подібні роботизовані рішення. Використовуючи методи вилучення ознак, можна отримати значну інформацію щодо ширини стебла та висоти рослини. Для точної навігації роботизованої системи використовується кінематична система глобального позиціонування в режимі реального часу (RTKGPS). Польові випробування вищезгаданої системи показали високу пропускну здатність фенотипування в енергетичних культурах сорго.

Системи комплексного планування (КПС) також можуть сприяти різним трудомістким сільськогосподарським видам діяльності (наприклад, обробіток ґрунту, посів, пересадка, збір врожаю, боротьба з бур'янами). Проаналізовано використання робота для виконання безпілотної ротаційної обробки ґрунту,

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуючи навігаційну систему для визначення його місцезнаходження та напрямку. Ці дослідники також пропонують операцію з двома транспортними засобами, в якій оператор вручну керує звичайним трактором, одночасно контролюючи роботу робота-подрібнювача, що знаходиться поруч. Результати оцінюються як підвищення ефективності в 1,8 раза порівняно з операцією лише з оператором. Продемонстровано робота для висіву насіння на базі Інтернету речей, яким можна керувати за допомогою мобільного додатку. Кілька компонентів запропонованої системи можна виготовити вдома за допомогою технологій 3D-друку. Також були виявлені важливі переваги для фермерів щодо скорочення робочої сили та загальних витрат. Продемонстрована робота для пересадки рису, використовуючи RTKGPS та дані з різних датчиків для його навігації. Було виявлено, що конкретна система має задовільну точність пересадки. Крім того, різні дані (наприклад, робочий шлях, час та якість GPS), записані роботом для розсадження, можуть бути використані для надання детальної інформації про історію вирощування, що сприятиме створенню більш надійної системи безпеки харчових продуктів. Представляють автономного робота для збору врожаю полуниці. Було запропоновано новий алгоритм розділення перешкод для подолання труднощів, з якими стикаються інші подібні рішення під час збору врожаю в захищених та неструктурованих середовищах. Використовуючи цей алгоритм, роботизований захоплення може активно розсувати навколишні перешкоди, що призводить до підвищення ефективності збору врожаю. Для безперервного збору врожаю полуниці вздовж політунелів було використано алгоритм інтеграції та керування. Продемонстровано автоматичну систему боротьби з бур'янами, що використовує автономні транспортні засоби та GPS-технології. Конкретна система вирішує проблему, коли фермери змушені видаляти бур'яни вручну в рядах своїх точно висівних культур. Було випробувано автономний трактор, що використовує супутникову навігацію GPS, а технології моделювання були використані для оцінки обробленої площі, а також для кількісної оцінки системної помилки.

БПЛА можуть використовуватися разом з безпілотними літальними апаратами

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тами (БПЛА), що забезпечує важливі переваги для державного управління. Лібіш та ін. демонструють основні концепції проекту Flourish, який поєднує можливості багатовертолітних БПЛА з багатоцільовими сільськогосподарськими БПЛА. Одне із запропонованих застосувань стосується створення карт властивостей сільськогосподарських культур за допомогою БПЛА, багатоспектральної візуалізації та технологій 3D-реконструкції. Це рішення сприяє підтримці рішень щодо управління сільськогосподарськими культурами. Доповнюючи вищезгадане рішення, БПЛА можуть використовуватися для класифікації рослин, а також для розрізнення сільськогосподарських культур від бур'янів у режимі реального часу.

Програми для смартфонів

Смартфони сьогодні широко використовуються у всьому світі, і існує безліч мобільних додатків, що підтримують різні методи захисту рослин. Веллідіс та ін. демонструють мобільний додаток, який можна використовувати для планування поливу бавовняних культур. Цей додаток оцінює дефіцит ґрунтової води в кореневій зоні культури (RZSWD) на основі даних метеостанції, різних параметрів культури та ґрунту, а також на основі іригаційних застосувань. Після того, як користувач ввів місцезнаходження культур, тип ґрунту та деталі про використану стратегію поливу, додаток інформує користувача, коли RZSWD перевищує певний поріг; про дощ повідомляє сусідня метеостанція або коли відбуваються фенологічні зміни. Таким чином, додаток полегшує прийняття рішень щодо поливу та може сприяти підвищенню продуктивності та економії ресурсів. Представлено додаток для смартфонів для виконання моделювання вимивання азоту та проведення оцінки ризику втрати азоту, а також кореляції результатів з певними спостережуваними значеннями. Використовуючи цей додаток, фермери можуть приймати кращі рішення щодо управління азотом та оптимізувати використання ресурсів. Аналізуючи мобільний додаток для ранньої діагностики хвороб рослин. Завдяки методам обробки зображень, класифікації та сегментації, цей застосунок дозволяє фермерам вставляти фотографії своїх рослин для виявлення хвороб. Оцінка цього застосунку показала прийнятну точність. Раннє

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявлення хвороб, що забезпечується застосунком, сприяє мінімізації фінансових витрат та впливу на навколишнє середовище. Продемонстровано застосунок для смартфонів для вимірювання часткового зеленого покриття пологуг (FGCC). Цей параметр має велике значення в ПА, оскільки його можна використовувати для моніторингу росту пологуг, перехоплення світла, а також розподілу евапотранспірації. Для оцінки FGCC використовується кілька методів обробки зображень. Користувачі можуть вставляти зображення та/або відео як вхідні дані до застосунку. Оцінка застосунку виявила значно швидшу роботу порівняно з іншими подібними програмними інструментами, зберігаючи при цьому високу точність.

2.4 Висновок по розділу

У другому розділі було досліджено методи та програмні рішення для інтеграції сенсорів в IoT-системах агротехнічного призначення. Розглянуто інформаційні системи та програмні платформи для управління агротехнічними процесами, що забезпечують автоматизацію моніторингу та аналізу даних. Проаналізовано методи інтеграції та обробки сенсорної інформації в IoT-системах, які дозволяють підвищити точність та оперативність прийняття рішень. Також досліджено роль інформаційно-комунікаційних технологій у системах точного землеробства. У результаті визначено ефективні підходи до створення сучасних IoT-рішень для аграрної сфери.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ СЕНСОРІВ

3.1 Проектування архітектури системи збору та обробки сенсорних даних

У цьому підрозділі описано функціональність та режими роботи розробленого комплексу управління фермерським господарством на сонячній енергії, корисного для фермерів для моніторингу та контролю свого виробництва, для керування або простого контролю процесів вирощування сільськогосподарських культур, таких як цикли фертигації або дезінсекції від патогенів, і що дозволяє фермеру або споживачеві відстежувати вирощену продукцію на всіх фазах після збору врожаю. Секція фертигації є лише компонентом усієї багатофункціональної системи, повністю інтегрованої з програмною платформою для управління фермерським господарством, яка реалізує алгоритм DSS для контролю всіх фаз росту вирощеної продукції від посадки до збору врожаю. Великою перевагою запропонованого комплексу фермерського господарства також є інтеграція з індивідуальною системою відстеження для контролю умов зберігання та транспортування харчових продуктів, починаючи з моменту їх збору.

На рисунку 3.1а показано дерев'яний котедж на сонячній енергії з автоматизованою системою фертигації всередині; гідравлічна механічна секція включає до 5 контейнерів з різними порошкоподібними добривами всередині, кожен з яких оснащений дозуючим механізмом на основі равлика відповідного розміру для точного калібрування кількості добрив, що додаються до водного розчину (рисунок 3.1b). Таким чином, бажана кількість добрив додається до води в резервуарі; після цього для змішування розчину добрив використовується механічний змішувач, що приводиться в дію електродвигуном. Далі останній перекачується електричним насосом до різних ділянок землі, які потребують процесу фертигації. Склад розчину добрив визначається на основі агрономічної моделі, специфічної для даної культури; ця модель має на вході прогнози погоди та,

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

особливо, дані про ґрунт та навколишнє середовище, отримані безпосередньо на полі за допомогою розробленої бездротової сенсорної мережі (WSN). Фактично, кожен вузол WSN постійно контролює параметри ґрунту та культур, пов'язані з певною ділянкою оброблюваної землі, та бездротово передає виявлені дані через свій координаційний вузол до хмарної програмної платформи (як показано на реальній реалізації на рисунку 3.2). Останній обробляє отримані дані для визначення правильних потреб у поживних речовинах та воді рослин, що належать до розглянутої секції, як функції типології культур та фази росту відповідно до динамічної агрономічної бази даних, що входить до хмарної платформи. Моделі математичного прогнозування, включені до розробленої програмної системи, можуть прогнозувати, залежно від встановлених обробок та стану росту культур, деяке випередження або затримку щодо збору врожаю; фермер-користувач може активувати цю функціональність відповідно до замовлень на купівлю, отриманих споживачами на веб-порталі ферми, і, отже, на основі графіка поставок сільськогосподарської продукції, що має бути здійснена.

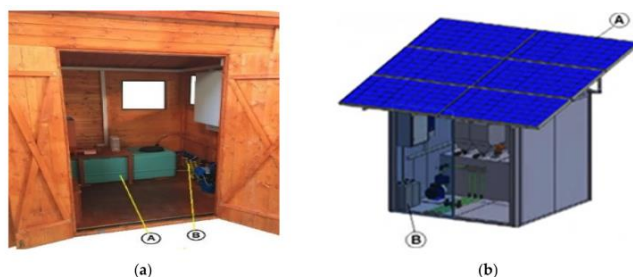


Рисунок 3.1 - Котедж на сонячній енергії з автоматизованою системою фертигації всередині

(а) Всередині реалізованого дерев'яного котеджу з механічними та електронними секціями автоматизованої системи фертигації, з виділенням (А) змішувального бака та (В) електромагнітних клапанів для вибору ділянок землі, що зрошуються; (б) 3D-зображення дерев'яного котеджу на сонячній енергії з системою фертигації всередині, стрілками позначені (А) сонячні панелі, розташовані на даху, та (В) батареї для накопичення сонячної енергії.

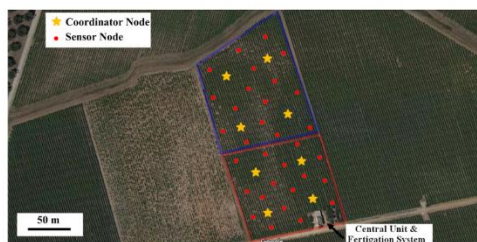


Рисунок 3.2 - Розподіл вузлів датчика та координатора бездротової сенсорної мережі (WSN) на землях, оброблених виноградниками, розділених на два сектори площею один гектар кожен.

Як показано на рисунку 3.3, основною частиною розробленого дистанційно керованого сільськогосподарського об'єкта був «апаратний блок керування», який включає як механічні, так і гідравлічні секції, керовані електронним блоком, що дозволяє отримувати оптимізовані цикли фертигації на кожній ділянці оброблюваних земель відповідно до потреб культур, визначених даними датчиків конкретного кластера бездротових сенсорних мереж (WSN) на основі агрономічних моделей та прогнозів погоди.

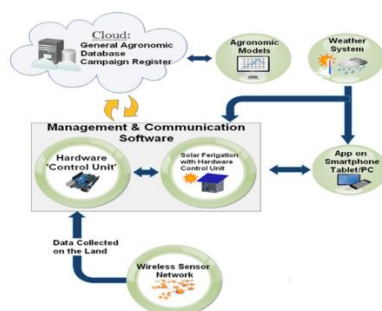


Рисунок 3.3 - Функціональна схема розробленої системи фертигації з різними апаратними та програмними розділами та відповідним потоком даних між ними;

«Апаратний блок керування» повністю живився від фотоелектричної установки, що складалася з трьох полікристалічних сонячних панелей потужністю 200 Вт, розміщених на даху дерев'яного котеджу, регулятора заряду, перетворювача постійного/змінного струму та акумуляторної батареї для зберігання

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробленої енергії; крім того, панель керування та захисту була належного розміру для захисту імплантату від перевантажень напруги та коротких замикань. Розроблений «блок керування» збирає інформацію від метеорологічної служби та польових бездротових мереж охорони навколишнього середовища (WSN), пов'язану з параметрами навколишнього середовища та ґрунту, та порівнює їх з відповідними пороговими значеннями, отриманими з агрономічних моделей.

Зібрані дані про землю обробляються блоком керування, а потім передаються до віддаленої загальної агрономічної бази даних для поєднання з агрономічними моделями та моделями сталого розвитку, а також погодними умовами або прогнозом. Робота системи фертигації також визначається залежно від даних, зібраних безпосередньо на полі за допомогою розробленої бездротової сенсорної мережі (WSN); остання складається з кількох сенсорних вузлів з різними функціями, розташованих у різних точках оброблюваного поля або теплиці, для виявлення параметрів навколишнього середовища та ґрунту, а також даних про ріст сільськогосподарських культур. Кожен сенсорний вузол живиться через фотоелектричну систему, що складається з невеликої аморфної кремнієвої сонячної панелі, регулятора напруги постійного струму LTC3105 для заряджання суперконденсатора або літієвої батареї, належним чином підібраної для забезпечення тривалої автономної роботи.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) побудована за деревоподібною структурою, що включає вузли, оснащені датчиками для отримання даних про ґрунт та навколишнє середовище, та координаційні вузли (або вузли проміжного програмного забезпечення), які збирають дані з сенсорних вузлів та передають їх до центрального блоку системи фертигації.

Звертаючись до сільськогосподарських угідь, що використовувалися для вирощування виноградника загальною площею трохи більше двох гектарів, реалізовану бездротову сенсорну мережу (WSN) було протестовано шляхом розміщення сенсорного вузла кожні 500 м² (тобто 20 вузлів, розподілених для кожного сектора площею один гектар), всі вони підключені через координаційні вузли до єдиного блоку керування, який керує процесами фертигації. Таким чином, два

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сусідні вузли були розташовані на максимальній відстані 25-30 м; така відстань була обрана на основі деяких тестів зв'язку, проведених також на аналогічних оброблюваних полях з рослинами або культурами максимальної висоти 70-80 см і тонким стеблом, щоб гарантувати низький відсоток втрати пакетів ($<2\%$). Однак кількість сенсорних вузлів повинна вибиратися відповідно до потреб фермера (наприклад, якщо в одному секторі розміщено більше типів культур), враховуючи, що плата NodeMCU забезпечує дальність зв'язку до 70-80 м у відкритому полі або до 45-50 м за наявності невеликих рослин (як зазначено вище). З іншого боку, реалізовану бездротову сенсорну мережу (WSN) було протестовано всередині саду (зокрема, вишневих дерев середньою висотою 3 м), спочатку зберігаючи ту саму відстань між вузлами (30 м), що призвело до подальшого збільшення відсотка втрати пакетів ($\sim 20\%$), головним чином через втрати на шляху, спричинені перешкодами; у цьому сценарії відстань між вузлами необхідно зменшити до 20 м, щоб зменшити відсоток втрати пакетів до прийнятного значення ($<2\%$).

Як згадувалося вище, показано розподіл сенсорних та координаторних вузлів для визначення параметрів ґрунту та повітря та проведення комунікаційних тестів. Земельна ділянка розділена на два сектори по одному гектару з двадцятьма вузлами на кожен. П'ять сенсорних вузлів (із загальної кількості 20 вузлів на кожен гектар) налаштовані також на функцію координаторних вузлів (або вузлів проміжного програмного забезпечення), збираючи пакети даних, що надаються сусідніми сенсорними вузлами, та періодично пересилаючи дані, упорядковані у багатовимірну матрицю, до іншого координаторного вузла, ближче до центрального блоку, розташованого на нижній стороні ділянки, доки вони не досягнуть останнього, як детально описано нижче.

Однак, для оптимізації топології бездротової сенсорної мережі (WSN) та зменшення її вартості, кількість координаційних вузлів можна зменшити; отже, необхідно покривати більшу відстань між ними та центральним блоком. У цьому випадку потрібен координаційний вузол, оснащений зовнішньою антеною; таким чином, як альтернатива платі NodeMCU, міні-плата WEMOS D1, оснащена

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

антенною +5 dBi, була протестована в цих умовах, що забезпечує більшу дальність зв'язку. Щодо реалізації WSN, як показано на рисунку 3.3 для його польових випробувань, оскільки середня відстань між різними вузлами становить менше 45-50 м (а саме близько 30 м) без наявності великих перешкод, як сенсорний, так і координаційний вузли були реалізовані за допомогою плати NodeMCU ESP8266.

Крім того, центральний блок реалізує механізм виявлення несправностей або проблем із підключенням кожного сенсорного вузла; фактично, якщо протягом п'яти послідовних інтервалів спостереження (а саме через дві з половиною години) певний сенсорний вузол не передає дані датчиків, на хмарну платформу надсилається попереджувальне повідомлення, яке попереджає оператора про необхідність перевірити стан вузла.

Усі функції розробленого комплексу управління фермерським господарством, орієнтованого на Інтернет речей, регулюються відповідною програмною платформою, що дозволяє фермеру або агроному автоматично керувати фертигацією контрольованих культур, дистанційно керувати та контролювати конкретні сільськогосподарські обробки, а також купувати сільськогосподарську продукцію споживачами.

Архітектура вузла датчика та пов'язані з нею методи роботи

Комунікаційні мережі розвинулися в напрямку сектора Інтернету речей (IoT); наразі найширше використовуваними технологіями є SigFox, LoRa, BLE, Zigbee та Wi-Fi. Залежно від застосування, необхідно враховувати їхні показники продуктивності, щоб вибрати одну технологію замість іншої. Наприклад, якщо показником є зрілість технології, LoRa можна вважати низьким станом, Zigbee – середнім, а Wi-Fi – дуже високим. Натомість, якщо показником є доступність, то LoRa та Zigbee демонструють низький рівень, тоді як Wi-Fi – високий рівень. Зокрема, у застосуваннях бездротових сенсорних мереж (WSN) у точному землеробстві технологія Wi-Fi є чудовим варіантом, тим більше, якщо Wi-Fi-з'єднання встановлюється за допомогою недорогого модуля ESP8266, який має інтегрований чіп із Wi-Fi-з'єднанням та підтримує протокол керування передачею (TCP)/IP. Основна мета – забезпечити будь-який вузол на базі ESP8266 доступом

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до мережі Wi-Fi та діяти як плата збору, обробки та зв'язку Wi-Fi. Крім того, щоб компенсувати енерговитрати технології Wi-Fi, цей модуль має низькоспоживчу архітектуру, яка дозволяє йому працювати в 3 різних режимах: активному режимі, режимі сну та режимі глибокого сну, як детально описано та реалізовано в наступних розділах.

Розроблена бездротова сенсорна мережа (WSN) складається з сенсорних вузлів, оснащених кількома датчиками для збору параметрів ґрунту та навколишнього середовища, бездротово підключених до відповідного вузла-координатора, який збирає дані з вузлів кластера та надсилає їх до блоку керування системою управління фермерським господарством для негайного обміну даними на хмарній програмній платформі. Обидві типології вузлів базуються на електронній платі ESP8266 NodeMCU, яка містить Wi-Fi-чип ESP8266; для збору параметрів ґрунту та навколишнього середовища було підключено кілька комерційних датчиків. NodeMCU був обраний, оскільки він поєднує в одному пристрої функції мікроконтролера для збору та обробки даних, а також Wi-Fi-трансивер для зв'язку між вузлами WSN; також він включає блок керування живленням (PMU), що підтримує різні режими сну, що дозволило нам мінімізувати споживання енергії вузлом. Зокрема, цифровий датчик DHT22 для вимірювання температури та вологості навколишнього середовища використовувався цифровий зонд на основі SHT11, оснащений прозорим металевим корпусом для вимірювання температури та вологості ґрунту, і, нарешті, ємнісним датчиком SEN0193 для вмісту води в ґрунті; також датчик вологості SEN0193 покритий антикорозійним шаром, що дозволяє тривалий час контактувати з ґрунтом без будь-яких пошкоджень. Передавальна функція аналогового датчика SEN0193 була експериментально визначена, а потім реалізована в прошивці мікроконтролера для отримання вмісту води в ґрунті з відгуку аналогового датчика. (а) регулятор напруги AMS1117-3.3, замінений на MCP1825S-3302E; (б) схема регулятора напруги MCP1825S-3302E, що використовується для зменшення споживання енергії вузлом; (с) цифровий датчик температури та вологості DHT22; (д) ємнісний датчик вологості SEN0193; (е) цифровий зонд температури та вологості ґрунту на

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі SHT11; (f) сонячна панель з аморфного кремнію потужністю 1,5 Вт; (g) модуль збору енергії LTC3105.

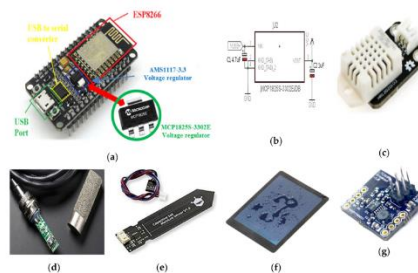


Рисунок 3.4 - Вигляд модуля ESP8266 NodeMCU з виділеними основними компонентами

Автономність сенсорного вузла гарантується пристроєм зберігання енергії (літєвий акумулятор ємністю 100 мАг або суперконденсатор 90-F), що живиться від невеликої гнучкої фотоелектричної панелі, здатної забезпечити до 9 днів автономної роботи (без будь-якої доступності сонячної енергії, що, безумовно, є вкрай нереалістичним сценарієм). Зокрема, використана водонепроникна сонячна панель з аморфного кремнію характеризується максимальною потужністю 1,5 Вт, напругою холостого ходу 2,0 В, струмом короткого замикання 1200 мА та ефективністю перетворення близько 10%. Для з'єднання сонячної панелі з накопичувачем енергії використовувалася схема регулювання постійного струму на основі підвищувального перетворювача LTC3105 (рис. 3.4г); останній був представлений або суперконденсатором 90-F, або акумуляторною літій-полімерною батареєю ємністю 100 мАг.

Для зменшення споживання енергії сенсорним вузлом було проведено деякі структурні модифікації плати ESP8266 NodeMCU; зокрема, основна з них стосується заміни фірмового регулятора напруги ESP8266 NodeMCU на модель MCP1825S-3302E (див. рисунок 3.4а) характеризується нижчим струмом спокою (типове значення $I_q = 120$ пА) та напругою падіння (типове значення $\Delta V = 210$ мВ для $I_{LOAD} = 500$ мА), відносно тих самих величин початкової ($I_Q = 5$ мА та $\Delta V = 1,1$ В для $I_{НАВАНТАЖЕННЯ} = 800$ мА). Таким чином, було досягнуто значної

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

економії енергії, що споживається вузлом датчика, під час режиму глибокого сну, в якому основний внесок вносить споживання струму регулятором напруги.

Більше того, оскільки найенергетично витратнішою фазою є фаза передачі між сенсорними вузлами, для розширення автономності вузла робота бездротової сенсорної мережі (WSN) була належним чином оптимізована відповідно до блок-схеми на рисунку 3.5, яка описує режими роботи як сенсорних, так і координаторних вузлів.

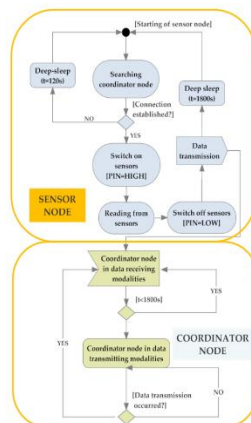


Рисунок 3.5 - Блок-схема, пов'язана з операціями, що виконуються універсальним вузлом датчика та відповідним вузлом координатора.

Кожен сенсорний вузол отримує параметри ґрунту та навколишнього середовища від датчиків і надсилає їх до відповідного координаторного вузла; на кінці передачі сенсорний вузол переходить у режим глибокого сну на 30 хвилин (інтервал часу встановлюється користувачем) для зменшення споживання енергії. Якщо з'єднання з координаторним вузлом втрачається, сенсорний вузол повторює цю операцію кожні 1 хвилину, доки з'єднання не буде встановлено. Під час фази з'єднання сенсорні вузли, що належать до певного сектору, надсилають отримані дані до відповідного координаторного вузла; кожні 30 хвилин останній упорядковує зібрані дані в один пакет і передає його до електронного блоку керування для надсилання через Інтернет-з'єднання на хмарну програмну платформу, а потім повертається в режим прийому.

Запропонований сільськогосподарський об'єкт складається з недорогих

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рішень, але водночас надійних у всіх своїх секціях порівняно з іншими конкуруючими системами. Вартість фертигатора та вузлів бездротової мережі живлення (WSN) залежить від розміру земельної ділянки; наприклад, якщо припустити, що поле площею два гектари, вартість фертигатора становить близько 2900-3200 євро, включаючи механічні, електронні та гідравлічні секції.

Для WSN вартість кожного сенсорного вузла становить близько 35 євро, що значно нижче порівняно з аналогічними рішеннями, представленими на ринку. Враховуючи поле площею два гектари, розділеного на два сектори приблизно по одному гектару кожен та з розміщенням вузла кожні 500 м² (з можливістю розширення до 2000 м² , але з більш грубим моніторингом), для покриття всієї території потрібно 40 вузлів (з можливістю зменшення до 10); отже, вартість бездротової сенсорної мережі (WSN) становить близько 1400 євро (350 євро за рішення з меншою кількістю вузлів, що в будь-якому випадку достатньо для забезпечення належного зв'язку).

3.2 Реалізація сенсорного модуля та програмного забезпечення для моніторингу агропоказників

Для моніторингу правильних умов зберігання сільськогосподарської продукції під час зберігання або транспортування, щоб оцінити її свіжість та цілісність, а також для підтримки простежуваності продукту, було розроблено сенсорну мітку BLE. Параметрами, обраними для перевірки належних умов зберігання, є концентрація загальних летких органічних сполук (TVOC), NH₃ (аміак) та CO₂ , температура та вологість навколишнього середовища. Концентрація TVOC підсумовує внески деяких поширених газоподібних речовин , що утворюються під час псування харчових продуктів, таких як CH₃CH₂OH (етанол), C₂H₄ (етилен) , CS₂ (сірковуглець) тощо.

Також NH₃ є хорошим показником розкладання білка, тому його концентрацію можна використовувати для визначення свіжості м'яса. Натомість, моніторинг CO₂ можна використовувати для контролю якості зберіганих зернових та

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявлення їх псування. Зокрема, концентрації CO₂ від 600 до 1500 ppm вказують на початок росту цвілі через надмірну вологість всередині зберіганого матеріалу або проникнення вологи в структуру; натомість, концентрації вище 1500 ppm вказують на серйозне зростання цвілі, що впливає на весь матеріал, або на зараження комахами всередині зберіганих продуктів. Розроблена смарт-мітка, що пропонує багатопараметричне виявлення, характеризується великою універсальністю, що дозволяє її застосовувати до різних типів харчових продуктів (наприклад, овочів, фруктів, м'яса, риби тощо), на відміну від інших пристроїв, описаних у літературі або присутніх на ринку, які розроблені для конкретного типу продукту.

Розроблена сенсорна мітка використовує модуль BLE HM-10 на базі інтегральної схеми (IC) CC2541, системи на кристалі (SoC), що поєднує приймач-передавач BLE 2,4 ГГц, сумісний зі стеком протоколів Bluetooth v4.0, з мікроконтролером 8051, оснащеним 128 КБ флеш-пам'яті, 8 КБ оперативної пам'яті та кількома допоміжними функціями та периферійними пристроями (наприклад, 12-бітним АЦП, 23 контактами загального призначення вводу/виводу, сторожовим таймером). Широкий спектр периферійних пристроїв та інтегрований приймач-передавач BLE, що реалізує стек BLE v4.1, разом із вдосконаленим блоком керування сторожовим таймером (PMU) є основними причинами, що виправдовують вибір IC CC2541 для реалізації смарт-мітки BLE. Він має три різні режими низького енергоспоживання (тобто PM_i, $i = 1, 2, 3$) зі значно нижчим споживанням струму, що робить його ідеальним для портативних пристроїв, носимих пристроїв та побутової електроніки. CC2541 було запрограмовано за допомогою налагоджувача та програматора CC з використанням IAR Workbench для мікроконтролера 8051.

Модуль HM-10 було налаштовано як iBeacon для підтримки відстеження продукту в усьому ланцюжку поставок; протягом періоду сну мітки BLE для модальності iBeacon було встановлено часовий інтервал реклами 546,25 мс, а для ідентифікації харчового контейнера, на який було застосовано мітку датчика BLE, використовувався універсальний унікальний ідентифікатор (UUID)

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

широкомовного пакету (major, minor, Tx power). Очевидно, що ця система відстеження спрямована на відстеження скупчень харчових продуктів середньо-великих розмірів (піддони, контейнери, коробки тощо), а не на відстеження на рівні споживача. Мітку BLE можна використовувати повторно велику кількість разів, як тільки контейнер забирається порожнім з продуктового магазину або оптового продавця фермою. Крім того, мітка кріпиться до внутрішньої поверхні двома гвинтами, тому її можна легко зняти та закріпити на іншому контейнері у разі пошкодження останнього. Оскільки смарт-мітку BLE можна використовувати повторно кілька разів, економічний вплив, пов'язаний з придбанням пристрою, значно зменшується.

Мітка датчика оснащена цифровим газовим датчиком CCS811 наднизько-енергетичним газоподібним датчиком оксиду металу (MOX), здатним виявляти концентрації TVOC та еквівалентного CO₂ (eCO₂) для моніторингу якості повітря. Вимірювання отримуються за допомогою інтелектуальних алгоритмів, здатних обробляти необроблені дані, пов'язані зі значеннями струму та напруги, що надаються MOX-датчиком та отримані інтегрованим АЦП, для подальшої передачі на головний мікроконтролер за допомогою інтерфейсу I2C. Крім того, датчик має 3 режими низького енергоспоживання, оптимізовані для розширення автономності в портативних застосуваннях. Широкий діапазон виявлення (0 ^ 1187 ppb для TVOC та 400 ^ 8192 ppm для CO₂), висока чутливість та низьке енергоспоживання роблять датчик CCS811 ідеальним для розглянутого застосування, враховуючи також його високу стійкість до зовнішніх факторів (висока вологість та температура, а також наявність пилу). Плата розподілу на базі CCS811, модифікований для зменшення споживання енергії шляхом видалення вбудованого регулятора напруги 3,3 В, оскільки датчик живився безпосередньо від регулятора напруги 3,3 В, що входить до секції живлення мітки (Рисунок 3.7).

Крім того, датчик містить цифровий датчик температури та вологості BMP280, який працює в діапазоні тиску 300-1100 гПа та температур від -40 до +85 °C; він базується на п'єзорезистивному датчику тиску, поєднаному з інтегрованим блоком обробки та збору змішаних сигналів, який потім передає

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результати перетворення через цифровий інтерфейс (рис.3.6б).

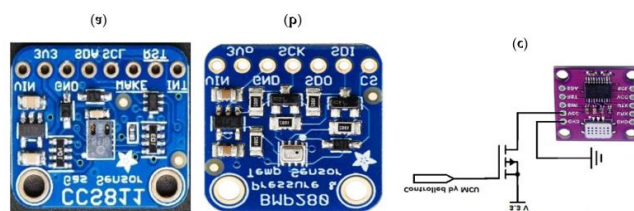


Рисунок 3.6 - Сенсорна мітка для моніторингу

Невеликі розміри та велика кількість функцій датчика BMP280 дозволили нам значно зменшити загальний розмір реалізованої мітки BLE, зберігаючи водночас дуже низьке енергоспоживання. Доступні три різні режими роботи для оптимізації енергоспоживання в низькоенергетичних застосуваннях. Для виявлення концентрації аміаку було використано мікроелектромеханічний (MEMS) MOX-газовий датчик, характеризується діапазоном виявлення 1–500 ppm, опором чутливості в повітрі від 10 кОм до 1500 кОм та коефіцієнтом чутливості (R_{air}/R_{1ppm}) від 1,5 до 15. Роз'ємна плата на базі MiCS-5914, оснащена секцією збору та передачі даних на базі мікроконтролера STM32, була підключена до плати HM10 за допомогою послідовного інтерфейсу I2C (рис. 3.6с). Вбудований резистор 93 Ом, підключений послідовно до внутрішнього нагрівача датчика MOX, було замінено на резистор 47 Ом, щоб забезпечити живлення плати напругою 3,3 В і при цьому зберегти правильне значення (2,2 В) напруги нагрівача; крім того, було додано перемикач (PMOSFET) для вимкнення датчика, щоб зменшити споживання енергії, коли датчик перебуває в режимі очікування. (а) Плата підключення CCS811 для виявлення загального вмісту летких органічних сполук (TVOC) та концентрації eCO_2 ; (б) Плата підключення BMP280, що використовується для моніторингу температури та вологості навколишнього середовища; (с) Плата підключення MiCS-5914 для виявлення концентрації аміаку.

Три датчики були з'єднані через шину I2C з модулем CC2541 TWI (двопровідний інтерфейс), що відповідає контактам 15 (послідовні дані — SDA) та 20 (послідовний тактовий сигнал — SCL) плати HM-10, шляхом розміщення двох

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

підтягуючих резисторів 4,7 кОм на двох лініях. Крім того, датчик CCS811 перебував у стані сну, коли вимірювання не було потрібне, що зменшувало споживаний датчиком струм (тобто лише 19 пА при живленні 1,8 В); датчик був активований шляхом пробудження лінії nWAKE (низький активний рівень) через GPIO (тобто контакт P1011) плати НМ-10, а потім встановлення третього режиму вимірювання (так званого Mode 3) у регістрі MEAS_MODE; після цього слід очікувати 10 хвилин до початку вимірювання. Аналогічно, датчик аміаку (MiCS-5914) був увімкнений за 10 хвилин до зчитування, що дозволило датчику досягти оптимальної робочої температури. Такий часовий інтервал був визначений за допомогою різних експериментальних випробувань, проведених на двох газових датчиках (для TVOC, CO₂ та NH₃ відповідно), шляхом порівняння отриманих вимірювань з результатами двох комерційних газових детекторів, а саме комбінованого детектора TVOC та CO₂ та іншого детектора для аміаку.

Блок живлення базується на понижувальному регуляторі напруги ХС6206-3.3 для адаптації напруги, що забезпечується літій-полімерним акумулятором ємністю 2500 мАг, до 3,3 В, необхідного для всіх пристроїв, включених до мітки BLE (рисунок 3.7).

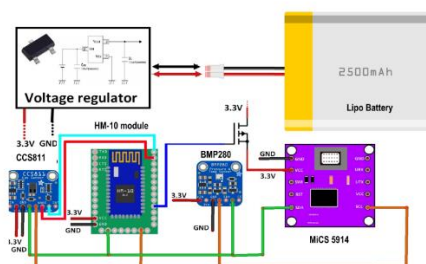


Рисунок 3.7 - Схематичне зображення з'єднань між різними компонентами, що складають смарт-тег.

Вартість розробленої смарт-мітки BLE є низькою, близько 25-30 євро, включаючи всі розділи, незважаючи на її кращі функціональні можливості порівняно з іншими конкурентними пристроями, присутніми на ринку, які зазвичай контролюють лише одну величину (наприклад, температуру або один вид газу).

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Однак ця вартість легко амортизується, враховуючи, що пристрій можна використовувати повторно протягом тривалого часу, як було описано раніше.

3.3 Оцінка ефективності системи та перспективи подальшого розвитку

Розроблену бездротову сенсорну мережу (WSN) було протестовано з метою визначення ефективного споживання енергії кожним типом вузлів і, таким чином, встановлення енергетичної автономності використовуваного пристрою живлення. Зокрема, нижче наведено споживання енергії сенсорним вузлом для різних режимів роботи та сценаріїв. Як описано вище, оригінальний регулятор напруги ESP8266 NodeMCU (модель AMS1117-3.3) був замінений на більш ефективний (модель MCP1825S-3302E) з точки зору струму спокою та напруги падіння для зменшення споживання енергії вузлом.

Споживання енергії є важливим фактором продуктивності та терміну служби бездротової сенсорної мережі (WSN). Для аналізу роботи мережі ми враховуємо, що кожен вузол надсилає своє ім'я, ідентифікатор, який визначає кількість пакетів даних, надісланих кожним вузлом, силу сигналу Wi-Fi під час передачі та час надсилання. У цій роботі наголошується на споживанні енергії через вплив технологій Wi-Fi та BLE. Хоча це цікаво, інші показники продуктивності, такі як статистика зв'язку, не враховуються в цьому аналізі, але очікується, що будуть запропоновані в майбутніх роботах. Деякі з цих параметрів пов'язані з кількістю пакетів, де всі повідомлення можна сортувати за вузлом та кількістю надісланих повідомлень, щоб отримати втрачені повідомлення в мережі. За такої схеми повідомлення, які не були позначені як послідовні номери, шукаються, щоб перевірити відсутність стрибків. Крім того, вузли мають таймери, які контролюють втрати або затримки, та ковзні вікна для керування потоком під час надсилання даних. Крім того, оскільки мережа синхронізує всі вузли, достатньо відняти час прийому та час випромінювання, щоб усунути затримку під час прийому повідомлень. Цікаво відзначити, що вузли продовжують надсилати номери

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повідомлень без перерви, демонструючи високу пропускну здатність мережі проти збоїв.

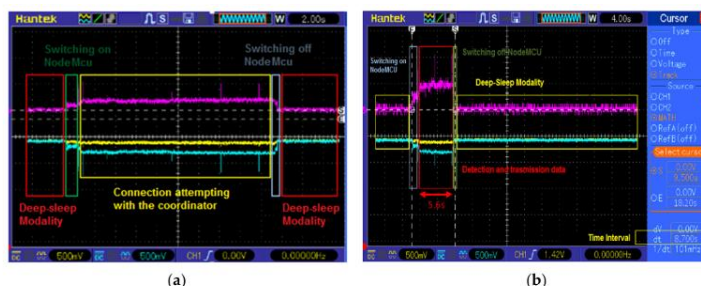


Рисунок 3.8 - Осцилографічні криві, пов'язані з виводами 4-омного сенсорного резистора

На рисунку 3.8а показано осцилографічні криві, пов'язані з виводами 4-омного сенсорного резистора (жовта та світло-блакитна лінії) та їхньою різницею (фіолетова), що дозволяє легко розрізнити кожен режим функціонування вузла, а саме: пробудження (зелений прямокутник), невдала передача даних до недоступного вузла-координатора (жовтий прямокутник) та подальше повернення до режиму глибокого сну (вимкнення NodeMcu, червоний прямокутник). Як описано вище, вузол-сенсор намагається встановити з'єднання з вузлом-координатором протягом 20 секунд, інакше він повертається в режим глибокого сну, щоб зменшити споживання енергії (рис. 3.8а). Потім визначаються значення струму, що поглинається вузлом датчика, протягом усіх робочих фаз. (а) Осцилографічні сигнали, отримані під час невдалої спроби з'єднання вузла датчика з вузлом-координатором; через 20 с вузол повертається в режим глибокого сну, щоб зменшити споживання енергії; (б) осцилографічні сигнали, отримані під час успішного з'єднання вузла датчика з вузлом-координатором; для завершення фаз виявлення та передачі даних знадобилося лише 5,6 с.

На малюнку 3.8b, ті ж сигнали, що й на рисунку 3.8а повідомляються, коли між сенсорним вузлом та відповідним координатором встановлено з'єднання. Спочатку сенсорний вузол виходить з режиму глибокого сну, вмикає підключені датчики для отримання даних, що цікавлять, а потім встановлює

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

з'єднання з вузлом-координатором; на цьому етапі дані збираються датчиками та надсилаються до вузла-координатора (червоний прямокутник). Нарешті, ESP8266 NodeMCU вимикає підключені датчики (зелений прямокутник) та повертається в режим глибокого сну (жовтий прямокутник) на 30 хвилин. Аналогічно, були визначені поточні значення та тривалість різних робочих фаз; часовий інтервал, необхідний для завершення фаз збору та передачі, дорівнює 8,7 с (рис. 3.8b), тоді як для передачі даних потрібен час 5,6 с. Інтервал часу, необхідний для встановлення з'єднання, змінюється протягом різних робочих циклів залежно від доступності вузла-координатора; проте середнє значення 3,1 с було визначено на основі кількох проведених експериментальних випробувань.

Прототип смарт-мітки BLE був реалізований шляхом розміщення плат сенсорних розгалужень на платі для прототипування та реалізації з'єднань на її зворотному боці (рис. 3.9); для спрощення підключення модуль НМ-10 був припаяний до адаптивної плати, щоб оголити всі його контакти, що полегшує підключення до програматора.



Рисунок 3.9 - Прототип розробленої смарт-мітки, розміщеної всередині пластикової коробки з перфорованою кришкою.

Крім того, блок регулювання напруги, заснований на мікросхемі XC6206-3.3, був розміщений на задній панелі макетної плати, як і акумулятор LiPo на дні пластикового корпусу, під електронними платами; для наочності акумулятор LiPo показано на рисунку 3.9, крім плати. Усі згадані компоненти були розташовані всередині пластикової коробки з перфорованою кришкою, щоб забезпечити правильне визначення параметрів всередині контейнера, де встановлено датчик.

Режим роботи розробленого смарт-тегу BLE описано в блок-схемі, наведеній на

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

рисунку 3.10; спочатку необхідно визначити налаштування різних інтерфейсів та регістрів мікроконтролера CC2541 (мікроконтролера на платі модуля керування НМ-10), щоб дозволити підключення до використовуваних датчиків.

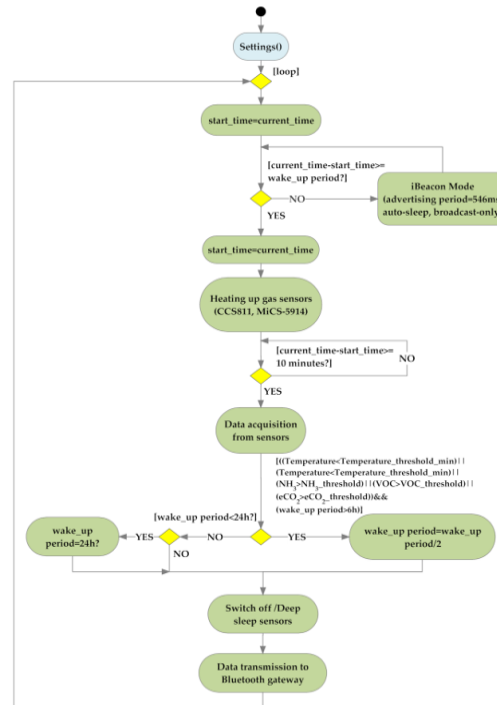


Рисунок 3.10 - Блок-схема, пов'язана з режимом роботи розробленої смарт-мітки Bluetooth низького енергоспоживання, розміщеної всередині контейнера, де зберігаються сільськогосподарські продукти.

Після цього, протягом інтервалу часу, що дорівнює періоду wake_up (значення за замовчуванням 24 год), модуль НМ-10 встановлюється в режим iBeacon, транслюючи рекламний пакет кожні 546,25 мс (інтервал часу між рекламними пакетами, використовуючи методи halSleep() та osal_set_event() стеку BLE v1.4.1; коли модуль не передає жодних рекламних пакетів, модуль НМ-10 переходить у режим низького енергоспоживання PM3, що дозволяє значно зменшити споживання енергії. Після того, як таймер сну перевищує інтервал часу пробудження (значення за замовчуванням 24 год), модуль НМ-10 перемикається в активний режим, таким чином пробуджуючи датчик CCS811 та вмикаючи, за допомогою CMOS-перемикача, датчик MiCS-5914 на 10 хвилин, дозволяючи їм

досягти робочої температури; як описано раніше, такий інтервал часу був експериментально визначений як мінімальне значення, необхідне двом датчикам для досягнення їхньої робочої температури.

Після цього інтервалу часу також пробуджується датчик температури та вологості BMP280, а потім усі дані отримуються з датчиків та обробляються для вилучення вищезгаданих параметрів (тобто концентрації газу, температури та вологості, рис. 3.10). Після цього кожен параметр порівнюється зі специфічними порогами, обраними як функція типології сільськогосподарської харчової продукції, що зберігається, оскільки кожна типологія харчових продуктів характеризується температурою зберігання та певними типами газів, що вказують на псування харчових продуктів (рисунок 3.10); крім того, такі порогові значення залежать від форми та розміру харчового контейнера, від розташування мітки в контейнері відносно рівня продукту, а також від наявності вентиляції, зокрема, чи харчова упаковка герметична чи відкрита. Порогові значення можна встановити або змінити шляхом перепрограмування смарт-мітки BLE щоразу, коли змінюється сільськогосподарський продукт, що зберігається в контейнері.

Якщо виявляються аномальні значення параметрів, період пробудження скорочується вдвічі порівняно з попереднім, до мінімального значення 6 годин; після цього, лише якщо жоден контрольований параметр не виходить за межі встановлених значень, період пробудження скидається до 24 годин (рис. 3.10). Далі тег BLE вмикає режим глибокого сну для датчиків BMP280 та CCS811 та вимикає датчик MiCS-5914, після чого встановлює з'єднання зі шлюзом Bluetooth, до якого передає отримані дані разом із байтом попередження, який вказує на те, що певний параметр прийняв аномальне значення (стан тривоги). Зокрема, 5 бітів байта попередження пов'язані з 5 параметрами, отриманими тегом BLE, розташованими, як показано на рисунку. 3.11(кожен біт встановлюється в логіку "1" у разі спрацювання тривоги). Нарешті, описаний вище робочий цикл починається знову з інтелектуальної мітки BLE, встановленої в режимі iBeacon, з тим самим налаштуванням, що було повідомлено раніше, для часового інтервалу (24 год, 12 год або 6 год), як визначено в попередньому циклі.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	VOC	eCO ₂	NH ₃	Temperature	Humidity

Рисунок 3.11 - Структура байта попередження, що передається з мітки для сигналізації стану тривоги, пов'язаного з отриманими параметрами.

Як обговорювалося вище, розділом розумного прийняття рішень розробленого фермерського господарства на базі Інтернету речей є програмна платформа, яка дозволяє контролювати та керувати всіма його функціями та пропонує клієнтам деякі додаткові послуги, пов'язані з відстеженням сільськогосподарської продукції; зокрема, платформа включає так званий додаток Campaign Registry, здатний контролювати та оптимізовано встановлювати методи фертигації для кожної контрольованої земельної ділянки на основі наступних вхідних даних та агрономічних моделей:

- Дані WSN, пов'язані з параметрами навколишнього середовища, ґрунту та сільськогосподарських культур;
- Введення даних користувачем, а саме дані, що вводяться фермером або агрономом через спеціальний «Фермерський додаток», встановлений на смартфоні/планшеті;
- Дані, отримані надійними метеостанціями;
- Замовлення на закупівлю, тобто інформація, здатна вплинути на ріст або виробництво певної культури, якщо ринок вимагає більшого або нижчого рівня виробництва.

Хмарна база даних керується професійними користувачами (наприклад, інформатиками або агрономами) для постійного оновлення набору інформації (температури, дані про ґрунт, види добрив, періоди фертигації, погодні умови, стан росту культур), враховуючи будь-які зміни стану землі з часом, для оптимізації якості та врожайності вирощуваної продукції та, водночас, збереження

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			92

благополуччя ґрунту з подальшими перевагами для екосистем. Крім того, агроном може оновлювати дані в хмарній базі даних на основі польових спостережень, пов'язаних з фенологічним розвитком культур. Крім того, він також може перевірити правильність роботи системи фертигації, надіславши «запит статусу» через додаток для смартфона на платформу віддаленого керування, а також ідентифікувати ділянку землі за допомогою свого смартфона, зчитавши QR-код, розміщений біля кожної ділянки оброблюваної землі, щоб переглянути або оновити відповідну інформацію, що міститься в додатку «Реєстр кампаній» програмної платформи, і, нарешті, він може запросити виконання певної обробки фертигації або боротьби зі шкідниками на відповідній ділянці землі, минаючи віддалене автоматизоване управління.

Розроблена програмна платформа автоматично зберігає детальну інформацію про обробку, виконану на наступних культурах протягом усього періоду росту, дозволяючи клієнтам перевіряти через відповідний інтерфейс користувача обробку, виконану на розглянутій сільськогосподарській продукції, а отже, її якість, а також розміщувати замовлення на купівлю. За допомогою розробленої платформи споживачі можуть контролювати весь ланцюг постачання агропродовольчої продукції, отримуючи інформацію про свіжість та справжність сільськогосподарської продукції, що забезпечує фермеру додаткові доходи. Крім того, фермер або агроном можуть контролювати та оновлювати дані та параметри загальної агрономічної бази даних, а також керувати виконанням конкретних обробок через розроблену платформу. Клієнти мають доступ лише до інформації про виконані обробки та відстеження продукції. Дані, отримані з агрономічних моделей, які є вирішальними для роботи системи фертигації, зберігаються як у хмарній базі даних, так і в локальній, дані про потреби в поживних речовинах кожної розглянутої типології культури залежно від сезонного періоду, фази росту та конкретних екологічних/географічних/метеорологічних умов. Фактично, можливі режими роботи системи є двома, а саме:

- Метод «знизу вгору»: головний пристрій - це окремий компонент (ПК системи фертигації на сонячній енергії), де виконуються основні операційні

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

операції, зберігаються дані та синхронізуються з хмарною платформою (віддаленим сервером). Таким чином, сервіс гарантовано працює навіть за відсутності або не завжди гарантованого підключення до Інтернету.

- Модальність «зверху вниз»: головним є хмарна архітектура, яка керує та командує необхідними операціями, що виконуються системою сонячного фертигації; крім того, фермер може дистанційно встановлювати цикли фертигації та ділянки землі, де проводити сільськогосподарські обробки.

Система фертигації має два рівні користувача, а саме:

- Рівень 1 -Управління системою: уповноважений користувач має доступ до кожного розділу програмного забезпечення та програми як головний користувач, може створити користувача нижчого рівня (фермер/клієнт), візуалізувати та дистанційно керувати кожною встановленою системою фертигації та керувати всіма її операціями. Крім того, він може оновлювати загальну агрономічну базу даних, додаючи додаткові культури для вирощування або змінюючи параметри та алгоритми розрахунку;

- Рівень 2 - Фермер або Клієнт: він пов'язаний з єдиною системою фертигації, може встановлювати посіви на різних ділянках землі (лише фермер), автоматично або вручну керувати циклами зрошення або фертигації (лише фермер), переглядати історію параметрів посівів та звіти про сертифікацію проведених обробок.

Розроблений застосунок містить систему відстеження вирощуваних сільськогосподарських культур під назвою «Реєстр безкоштовної кампанії для клієнтів», інструмент з відкритим кодом, підключений до загальної агрономічної бази даних, за допомогою якого клієнт може перевіряти сільськогосподарські процеси та стандарти якості ще до оформлення замовлення на купівлю, що забезпечує додаткову цінність для фермера. Програмна платформа дозволяє користувачам дистанційно взаємодіяти із системою управління фермерським господарством, наприклад, перевіряти історичний реєстр різних виконаних сільськогосподарських процесів або оновлювати агрономічну базу даних на основі спостережень безпосередньо на оброблюваних землях, пов'язаних з ростом

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сільськогосподарських культур. Щоб підкреслити функціональність та корисність розробленого застосунку для смартфонів для фермерів або клієнтів, наведено та описано кілька скріншотів. На рисунку 3.12а показано «розділ перегляду», з якого фермер (користувач M1) може перевірити зрошувані сектори (зелений колір); натискаючи кнопку «Стан», увімкнений користувач може контролювати параметри ґрунту та культур, виявлені WSN, тоді як за допомогою кнопки M він може вручну керувати певним процесом для розглянутого земельного сектору, міняючи те, що встановлено DSS на основі агрономічних моделей. На рисунку 3.12b показано розділ «Історія даних» для сектора 1 з хронологією даних WSN та виконаних обробок;



Рисунок 3.12 -Знімки екрана реалізованого за стосунку

«Розділ перегляду», де фермер (користувач M1) має повний огляд вирощуваних культур (а), та «розділ історії даних», за допомогою якого фермер або клієнт контролює параметри культур та виконані обробки для оптимізації росту (б). Зрештою, для перевірки правильності функціонування розробленого комплексу управління фермерським господарством, орієнтованого на Інтернет речей, що складається з сенсорних вузлів, встановлених на оброблюваних землях, та хмарної програмної платформи, було проведено різні вимірювальні кампанії безпосередньо на оброблюваних землях, а отримані результати засвідчили правильність функціонування апаратного та програмного забезпечення.

Як було описано раніше, запропонована система управління та контролю фермерських господарств включає систему відстеження агропродовольчої

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукції вздовж усього сільськогосподарського угіддя, здатну контролювати та обмінюватися основними показниками для визначення умов зберігання та транспортування. Ця система базується на смарт-мітках, поміщені в контейнери, де зберігаються сільськогосподарські продукти. Після того, як продукти прибувають на склад, UUID щойно надійшли контейнери визначається шлюзом Bluetooth (так званим "Вхідний шлюз Bluetooth", на рис. 3.13) , розташованого поблизу зони розвантаження складу; коли знайдено новий UUID, вхідний шлюз оновлює через шлюз Wi-Fi нове розташування контейнера у відносному записі, пов'язаному з виявленим UUID, у хмарній базі даних (тобто базі даних Azure SQL).

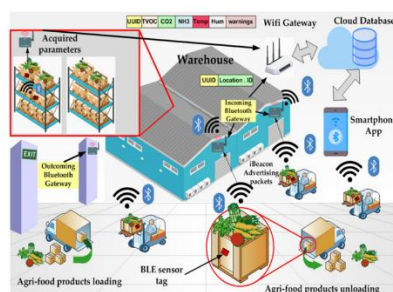


Рисунок 3.13 - Схематичне зображення запропонованої системи відстеження та трасування на основі смарт-міток.

Для проведення тестів виявлення та зв'язку смарт-міток BLE з хмарною платформою (як показано на сценарії на рисунку) було використано комерційний Bluetooth-шлюз; встановивши рівень переданої потужності кожної мітки BLE на 0 дБм, було отримано дальність виявлення 12 м, зокрема, за умови, що марковані контейнери складені для транспортування, досягаючи натомість дальності виявлення до 21 м на відкритому полі. Таким чином, шлюз може бути розташований на в'їзді до складу для виявлення вхідних контейнерів, тоді як усередині складу шлюзи повинні бути рівномірно розподілені (на відстані 12 м один від одного) для отримання даних, що передаються мітками (рисунок 3.13) .

Після виявлення нового контейнера, шлюз Bluetooth надсилає до віддаленої бази даних пакет, що містить його ідентифікатор (тобто UUID) разом із кодом, пов'язаним із новим сховищем (рис. 3.13) . UUID є ключем для всіх

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

операцій, що виконуються в базі даних, а саме для вставки, вибору, оновлення, видалення та виклику товару. Після цього харчові продукти зберігаються на складі, а смарт-мітки BLE, розміщені в контейнерах, періодично надсилають отримані параметри, відповідним чином упорядковані в пакети даних, до шлюзів Bluetooth, розташованих всередині складу. Зокрема, кожна мітка BLE передається пакет розміром 27 байт, причому перші 16 байт представляють її UUID, 6 байтів пов'язані з концентраціями TVOC, CO₂ та NH₃, а по 2 байти - з температурою та вологістю навколишнього середовища (як показано на рисунку 3.13). Нарешті, до пакета додається байт попередження, щоб сигналізувати про аномалії контрольованих параметрів. Дані, пов'язані з певним контейнером, потім зберігаються в записі хмарної бази даних, пов'язаному з UUID тегу BLE; коли контейнер залишає склад і прямує до іншого, він проходить повз інший шлюз, який називається "вихідний шлюз Bluetooth", який оновлює базу даних, повідомляючи про його вихід. Вищеописаний механізм продовжується доти, доки контейнери не будуть доставлені до продуктового магазину або оптового продавця, де також будуть порожні.

Фермер забирає позначені контейнери для подальшого повторного використання; дані, що зберігаються в базі даних і пов'язані з певним UUID, видаляються після закінчення терміну придатності харчового продукту.

Користувач може оцінити інформацію про відстеження та зберігання сільськогосподарської продукції за допомогою мобільного застосунку, розробленого з використанням середовища розробки Android Studio.

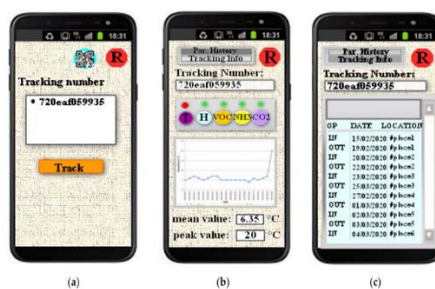


Рисунок 3.14 - Знімки екрана застосунку системи відстеження та простежуваності на основі тегів.

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

Після входу в систему користувач (позначений як R, рис. 3.14a) перенаправляє користувача на головну сторінку програми, де можна ввести UUID контейнера, набравши буквено-цифрові символи у відповідне поле, і, натиснувши кнопку «Відстежити», користувач перенаправляється на сторінку, пов'язану з потрібним контейнером (рисунк 3.14a). Після цього, натискаючи кнопку «Історія параметрів» (рис. 3.14b), користувач може перевірити історію кожного контрольованого параметра, натискаючи кнопку, пов'язану з потрібною величиною (тобто T, H для вологості, VOC, NH₃ та CO₂); над кожною кнопкою додано візуальний індикатор, який сигналізує про аномальні значення відповідного параметра. Крім того, відображається часова тенденція вибраного параметра (наприклад, температура на рисунку 3.14б) разом із його середніми та піковими значеннями. (а) зареєстрований користувач (R) вводить універсальний унікальний ідентифікатор контейнера (UUID); (б) розділ «Історія пар.» із зазначенням історії отриманих параметрів; (с) розділ «Інформація про відстеження», де клієнт перевіряє інформацію про відстеження, пов'язану з введеним UUID.

Натискаючи кнопку «Інформація про відстеження», користувач може відстежувати інформацію про відстеження відповідного контейнера (рисунк 3.14с); фактично, ця сторінка містить таблицю, де детально описані всі переміщення контейнера, що оновлюються з часом за допомогою описаної вище системи відстеження.

Було проведено кілька тестів для перевірки роботи BLE-міток та пов'язаної з ними системи відстеження; смарт-мітку BLE помістили в пластикову коробку (розмірами 50 см x 40 см x 40 см), накриту перфорованою кришкою (30 отворів діаметром 0,6 см), яка містила 5 кг апельсинів, після чого коробку помістили в холодильник з цільовою температурою 5 ° C на 20 днів. На 20-й день пластиковий контейнер вийняли з морозильної камери та залишили при кімнатній температурі (близько 20-25 ° C) ще на 10 днів. Мітку закріпили за допомогою гвинтів на внутрішній поверхні пластикового контейнера на 10 см вище рівня продукту, оскільки, згідно з попередніми тестами, таке положення може забезпечити хорошу здатність пристрою виявляти інформацію та водночас уникнути деяких

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хібних спрацьовувань через локальне накопичення газу. Однак розміри, форма та вентиляція контейнера впливають на реакцію смарт-мітки BLE, оскільки ці фактори визначають концентрацію та розподіл газу всередині контейнера; Таким чином, перед використанням мітки BLE для конкретного контейнера необхідна попередня характеристика, щоб визначити порогові значення для кожного виду газу. Для розглянутого випадку порогові значення були визначені на основі візуальних та нюхових спостережень і встановлені на рівні 581 ppb для TVOC, 176 ppm для NH₃ та 1647 для CO₂.

Якщо концентрація газоподібного виду перевищує вищезгаданий поріг або значення температури та вологості виходять за межі встановлених інтервалів (0-10 °C та 30-70% для апельсинів відповідно), у байті попередження встановлюється біт тривоги, який разом із отриманою інформацією надсилається на програмну платформу. Окрім часових тенденцій, мобільний застосунок показує користувачеві попередження щодо контрольованих величин у вигляді візуального індикатора, який змінює колір із зеленого на червоний у разі тривоги. Наприклад, на рисунку 14b наведено дані, що стосуються контейнера з апельсинами; після того, як контейнер вийнято з холодильника, індикатор, що відповідає температурі (позначений літерою T), змінюється із зеленого на червоний.

Завдяки нещодавній появі передових апаратних та програмних рішень, які дозволяють фермерам контролювати в режимі реального часу ріст, збір врожаю та подальшу трансформацію вирощуваних культур, сільськогосподарські компанії можуть підвищити врожайність, харчову якість та безпеку вирощуваної продукції з точки зору здоров'я, зменшити виробничі витрати та негативний вплив на здоров'я та навколишнє середовище відповідно до сучасних принципів економічної, екологічної та соціальної стійкості. Була розроблена система управління та відстеження, яка використовує сучасні технології, здатна підтримувати діяльність фермерських господарств у їхньому виробництві, а також користувачів хмарної платформи в управлінні процесами вирощування безпосередньо на полі та відстеженні продукції, зібраної з землі, вздовж усього виробничого ланцюга. Була розроблена система фертигації для управління частотою та

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

типологією процесів зрошення, якою керує хмарна програмна платформа, що реалізує алгоритм прийняття рішень на основі інформації, наданої метеорологічною службою, та бездротової сенсорної мережі (WSN), встановленої на полі. Зокрема, рішення щодо термінів та кількості добрив ґрунтуються на повній сучасній агрономічній базі даних, яка являє собою інтелектуальну частину системи фертигації, відтворюючи для заданого типу культур потреби у воді та добривах залежно від сезону, фази росту, типології ґрунту, а також параметрів ґрунту та навколишнього середовища. Інформація в агрономічній базі даних була визначена шляхом збору та синтезу результатів попередніх наукових робіт та відомих агрономічних моделей (таких як модель балансу поживних речовин - NB) та надана програмній платформі за допомогою хмарної бази даних MySQL. Інтеграція системи фертигації з користувацькою агрономічною базою даних є головним нововведенням запропонованої роботи. Розроблений вузол WSN є енергетично автономним завдяки системі збору сонячної енергії належного розміру; також було обговорено архітектуру прошивки вузла датчика, а також способи роботи для управління збором даних від датчиків та зв'язку з вузлом координатора WSN. Зокрема, споживання енергії вузлами бездротової сенсорної мережі (WSN) було мінімізовано завдяки використанню вбудованих низькоенергетичних модальностей плати NodeMCU та правильному налаштуванню часу фаз збору даних та зв'язку, а також стану підключених датчиків. Були проведені експериментальні випробування для оцінки споживання енергії вузлом у різних робочих фазах, що дозволило досягти тривалого терміну служби використаного LiPo-акумулятора (більше 13 днів без будь-якої доступності сонячної енергії, що є нереалістичним екстремальним випадком).

Таким чином, досягається автоматизоване та відстежуване управління обробками, що виконуються на певній ділянці землі, що зменшує витрати води та добрив, а також мінімізує стрес, спричинений рослинами, тим самим підвищуючи врожайність. Відповідний мобільний додаток дозволяє користувачам повністю контролювати всі функції системи фертигації, а також перевіряти всі обробки, виконані на певній ділянці землі. Крім того, розроблена система фертигації

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє впроваджувати спеціальні стратегії управління, спрямовані на прогнозування або відтермінування збору продукції, що здійснюється шляхом правильного налаштування термінів зрошення/фертигації на основі запитів клієнтів; ця наукова інновація дозволяє фермеру досягти економічних вигод, а також зменшити кількість сільськогосподарських та харчових відходів.

Було розроблено систему відстеження та трасування на основі смарт-міток BLE, здатну контролювати переміщення сільськогосподарської продукції від поля вирощування до споживачів та умови її зберігання. Щоб зменшити енергоспоживання розробленої мітки BLE, було модифіковано комерційні плати мікроконтролера та сенсорних панелей, що призвело до створення пристрою багаторазового використання з тривалим терміном служби, що є новинкою порівняно з конкуруючими системами, описаними в науковій літературі, а також на ринку. Хімічні/фізичні величини, що виявляються смарт-міткою BLE, були обрані для забезпечення надійних маркерів стану свіжості різних типів продуктів (овочі, м'ясо, риба тощо), що робить його універсальним інструментом, адаптованим до різних сценаріїв. З огляду на існуючі наукові роботи, де для виявлення псування конкретного продукту, що зберігається, контролюється лише одна фізична або хімічна величина, натомість розроблена мітка BLE здатна одночасно виявляти кілька кількостей, охоплюючи таким чином широкий спектр застосувань. Крім того, порогові значення, що використовуються в прошивці НМ-10, повинні бути встановлені залежно від типології харчових продуктів, кількості продукту, що зберігається, а також типології та розміру використаної тари; Таким чином, розроблену мітку BLE можна легко адаптувати, після попередньої характеристики, до будь-якого типологічного складу контейнера. Крім того, завдяки оптимізації прошивки НМ-10, як у iBeacon, так і в режимах збору даних, а також впровадженню належних стратегій роботи, було забезпечено зниження енергоспоживання мітки BLE.

Прототип смарт-мітки BLE, заснованої на мікросхемі CC2541 та недорогих датчиках, був протестований для перевірки її роботи та визначення енергетичної автономності (до 5,6 місяців), значення, яке, наскільки нам відомо,

					БР.ІП - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не досягається іншими пристроями, представленими в літературі, враховуючи також, що наша мітка BLE дозволяє виявляти різні хімічні/фізичні величини, як уже зазначалося раніше. Користувач може дистанційно отримувати доступ до відстеження та зберігання інформації за допомогою належним чином розробленого мобільного додатку, синхронізованого з хмарною базою даних відстеження. Було проведено кілька тестів для перевірки функціональності мітки; зокрема, ми повідомили про результати, пов'язані з міткою BLE, нанесеною на закриту пластикову або полістирольну коробку з апельсинами або філе тріски відповідно всередині, та моніторингом параметрів, що цікавлять, протягом 30 днів (20 днів у холодильнику та 10 днів на вулиці) за допомогою розробленого мобільного додатку.

3.4 Висновок по розділу

У третьому розділі було розглянуто розробку та оцінку ефективності програмної системи інтеграції сенсорів для агротехніки. Проведено проєктування архітектури системи збору та обробки сенсорних даних з урахуванням вимог до масштабованості та надійності. Реалізовано сенсорний модуль і програмне забезпечення для моніторингу агропоказників, що забезпечують автоматичний контроль стану сільськогосподарських процесів. Також виконано оцінку ефективності розробленої системи та визначено перспективи її подальшого розвитку. Отримані результати підтверджують доцільність використання IoT-технологій і сенсорних систем для підвищення ефективності агротехнічних процесів та розвитку розумного сільського господарства.

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У процесі реалізації бакалаврської роботи було досліджено та розроблено програмні рішення для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки. Робота є комплексним дослідженням, спрямованим на створення ефективної, масштабованої та надійної системи збору, передачі та обробки даних із сенсорних пристроїв у сільському господарстві. У процесі виконання було проаналізовано сучасні підходи до побудови IoT-систем, досліджено технології інтеграції сенсорів і реалізовано програмну систему, що відповідає сучасним вимогам до якості програмного забезпечення.

На початковому етапі було проведено аналіз предметної області, визначено основні проблеми існуючих рішень, зокрема складність інтеграції різнорідних сенсорів, обмежену масштабованість систем та недостатню ефективність обробки великих обсягів даних. Було сформовано функціональні та нефункціональні вимоги до системи, які включають забезпечення надійного збору даних, підтримку роботи в реальному часі, масштабованість, безпеку та зручність використання.

У теоретичній частині роботи розглянуто основи Інтернету речей у агротехніці, принципи функціонування сенсорних систем, а також підходи до збору, передачі та обробки даних. Проаналізовано роль хмарних технологій та їх значення для побудови сучасних агротехнічних систем. Це дозволило визначити ключові компоненти ефективної IoT-архітектури.

У другому розділі досліджено методи та програмні рішення для інтеграції сенсорів, зокрема розглянуто сучасні інформаційні системи та платформи управління агротехнічними процесами. Було проаналізовано підходи до обробки даних, використання комунікаційних протоколів та інтеграції з хмарними сервісами, що забезпечують ефективне функціонування IoT-систем.

У практичній частині роботи було спроектовано архітектуру системи збору та обробки сенсорних даних, реалізовано програмне забезпечення для моніторингу агропоказників та інтеграції сенсорних пристроїв. Розроблена система

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ПЗ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує передачу даних у реальному часі, їх обробку та подальшу візуалізацію для користувача, що дозволяє підвищити ефективність управління агротехнічними процесами.

Проведено тестування програмного забезпечення, яке включало перевірку функціональності, продуктивності та надійності системи. Результати тестування показали, що розроблене рішення забезпечує стабільну роботу при обробці сенсорних даних та відповідає поставленим вимогам. Було виявлено окремі аспекти, що потребують подальшої оптимізації, зокрема підвищення продуктивності при великих навантаженнях і вдосконалення механізмів обробки даних.

Загалом, розроблена система відповідає поставленим цілям і демонструє ефективність застосування програмних рішень для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки. Основними перевагами є можливість масштабування, адаптивність до різних типів сенсорів, підтримка роботи в реальному часі та зручність використання. Водночас існують певні обмеження, зокрема залежність від якості мережевого з'єднання, необхідність додаткових ресурсів для обробки великих обсягів даних та складність інтеграції з деякими застарілими пристроями.

У подальшому доцільним є розширення функціональних можливостей системи шляхом інтеграції аналітичних модулів, використання методів машинного навчання для прогнозування агропоказників, а також підвищення рівня автоматизації управління агротехнічними процесами. Це дозволить підвищити ефективність використання ресурсів, зменшити витрати та покращити якість сільськогосподарського виробництва.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ashton, K. (2009). That ‘Internet of Things’ thing. *RFID Journal*.
<https://www.rfidjournal.com>
2. Vermesan, O., & Friess, P. (2014). *Internet of Things: From Research and Innovation to Market Deployment*. riverpublishers.com.
<https://www.riverpublishers.com>
3. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things: A vision. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
4. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
5. Ray, P. (2018). Internet of Things for smart agriculture. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 10(2), 123–137.
<https://doi.org/10.3233/AIS-180509>
6. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. (2017). Big data in smart farming. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
7. Zhang, Q., Chen, M., & Li, L. (2020). IoT-based smart agriculture systems. *IEEE Access*, 8, 123456–123470.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.1234567>
8. Microsoft Azure IoT Documentation. (2025). [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot/).
<https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot/>
9. AWS IoT Core Documentation. (2025). [docs.aws.amazon.com](https://docs.aws.amazon.com/iot/).
<https://docs.aws.amazon.com/iot/>
10. Google Cloud IoT Documentation. (2025). [cloud.google.com](https://cloud.google.com/iot/docs).
<https://cloud.google.com/iot/docs>
11. MQTT Protocol Specification. (2023). mqtt.org. <https://mqtt.org>

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ІІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

12. CoAP Protocol Documentation. (2024). ietf.org.
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>
13. Node-RED Documentation. (2025). nodered.org. <https://nodered.org/docs>
14. Arduino Documentation. (2025). arduino.cc. <https://docs.arduino.cc>
15. Raspberry Pi Documentation. (2025). raspberrypi.org.
<https://www.raspberrypi.org/documentation/>
16. MongoDB Documentation. (2025). mongodb.com.
<https://www.mongodb.com/docs/>
17. PostgreSQL Documentation. (2025). postgresql.org.
<https://www.postgresql.org/docs/>
18. .NET IoT Libraries. (2025). learn.microsoft.com.
<https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/iot/>
19. Docker Documentation. (2025). docker.com. <https://docs.docker.com>
20. Kubernetes Documentation. (2025). kubernetes.io.
<https://kubernetes.io/docs/>
21. OWASP IoT Top Ten. (2024). owasp.org. <https://owasp.org/www-project-internet-of-things/>
22. ISO/IEC 30141:2018 Internet of Things Reference Architecture. iso.org.
<https://www.iso.org>
23. ISO/IEC 27001 Information Security Management. (2024). iso.org.
<https://www.iso.org/isoiec-27001-information-security.html>
24. Cisco. (2024). IoT in agriculture solutions. cisco.com.
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/agriculture.html>
25. IBM. (2024). Smart farming with IoT. ibm.com.
<https://www.ibm.com/topics/iot-agriculture>
26. Siemens. (2024). Digital agriculture solutions. siemens.com.
<https://www.siemens.com/agriculture>
27. Bosch IoT Suite Documentation. (2025). bosch-iot-suite.com.
<https://bosch-iot-suite.com>

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ІІЗ	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. ThingSpeak IoT Platform. (2025). mathworks.com.
<https://thingspeak.com>
29. Firebase Documentation. (2025). firebase.google.com.
<https://firebase.google.com/docs>
30. Grafana Labs. (2025). Monitoring and visualization tools. grafana.com.
<https://grafana.com/docs/>
31. Prometheus Monitoring. (2025). prometheus.io.
<https://prometheus.io/docs/>
32. Khan, M., & Salah, K. (2018). IoT security challenges. *Future Generation Computer Systems*, 82, 395–411. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.11.022>
33. Li, S., Xu, L., & Zhao, S. (2015). The Internet of Things: A survey. *Information Systems Frontiers*, 17, 243–259. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
34. Kim, Y., Evans, R., & Iversen, W. (2008). Remote sensing and control of irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.009>
35. Balafoutis, A., et al. (2017). Precision agriculture technologies. *Biosystems Engineering*, 153, 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.003>
36. Patel, K., & Patel, S. (2016). Internet of Things-IOT: Definition, characteristics, architecture. *IJESC*, 6(5), 6122–6131.
37. Somov, A., et al. (2018). Deployment and evaluation of IoT devices in agriculture. *Sensors*, 18(5), 1518. <https://doi.org/10.3390/s18051518>
38. Zhang, D., et al. (2019). Smart farming IoT platform. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8799–8810. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2927162>
39. Newman, S. (2021). *Building Microservices*. oreilly.com.
<https://www.oreilly.com>
40. Martin, R. C. (2017). *Clean Architecture*. pearson.com.
<https://www.pearson.com>

					БР.ІІІ - 81.00.00.000 ІІЗ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: " Програмні рішення для інтеграції сенсорів у системи Інтернету речей для агротехніки "

Обсяг пояснювальної записки: 104 аркушів

Дата закінчення бакалаврської роботи 10 червня 2026р.

Підпис студента _____