

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Автоматизована система збору даних у сільському господарстві
Назва теми

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ
Шифр

Виконав здобувач 3 курсу, група АКІТРС-23-1  Максим КОЗАК
Шифр Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник д-р техн. наук, проф.  Валерій МАРТИНЮК
Науковий ступінь, учене звання Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.  Галина РАДЕЛЬЧУК
Науковий ступінь, учене звання Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки

 Людмила КОРЕЦЬКА
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

19.06.2026р.
Дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій
Кафедра Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА

07 лютого 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Козаку Максиму Віталійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Автоматизована система збору даних у сільському господарстві

Керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д-р техн. наук, проф.

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

Затверджено наказом ректора університету від 20 січня 2026 р. № 7

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики





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

Вступ. Проблематика збору даних у сільському господарстві. Основна частина. Розробка програми роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві. Висновки.

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

Презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
Вступ	15.02.2026 р.	виконано
1 Проблематика збору даних у сільському господарстві	15.03.2026 р.	виконано
2 Основна частина	15.04.2026 р.	виконано
3 Розробка програми роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві	15.05.2026 р.	виконано
Висновки	25.05.2026 р.	виконано

Студент


Підпис

Максим КОЗАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система збору даних у сільському господарстві».

Автор роботи: Максим КОЗАК

Керівник роботи: Валерій МАРТИНЮК

Пояснювальна записка: 71 с., 14 рис., 40 джерел.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

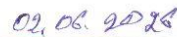
АЛГОРИТМ, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.

Мета роботи: розробка автоматизованого пристрою збору даних у сільському господарстві на основі технології LoRaWAN та програмного забезпечення з відкритим кодом, що дозволить здійснювати локальний моніторинг кліматичних показників без залежності від зовнішніх провайдерів зв'язку.

Обґрунтовано вибір технологічного стеку та розроблено архітектуру дворівневої системи моніторингу агрофізичних показників. Показано, що використання стандарту LoRaWAN у поєднанні з серверною платформою ChirpStack є оптимальним рішенням для умов сучасного точного землеробства завдяки високій проникаючій здатності сигналу, енергоефективності, гнучкості масштабування та низькій вартості розгортання крайових точок збору даних порівняно з традиційними стільниковими або Wi-Fi мережами.



Підпис студента



Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	С. 6
1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	9
1.1 Особливості збору даних у сільському господарстві.....	9
1.2 Особливості систем Інтернету речей.....	11
1.3 Особливості глобальної мережі дальнього радіуса дії LoRaWAN.....	15
1.3 Висновки до першого розділу.....	20
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві.....	22
2.2 Вибір датчиків для автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві.....	26
2.3 Висновки до другого розділу.....	41
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	43
3.1 Алгоритм роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві.....	43
3.2 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві.....	46
3.3 Висновки до третього розділу.....	60
ВИСНОВКИ.....	63

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система збору даних у сільському господарстві Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Козак М.В.		21.06.25				
Перевір.		Мартинюк В.В.		22.06.25			4	71
Реценз.						<i>ХНУ, АКІТРс-23-1</i>		
Н. контр.		Радельчук Г. І.						
Затверд.		Корецька Л. О.						

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективне управління сучасним фермерським господарством неможливе без оперативної інформації про стан полів та активів. Вологість ґрунту, температура повітря, кількість опадів та інші кліматичні показники є критично важливими факторами, які безпосередньо впливають на прийняття рішень агрономами та керівниками господарств. Моніторинг цих показників у режимі реального часу дозволяє оптимізувати використання ресурсів, зменшити ризики втрати врожаю та підвищити загальну рентабельність виробництва.

Однак впровадження систем моніторингу часто стримується відсутністю надійного Інтернет з'єднання на віддалених полях, високою вартістю комерційних рішень та складністю їх інтеграції.

Автоматизований пристрій збору даних на базі технології LoRaWAN дозволяє вирішити ці проблеми завдяки великому радіусу дії, низькому енергоспоживанню та можливості розгортання автономних мереж без обов'язкового доступу до глобальної мережі Інтернет.

Актуальність роботи зумовлена потребою у створенні доступного, енергоефективного та автономного автоматизованого пристрою збору агрокліматичних даних, який забезпечує надійне збереження та передачу інформації в умовах обмеженого зв'язку.

Метою роботи є розробка автоматизованого пристрою збору даних у сільському господарстві на основі технології LoRaWAN та програмного забезпечення з відкритим кодом, що дозволить здійснювати локальний моніторинг кліматичних показників без залежності від зовнішніх провайдерів зв'язку.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

– проаналізувати існуючі методи та засоби моніторингу в сільському господарстві, зокрема технологію LoRaWAN;

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити структурну схему системи збору даних та обґрунтувати вибір компонентної бази;
- розробити алгоритм роботи автономної мережі датчиків та локального сервера;
- створити програмне забезпечення для кінцевих пристроїв та шлюзу збору даних.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого моніторингу параметрів навколишнього середовища в сільському господарстві.

Предметом дослідження є автоматизований пристрій збору даних на основі технології LoRaWAN.

Практична значимість отриманих результатів.

У роботі розроблено прототип автономної системи моніторингу погодних умов та стану ґрунту. Використання розробленого пристрою дозволяє фермерським господарствам отримувати точні дані для аналітики та планування робіт без необхідності сплачувати щомісячну абонплату за зв'язок та без прив'язки до покриття мобільних операторів.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 71 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі: 14 рисунків, список використаних джерел вміщує 40 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність кваліфікаційної роботи, сформульовано мету та задачі кваліфікаційної роботи, відображено її практичне значення.

В першому розділі були розглянуті наступні питання: огляд сучасних технологій IoT в агросекторі, аналіз проблем впровадження "розумного землеробства" та переваги використання протоколу LoRaWAN для побудови автономних мереж.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

У другому розділі розроблено структурну схему автоматизованого пристрою, проведено вибір апаратних компонентів (мікроконтролерів, датчиків, трансиверів) та описано принципи їх взаємодії.

У третьому розділі розроблено програмне забезпечення для вузлів датчиків та локального сервера, реалізовано алгоритми обробки та візуалізації даних, а також проведено тестування працездатності розробленої системи.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1 Особливості збору даних у сільському господарстві

Сільське господарство може отримати вигоду від використання під'єднаних пристроїв до Інтернету. Технології та дані, які вони накопичують, здатні змінити кожен аспект фермерського господарства. Компанії у сфері рослинництва пропонують низку технологічних рішень для безлічі аграрних проблем [1 - 4].

Цифрове сільське господарство – це термін, який позначає впровадження цифрових інструментів у всі аспекти діяльності ферми та охоплює всі інструменти й завдання, які можуть вважатися точними або розумними [5].

Багато наявних на ринку рішень часто описуються як приклади точного землеробства. Точне землеробство – це застосування сучасних інформаційних технологій для отримання, обробки та аналізу багато джерельних даних високої просторової та часової роздільної здатності для прийняття рішень та операцій в управлінні рослинництвом [6].

Прикладами компаній, які пропонують комплекси продуктів для точного землеробства, є CNH, AGCO, John Deere, Trimble та Granular. Кожна з них пропонує власний підхід до апаратних та програмних засобів, але всі вони мають єдину мету – підвищення ефективності [7].

Компанія John Deere, яка позиціонує себе як лідер галузі в забезпеченні фермерів необхідними інструментами точного землеробства, традиційно відома своїми зеленими тракторами [8].

Останніми роками вони прагнуть трансформуватися з виключно виробника обладнання в технологічну компанію, орієнтовану на дані. Багато в чому прагнення John Deere орієнтуватися на дані є прикладом того, як вони хочуть вести бізнес, як прагне працювати решта галузі та де існують поточні підводні камені [9].

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

Шлях Deere починається з інтеграції їхньої техніки в Інтернет речей, щоб зробити кожну машину підключеним пристроєм. Конкретними продуктами, які очолюють цю ініціативу, є апаратне забезпечення, таке як дисплеї та GPS-приймачі, можливості підключення через платформу JDLink™, а також засоби візуалізації через програмне забезпечення John Deere Operations Center [10].

Інші продукти включають датчики, орієнтовані на сільськогосподарську техніку, погодні дані, оптимізацію посівного матеріалу та зрошення, які об'єднуються для формування ширшої екосистеми управління фермою [11].

Переваги цієї архітектури IoT, а також ті, які пропонуються конкурентами, є зрозумілими, але викликають певні занепокоєння у потенційних користувачів. Найбільш вагомим для Deere є їхній підхід до права власності на дані [12].

Датчики працюють, збираючи дані з ферми покупця, але John Deere, як і інші компанії, надає клієнту доступ лише до певних показників. Ця модель викликала невдоволення тих, хто стверджує, що вони повинні володіти всіма своїми даними та бути вільними від обмежень [13].

Лише нещодавно Deere почала виправляти цю ситуацію, досягнувши угоди з Американською федерацією фермерських бюро щодо права фермерів на ремонт власного обладнання, що може призвести до розширення доступу [14].

Додаткові труднощі для Deere та інших включають відсутність надійного бездротового зв'язку в сільській місцевості, скептичне ставлення фермерів до цієї технології, високі супутні витрати та побоювання щодо безпеки даних. Такі проблеми підкреслюють необхідність у незалежних інструментах та рішеннях з відкритим кодом, щоб фермери могли налагоджувати канали даних у своїх господарствах, долаючи деякі з цих перешкод [15].

Для цього варіанту використання мережевих протоколів, таких як глобальна мережа дальнього радіуса дії LoRaWAN, є відповідним рішенням для створення інфраструктури IoT. Цей протокол, який базується на радіочастотах, зосереджений на компромісі: зменшення пропускної здатності передачі даних

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		10

заради меншого енергоспоживання та більшого радіуса дії [16].

В сільськогосподарському середовищі це дозволяє створювати мережу там, де електроживлення не завжди доступне, а також на полях просапних культур, які простягаються на великі площі. Наразі LoRaWAN не пропонується як послуга традиційними мережевими провайдерами і ще не набула широкого розгортання з боку роздрібних продавців [17].

Мало хто з фермерів, які цікавляться IoT і знайомі з протоколом, мають вільний час протягом дня для дослідження та розробки власних рішень. Тому актуальним завданням є створення доступного механізму для фермерів, щоб вони могли використовувати пристрої LoRaWAN та IoT для відстеження показників полів і конкретних активів, а також брати безпосередню участь в управлінні своїми операціями у світі, керованому даними [18].

1.2 Особливості систем Інтернету речей

Хоча системи IoT можуть мати різноманітні конструкції та залучати численні технології, деякі з них функціонують через поєднання чотирьох окремих етапів:

- рівень пристроїв;
- комунікаційний рівень;
- рівень зберігання та обробки даних;
- прикладний рівень [19].

Разом ці рівні працюють послідовно, утворюючи конвеєр IoT, де інформація збирається, зберігається, передається та стає доступною для перегляду.

Пристрої, які також називають рівнем сприйняття або фізичним рівнем, є початком системи IoT. Це апаратне забезпечення переважно збирає інформацію та перетворює її на цифровий. Основними технологіями, що виконують цю функцію, є датчики, камери, мікроконтролери, виконавчі механізми та RFID-

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мітки [20].

У випадку з датчиками, один або кілька з них можуть бути підключені до сенсорного вузла. Тоді як датчик здійснює вимірювання, вузол відповідає за передачу результатів цього вимірювання [21].

Комунікаційний або мережевий рівень – це інфраструктура, яка відповідає за передачу даних через дротове або бездротове з'єднання [22].

У випадку бездротових з'єднань пристрої взаємодіють за допомогою певного мережевого протоколу. Протокол – це набір правил, які регулюють форматування та обробку даних у мережі для забезпечення взаємодії між різними пристроями [23].

Існує кілька мережевих протоколів IoT, а саме Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, 4G LTE, LoRaWAN, NB-IoT та Sigfox. При виборі протоколу для певної архітектури необхідно збалансувати компроміси кожного з них відповідно до потреб конкретного застосування [24].

Мережеві протоколи можна класифікувати за рівнем енергоспоживання та дальністю передачі сигналу:

- до мереж із малим радіусом дії відносяться Wi-Fi та Bluetooth;
- до мереж класу LPWAN, а саме енергоефективні мережі далекого радіуса дії, відносяться LoRaWAN та NB-IoT [25].

Додатковою характеристикою для порівняння є обсяг переданих даних, який зазвичай вимірюється у стандартних одиницях, а саме у байтах. Враховується економічна ефективність передачі даних, а саме вартість за гігабайт. Крім того, кількість байтів, яка може бути передана за певний проміжок часу, називається швидкістю передачі даних [26].

Діаграма співвідношення дальності та швидкості передачі даних для різних протоколів зображена на рисунку 1.1. Аналізуючи рисунок 1.1 можна зробити висновок, що у випадках, коли необхідно передати великий обсяг даних за короткий проміжок часу, а вартість та енергоспоживання не є обмежувальними факторами, відповідним рішенням може бути 4G LTE [27].

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як окреслено в першому шарі, пристрої, які збирають інформацію, такі як сенсорний вузол, можуть використовувати один із цих протоколів, щоб передати дані на шлюз.

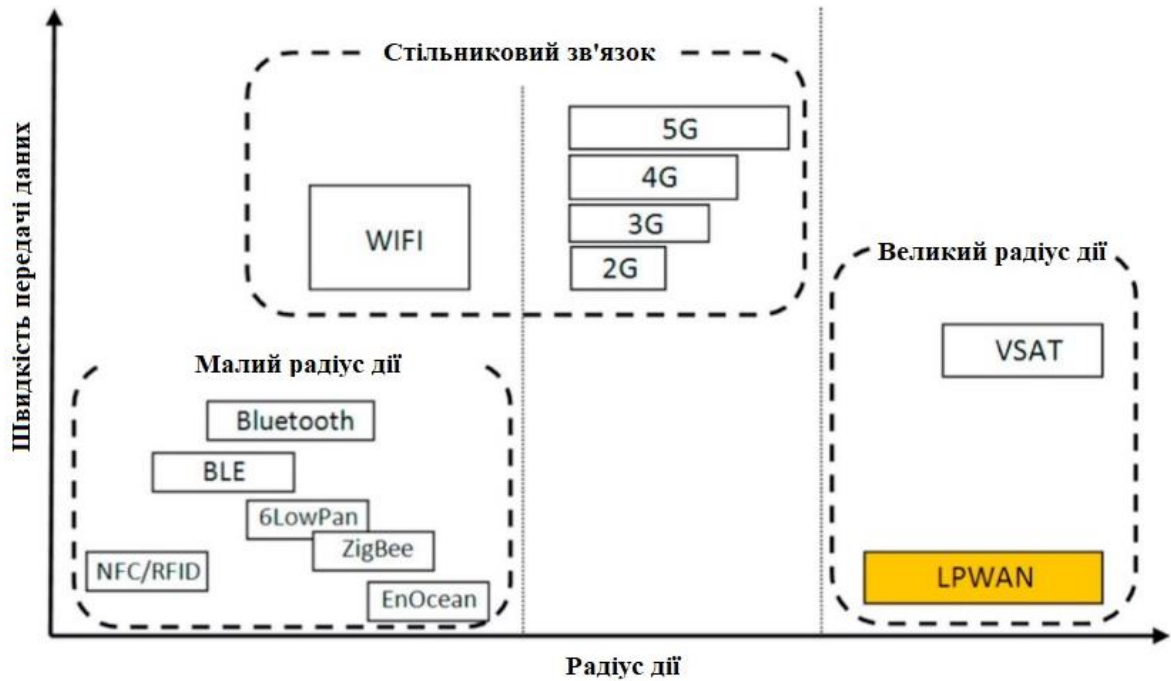


Рисунок 1.1 – Співвідношення дальності та швидкості передачі даних у бездротовому зв'язку

Роль шлюзу можна уподібнити до індивіда, який перекладає між двома людьми, що розмовляють різними мовами і знаходяться у двох окремих країнах. Це означає, що вони приймають інформацію від однієї особи або джерела і перетворюють та розміщують ту інформацію в місці та мові, які інша особа або джерело можуть збагнути [28].

У технічному сенсі, шлюзи є елементом технології IoT, які можуть допомогти у з'єднанні пристроїв з хмарою. Це досягається шляхом використання шлюзів з інтернет-з'єднанням, щоб ініціювати комунікацію пристрій-до-пристрою або щоб з'єднати пристрої, які не базуються на IP, не мають IP-адреси, які не можуть напряму з'єднатися з хмарою самостійно [29].

У деяких випадках шлюз може обробляти та агрегувати численні

комунікації. Діючи як додатковий шар безпеки, шлюзи можуть вимагати автентифікації та шифрування даних [30].

Хмара поглинає проміжне програмне забезпечення або шар зберігання та обробки даних, де дані, отримані від комунікаційного шару, стають збереженими та обробленими в хмарі, шлюзі або пристрої периферійних обчислень [31].

Периферійні комп'ютери представляють підхід наближення обчислювальних ресурсів ближче до джерела даних. Простіше кажучи, периферійні обчислення означають використання хмари для меншого і переміщення більшої кількості процесів на локальні комп'ютери або сервери [32].

На цьому кроці включені як обробка, так і автентифікація. Де обробка включає віддалене керування, керування комунікацією, керування політиками, ідентифікацію подій, а автентифікація фокусується на моніторингу та логуванні (реєстрації) пристроїв.

Останній крок, який є найбільш видимим для кінцевого користувача – це прикладний шар. Розташовані в хмарі або на локальному сервері, дані з попереднього шару далі обробляються і можуть бути використані кількома інструментами, щоб генерувати дашборди та візуалізації даних [33].

З них здобуваються інсайти, і користувачі можуть взаємодіяти з даними, які стали результатом роботи попередніх шарів. Потік цього типу конвеєра даних показаний на рисунку 1.2.

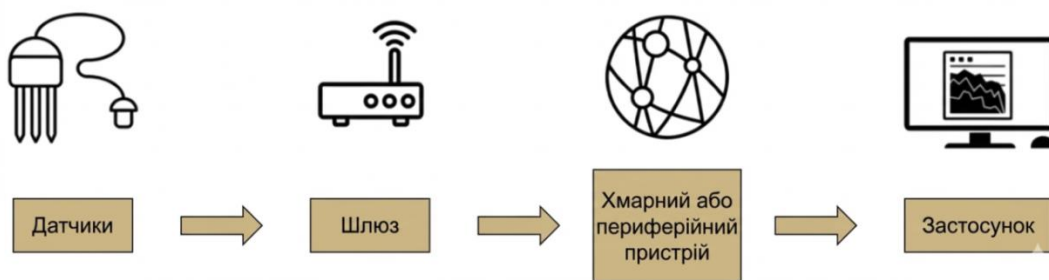


Рисунок 1.2 – Проста архітектура системи IoT

1.3 Особливості глобальної мережі дальнього радіуса дії LoRaWAN

LoRaWAN розшифровується як Long Range Wide Area Network – глобальна мережа дальнього радіуса дії, є одним із прикладів протоколів LPWAN, розглянутих вище у розділі про комунікаційний рівень. Як специфікація, LoRaWAN підключає речі з живленням до Інтернету та відповідає низці вимог до технологій IoT, забезпечуючи: двонаправлений зв’язок, наскрізна безпека, мобільність та послуги локалізації [34].

В системі, яка використовує цей мережевий протокол, рівень пристроїв або фізичний рівень базується на технології радіочастотної модуляції – LoRa. Спочатку розроблена корпорацією Semtech, технологія LoRa мала на меті стандартизувати мережі LPWAN [34].

Чипсети, пов’язані з цим фізичним рівнем, запатентовані та виробляються компанією Semtech, однак протокол LoRaWAN залишається відкритим і підтримується альянсом LoRa Alliance та його лідерами з IBM, Actility, Semtech і Microchip з 2015 року. Як і інші інфраструктури IoT, мережі на базі LoRa дотримуються подібної чотирирівневої схеми, яка зображена на рисунку 1.3 [35].

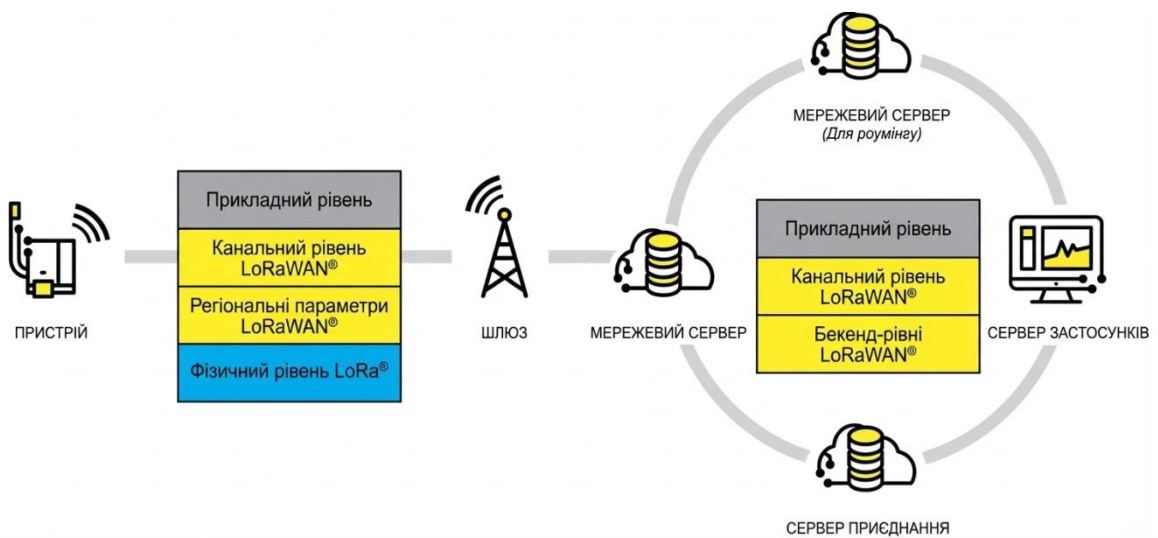


Рисунок 1.3 – Мережева архітектура LoRaWAN

Мережі найчастіше будуються за топологією зірка із зірок. Це означає, що будь-який пристрій може надсилати пакети даних на один або кілька центральних шлюзів для подальшої передачі через Ethernet, LTE або інше з'єднання на сервер [36].

Фізичні пристрої зазвичай живляться від батарей і складаються з датчика або виконавчих механізмів, а саме актуаторів, підключених до сенсорного вузла. Це можуть бути неспеціалізовані датчики або датчики, які не базуються на технології LoRa, від таких компаній, як Davis Instruments, для таких сценаріїв використання для вимірювання температури [37].

Потім такий датчик дротовим способом підключається до сенсорного вузла з підтримкою LoRa від компаній на кшталт Digital Matter або Dragino. Вузли можуть бездротово передавати пакети даних або отримувати інформацію від шлюзів [38].

Кінцеві пристрої не обов'язково прив'язані до одного конкретного шлюзу. Натомість мережі працюють за протоколом ALOHA, який розшифровується як Additive Links On-line Hawaii Area. Це означає, що будь-який шлюз LoRaWAN, який знаходиться в радіусі дії кінцевого пристрою, може прийняти пакет даних і переслати його на мережевий сервер [39].

Завдяки тому, що кілька шлюзів можуть обслуговувати один датчик, знижується рівень втрати пакетів, оскільки ймовірно, що принаймні один із шлюзів отримає передане повідомлення. Rak Wireless та Dragino є двома прикладами виробників шлюзів, які пропонують багато варіантів для розгортання мережі всередині приміщень або на вулиці [40].

Мережеві сервери – це програмне забезпечення, яке працює в хмарі або локально на сервері, яке надається такими компаніями, як Chirpstack та The Things Network, для управління всією мережею [40].

Сервери застосунків працюють аналогічно, оскільки це також програмне забезпечення, яке виконується на серверах або в хмарі, але вони відповідають безпосередньо за обробку даних [40].

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По суті, технологію можна розділити на два рівні, як показано на рисунку 1.4. Перший – це шар PHY або фізичний рівень, який називається LoRa. Другий – це шар MAC або рівень управління доступом до середовища, який називається LoRaWAN [43].

Простіше кажучи, LoRa працює шляхом кодування даних у радіохвилях. Фізичний рівень модулює радіочастотні сигнали в межах конкретних неліцензованих суб-гігагерцових діапазонів ISM, які розшифровуються як Industrial, Scientific, or Medical – промисловий, науковий або медичний. Частота діапазону 915 МГц у США та 868 МГц у Європі [40].



Рисунок 1.4 – Технологічний стек LoRaWAN

Модуляція здійснюється за допомогою чирп-імпульсів, які також називається технологією розширення спектра методом лінійної частотної модуляції, а саме означають англійською мовою Chirp Spread Spectrum – CSS, для кодування символу в довшу послідовність бітів. Це допомагає знизити чутливість до шуму та інтерференції, не змінюючи при цьому смугу частот сигналу [40].

Величину розширення можна визначити за допомогою коефіцієнта розширення (англійською мовою записується spread factor – SF), яких існує шість: від SF7 до SF12. Зміна SF впливає на продуктивність; наприклад, вищий SF призведе до збільшення дальності передачі, але до меншої швидкості передачі даних [40].

Швидкість передачі даних у системах може варіюватися від 300 біт/с до 50 кбіт/с залежно від SF та смуги пропускання каналу, з максимальним корисним навантаженням на повідомлення 243 байти. Комунікаційні пакети можуть встановлювати швидкість передачі даних, щоб забезпечити баланс між дальністю та часом передачі повідомлення [40].

Для оптимізації цього процесу мережеві сервери відповідають за управління налаштуваннями швидкості передачі даних та вихідною радіочастотною потужністю для кожного пристрою, використовуючи адаптивну швидкість передачі даних [40].

У межах шару MAC повідомлення надсилаються або як висхідні, або як низхідні, що означає напрямок переміщення інформації. Висхідні повідомлення – це повідомлення, надіслані від кінцевих пристроїв вгору до мережевого сервера, такі як спостереження, зроблене датчиком температури.

Низхідні повідомлення – це повідомлення, які можуть бути ініційовані сервером застосунків і надіслані вниз через мережевий сервер, такі як сигнал до кінцевого пристрою, якому дається вказівка увімкнути або вимкнути живлення [40].

Шар MAC може бути підрозділений на три унікальні класифікації того, як спілкуються кінцеві пристрої. Клас А реалізується більшістю пристроїв. Клас А ідентифікує двонаправлений кінцевий пристрій, де кожна комунікація починається з висхідної передачі і супроводжується двома короткими низхідними передачами [40].

Передачі можуть бути надіслані в будь-який час і визначаються кінцевим пристроєм без запланованого часу виходу на зв'язок, тому пристрої можуть входити в свого роду режим сну, коли немає інформації для надсилання.

Ця здатність означає, що пристрої класу А потребують найменшої кількості енергії, а саме довший час життя батареї. Після першого висхідного повідомлення є можливість мати двонаправлену комунікацію або команди керування мережею, надіслані в межах двох низхідних повідомлень. Це може

бути використано для трекера розташування, який надсилає інформацію тільки коли перебуває в русі [51].

Клас В – це клас маяк, який ідентифікує двонапрямлений кінцевий пристрій з детермінованою затримкою, який підтримує запланований слот прийому. Хоча, як і клас А, клас В пропонує як випадкові вікна для прийому передач, так і призначені часи для прийому передач, або пінг-слоти, ініційовані шлюзом [52]. Датчик температури міг би використовувати це, щоб надсилати регулярні оновлення кожен годину про температуру навколишнього повітря.

Клас С відомий найнижчою затримкою, будучи двонапрямленим пристроєм, Клас С зберігає здатність надсилати висхідний канал з двома низхідними вікнами, як визначено в класі А, але також тримає приймач кінцевого пристрою завжди відкритим, поки пристрій не передає.

Це означає, що в будь-який час, коли пристрій не надсилає висхідне повідомлення, мережевий сервер може ініціювати низхідну передачу. Система класу С вимагає великої кількості енергії, щоб запропонувати цю низьку затримку, і, таким чином, найкраще підходить для застосувань з постійним живленням. Прикладом, де цей компроміс може бути вартим того, було б реле для вмикання та вимикання живлення для комунальних систем [53].

Аналізуючи вищенаведену інформацію стосовно технологій LoRa та LoRaWAN, зокрема їх передісторію, а також як вони фокусуються на обміні швидкості передачі даних на низьке енергоспоживання та велику дальність та також технічні специфіки, можна побачити деякі чіткі переваги над іншими протоколами.

Ультра-низьке енергоспоживання – кінцеві пристрої LoRaWAN оптимізовані для роботи в режимі низького енергоспоживання і можуть працювати до 10 років на одній батарейці типу таблетка [54].

Великий радіус дії – шлюзи LoRaWAN можуть передавати та приймати сигнали на відстань понад 10 кілометрів у сільській місцевості та до 3 кілометрів у щільних міських районах [55].

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безліцензійний спектр – вам не потрібно платити дорогі збори за ліцензію на частотний спектр, щоб розгорнути мережу LoRaWAN. Висока ємність – мережеві сервери LoRaWAN можуть обробляти мільйони повідомлень від тисяч шлюзів [56].

Оновлення прошивки по повітрю – ви можете віддалено оновлювати прошивку для одного кінцевого пристрою або групи кінцевих пристроїв. Роумінг – кінцеві пристрої LoRaWAN можуть виконувати безшовні переходи з однієї мережі в іншу. Низька вартість – мінімальна інфраструктура, недорогі кінцеві вузли та програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом [57].

Програма сертифікації – програма сертифікації LoRa Alliance сертифікує кінцеві пристрої та надає кінцевим користувачам впевненість, що пристрої є надійними та відповідають специфікації LoRaWAN. Екосистема – LoRaWAN має дуже велику екосистему виробників пристроїв, виробників шлюзів, виробників антен, провайдерів мережевих послуг та розробників застосунків [58].

1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану цифровізації сільського господарства та огляд технологій Інтернету речей, який дозволив сформулювати такі висновки.

Встановлено, що сучасні рішення для точного землеробства від провідних виробників, а саме John Deere, CNH та ін., є закритими екосистемами. Це створює проблеми для фермерів, пов'язані з відсутністю повного права власності на дані, високою вартістю впровадження, складністю ремонту та залежністю від покриття стільникових мереж, яке часто є нестабільним у сільській місцевості.

Визначено, що для ефективного моніторингу сільськогосподарських угідь критичними параметрами є не швидкість передачі даних, а енергоефективність,

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дальність зв'язку та автономність. Класичні протоколи Wi-Fi, Bluetooth мають недостатній радіус дії, а стільникові мережі 4G/LTE є занадто енергозатратними та дорогими для масового використання датчиків.

Обґрунтовано доцільність використання технології LPWAN, зокрема протоколу LoRaWAN. Він забезпечує оптимальний баланс між радіусом дії до 10 – 15 км у сільській місцевості та енергоспоживанням до 10 років роботи від батареї. Використання неліцензованого частотного спектра 868 МГц та 915 МГц дозволяє розгорнути приватні мережі без абонплати операторам.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Розробку структурної схеми автоматизованого пристрою збору даних у сільському господарстві розпочнемо із вибору LoRaWAN шлюзу. В якості LoRaWAN шлюзу обрано модель RAK7248 WisGate Developer D4H, яка зображена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – LoRaWAN шлюз RAK7248 WisGate Developer D4H

Це готове до використання рішення, яке складається з одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4 та плати розширення RAK2287 Pi HAT. Плата розширення RAK2287 Pi HAT виконує роль концентратора LoRaWAN і базується на сучасному чіпі Semtech SX1302, який забезпечує кращу енергоефективність та менше тепловиділення порівняно з попередніми поколіннями SX1301.

Пристрій оснащено радіатором для розсіювання тепла та модулем GPS, а вся електроніка розміщена в захисному алюмінієвому корпусі. У комплект

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постачання також входять антена GPS, адаптер живлення, антена LoRa та карта пам'яті micro-SD із попередньо встановленим програмним забезпеченням.

Головною проблемою цифровізації агросектору є залежність від нестабільного інтернет-покриття у полях. У традиційній схемі датчик відправляє дані через інтернет на один із серверів, а саме Google Cloud, AWS або Azure, де вони обробляються і результати повертаються назад.

У полі інтернет 4G/LTE часто зникає або працює повільно. Якщо система залежить від хмари, то без інтернету втрачаються дані або контроль. Якщо система працює локально на Raspberry Pi, то дані зберігаються в локальну базу PostgreSQL навіть якщо зв'язку немає тижнями.

Для вирішення цієї проблеми використовується концепція Fog Computing, яка перекладається як туманні обчислення та Edge Computing, яка перекладається як граничні обчислення. Fog/Edge Computing – це архітектурний підхід, який є протилежністю до традиційних хмарних обчислень, а саме Cloud Computing.

Fog Computing – це проміжний шар між "хмарою" і "землею". Це локальний міні-сервер Raspberry Pi з шлюзом RAK, який збирає дані з багатьох датчиків, обробляє їх, фільтрує і приймає рішення локально. Туман називається так, тому що це хмара, яка спустилася на землю.

Edge Computing – це обробка даних, яка відбувається безпосередньо на пристрої. Прикладом є розумна камера, яка сама розпізнає бур'ян, не надсилаючи відео в Інтернет.

Передавати кожну секунду дані з 50 датчиків через мобільну мережу – це дорого і забиває канал. Fog-вузол збирає тисячі пакетів, усереднює їх і може відправляти в центр лише один короткий звіт на день або лише сигнал тривоги.

Сигнал до хмарного сервера і назад йде сотні мілісекунд. Якщо датчик вологості показує критичну сухість, локальний контролер може увімкнути полив миттєво, не чекаючи відповіді від сервера в іншій країні.

Важливими аспектами є також безпека та приватність. Дані фермера

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишаються на території ферми на Raspberry Pi, а не лежать на серверах сторонніх корпорацій. На рисунку 2.2 зображена багаторівнева архітектура автоматизованої системи збору даних, яка побудована за принципом Fog Computing.

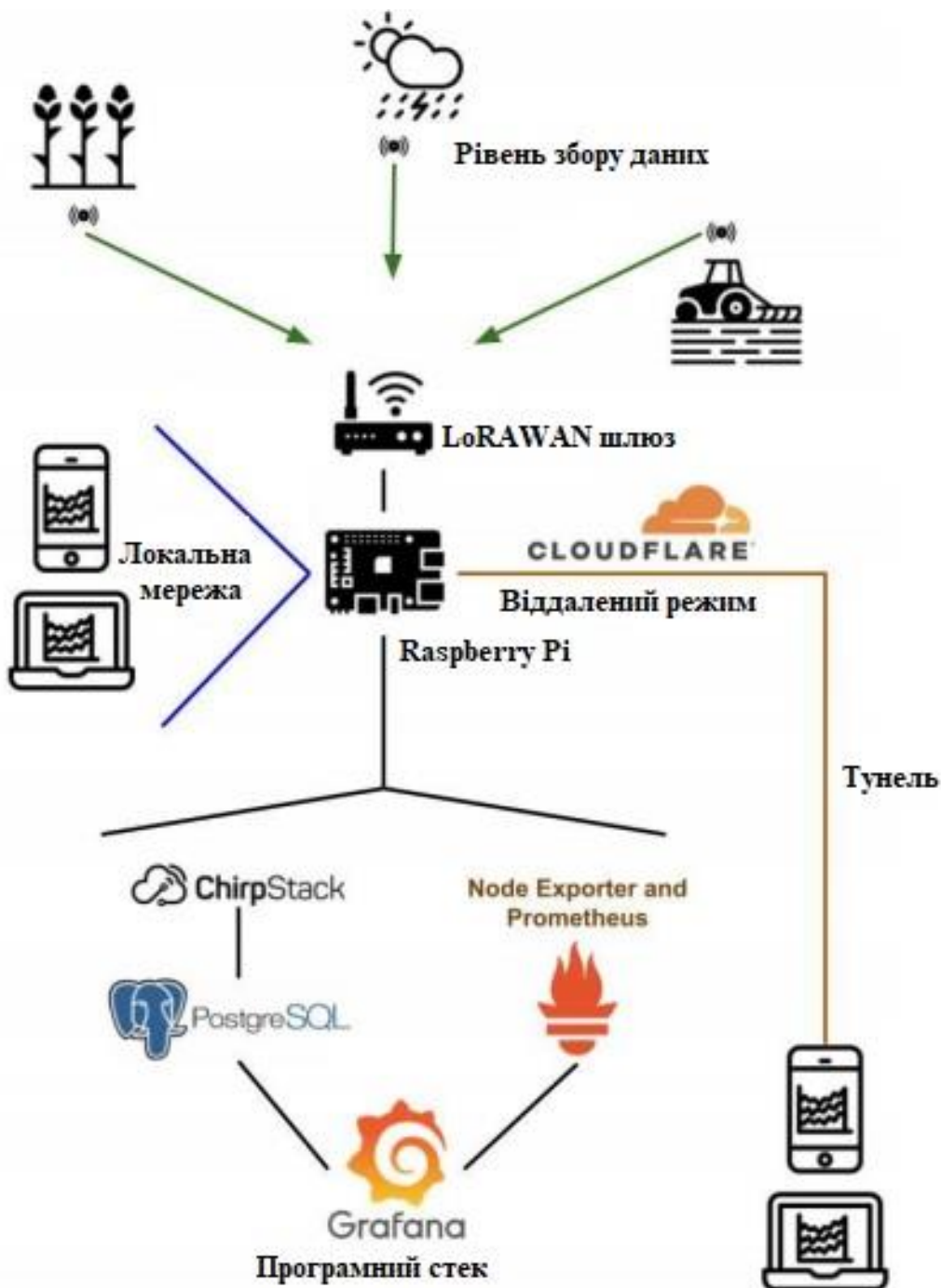


Рисунок 2.2 – Багаторівнева архітектура автоматизованої системи збору даних, яка побудована за принципом Fog Computing

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Архітектура розділена на три логічні рівні:

- рівень польових пристроїв;
- рівень обробки даних, а саме Edge;
- рівень візуалізації/користувача.

Верхня частина архітектури відображає джерела телеметрії, розташовані безпосередньо на об'єкті моніторингу в полі. Це сенсорні вузли, а саме стаціонарні пристрої для вимірювання параметрів ґрунту вологості та температури, а також погодних умов за допомогою метеостанції.

До верхньої частини архітектури також відносяться мобільні об'єкти, а саме GPS-трекери, які встановлені на сільськогосподарській техніці на тракторах і комбайнах для логістичного контролю.

Усі кінцеві пристрої передають зашифровані пакети даних за бездротовим протоколом LoRaWAN на частоті 868 МГц для Європи та України.

Апаратний рівень обробки, а саме Edge Hardware виступає центральним елементом системи і є базовим вузлом, який складається з двох компонентів. Першим компонентом є LoRaWAN Gateway.

В якості LoRaWAN Gateway використовується шлюз RAK7248C, який виконує функцію моста між радіоефіром та цифровим інтерфейсом. Він приймає радіосигнали від багатьох сенсорів одночасно.

Одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi виступає локальним сервером. На відміну від класичних хмарних систем, всі обчислення та збереження даних відбуваються у одноплатному мікрокомп'ютері Raspberry Pi, а це забезпечує автономність системи.

У нижній частині схеми зображено програмне забезпечення, яке розгорнуте на одноплатному мікрокомп'ютері Raspberry Pi у вигляді контейнеризованих сервісів.

ChirpStack – це сервер мережі LoRaWAN, англійською мовою Network Server. Він відповідає за дедуплікацію пакетів, розшифровку даних,

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуючи ключі шифрування AppSKey та NwkSKey та керування пристроями.

PostgreSQL – це реляційна база даних, де зберігаються часові ряди отриманих вимірювань для довгострокового аналізу. Node Exporter та Prometheus – це службові утиліти для моніторингу стану самого сервера. Вони відстежують температуру процесора, завантаження пам'яті та вільне місце на диску, що критично важливо для автономних пристроїв.

Grafana – це платформа візуалізації, яка агрегує дані з бази PostgreSQL, а саме показники сенсорів, а також Prometheus, яка агрегує дані про стан сервера і виводить їх у вигляді зручних графіків та дашбордів.

Багаторівнева архітектура автоматизованої системи збору даних, яка зображена на рисунку 2.2, ілюструє два сценарії доступу до інтерфейсу Grafana, які зображені синіми та коричневими лініями.

Режим локальної мережі використовується у випадку відсутності зовнішнього Інтернету, тому Raspberry Pi створює власну Wi-Fi точку доступу. Користувач може під'їхати до пристрою, підключитися до Wi-Fi та переглянути дані безпосередньо з локального сервера.

Режим тунелювання використовується за наявності підключення до мережі через LTE-модем. У цьому режимі використовується сервіс Cloudflare Tunnel. Це дозволяє отримати безпечний віддалений доступ до локального сервера з будь-якої точки світу без необхідності використання IP-адреси або сторонніх хмарних сховищ.

2.2 Вибір датчиків для автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Вибір кінцевих пристроїв датчиків для мережі LoRaWAN охоплює широкий спектр варіантів як за типом вимірювань, так і за виробниками. Важливою особливістю технології є те, що навіть сенсори, які не є

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

специфічними для LoRaWAN, можуть бути інтегровані в систему за умови їх правильного підключення та конфігурації з відповідним сенсорним вузлом Sensor Node.

При плануванні складу датчиків для автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві необхідно виходити з конкретних потреб агропідприємства. Було обрано набір сенсорів, які охоплюють ключові метрики для прийняття оперативних рішень у сільському господарстві:

- кількість опадів;
- температура та вологість повітря;
- вологість та температура ґрунту;
- інтенсивність сонячного світла;
- геопозиціонування техніки.

Для забезпечення передачі даних від аналогових або цифрових датчиків, що не мають вбудованого LoRa-модуля, доцільно використовувати універсальні вузли. Одним із найбільш задокументованих та доступних рішень на ринку є Dragino LSN50-V2, проте в межах даної розробки акцент зроблено на використанні спеціалізованих промислових вузлів.

Більшість стаціонарних вимірювань реалізується шляхом підключення датчика опадів Davis, датчика вологості ґрунту Vegetronix та термістора TEWA до єдиного вузла Digital Matter SensorNode. Це дозволяє оптимізувати витрати та енергоспоживання, передаючи дані з трьох різних точок одним LoRaWAN-пакетом.

Для логістичного контролю та моніторингу переміщення сільськогосподарської техніки тракторів та комбайнів у полях використовуються автономні трекеři Oyster GPS, які працюють у протоколі LoRaWAN, який забезпечує високу проникаючу здатність сигналу на великих площах.

Всі обрані пристрої повинні бути сумісними з європейським частотним планом 868 МГц, який використовується в Україні. Для декодування даних з

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цих датчиків у системі ChirpStack використовуються специфічні кодеки CODECs, які можна знайти у відкритих спільнотах розробників Chirpstack Community або The Things Network.

Це дозволяє перетворювати "сирі" двійкові дані від датчиків у зрозумілі для користувача числові значення, які згодом візуалізуються в інтерфейсі Grafana.

В якості сенсорного вузла Sensor Node виберемо бездротовий сенсорний вузол LoRaWAN великого радіуса дії, розроблений для зовнішнього використання outdoor Dragino LSN50-V2, який зображено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Бездротовий сенсорний вузол LoRaWAN великого радіуса Dragino LSN50-V2

Пристрій призначений для розробників, які прагнуть швидко впроваджувати рішення промислового рівня у сферах Інтернету речей IoT та LoRaWAN.

Апаратна платформа базується на мікроконтролері STM32L072CZT6 від STMicroelectronics з ядром ARM® Cortex®-M0+. Радіочастотний чіп використовує трансивер SX1276 або SX1278, який забезпечує зв'язок на наддалекі відстані з високою стійкістю до перешкод.

Енергоспоживання забезпечується від незамінної батареї Li/SOC12 ємністю 4000 мАг, яка розрахована на тривалий термін експлуатації завдяки

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультранизькому споживанню 2,7 мкА в режимі STOP. Корпус має клас водонепроникності IP68. Пристрій є продуктом з відкритим вихідним кодом Open Source hardware & software.

Пристрій підтримує налаштування параметрів через AT-команди та легко програмується, що дозволяє швидко адаптувати його під конкретні завдання моніторингу навколишнього середовища.

Для моніторингу атмосферних опадів у складі автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві обрано датчик опадів Davis 6466 AeroCone, який зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Датчик опадів Davis 6466 AeroCone

Датчик опадів Davis 6466 AeroCone – це професійний пристрій, призначений для збору та вимірювання кількості рідких опадів у реальному часі.

Механізм вимірювання реалізований за допомогою перекидної ложки tipping spoon з магнітним герконом, яка забезпечує високу надійність та стійкість до корозії.

При інтенсивності дощу до 50 мм/год похибка становить $\pm 4\%$ або +0,2 мм одне перекидання ложки. Датчик опадів Davis 6466 AeroCone має заводського

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

калібрування з дискретністю вимірювання 0,01 дюйма версія 6466 або 0,2 мм метрична версія 6466M.

Добова кількість опадів допускається до 999,8 мм; загальна кількість складає до 6553 мм.

Аеродинамічна форма конуса AeroCone дозволяє мінімізувати вплив вітру на точність збору крапель, що особливо важливо для відкритих територій сільськогосподарських угідь. Датчик постачається з монтажною базою Vantage Pro2, яка має:

- екран для збору сміття Debris Screen та спеціальні антипташині шипи bird spikes, які запобігають забрудненню внутрішнього об'єму конуса;
- будований бульбашковий рівень дозволяє встановити пристрій суворо горизонтально, що є критичним для коректної роботи перекидного механізму.
- наявність U-подібного болта та монтажною бази дозволяє закріплювати датчик як на вертикальних щоглах, так і на плоских поверхнях.

Датчик оснащений кабелем довжиною 12 метрів. Підключення здійснюється до універсального вузла Digital Matter SensorNode через цифрові входи. Система ChirpStack реєструє кожне замикання контактів геркона як імпульс, який відповідає 0,2 мм опадів, після чого програмний стек PostgreSQL та Grafana розраховує сумарну кількість опадів за обраний період часу.

Для точного моніторингу стану водних ресурсів у кореневій зоні рослин обрано зондовий датчик VH400 від компанії Vegetronix, який зображено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Датчик вологості ґрунту Vegetronix VH400

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей датчик є професійним електронним інструментом, який використовує діелектричний метод вимірювання об'ємного вмісту води в ґрунті Volumetric Water Content – VWC.

На відміну від дешевих резистивних датчиків, VH400 не базується на вимірюванні електропровідності. Це робить його стійким до окислення корозії та нечутливим до рівня солоності ґрунту.

Завдяки надзвичайно тонкому профілю корпусу, датчик можна вставляти в ґрунт із мінімальним пошкодженням кореневої системи рослин. Час стабілізації вихідного сигналу після ввімкнення становить лише 400 мс, що дозволяє використовувати його в імпульсних системах для економії енергії.

Датчик повністю водонепроникний і придатний для тривалого перебування під землею на будь-якій глибині. У межах даного проекту датчик VH400 підключається до Digital Matter SensorNode. Оскільки вихідна напруга датчика до 3 В пропорційна рівню вологості, система LoRaWAN зчитує це значення, а на рівні сервера ChirpStack за допомогою програмного коду воно конвертується у відсоткове значення вологості для відображення у Grafana.

Для отримання найбільш точних даних датчик рекомендується встановлювати горизонтально на глибині залягання основної маси коренів. Це запобігає стіканню води вздовж леза датчика, що могло б призвести до хибних завищених показників.

Для вимірювання температури повітря та ґрунту обрано прецизійний термістор TT02-10KC3-T105-1500 від TEWA Sensors, який зображений на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Прецизійний термістор TT02-10KC3-T105-1500 від TEWA Sensors

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обґрунтування вибору температурного зонда TT02-10КС3-Т105-1500 від виробника TEWA Temperature Sensors базується на його високій точності, надійності в агресивних середовищах та повній сумісності з обраним сенсорним вузлом.

Датчик побудований на базі прецизійного термістора NTC Negative Temperature Coefficient. Опір при 25°C дорівнює 10000 Ом, що є стандартом для багатьох систем збору даних.

Допуск Tolerances складає лише $\pm 1\%$ при 25°C, що забезпечує мінімальну похибку вимірювань без необхідності складного додаткового калібрування.

Константа Beta при 3977К дорівнює $\pm 1\%$, що гарантує лінійність та передбачуваність показників у широкому діапазоні температур.

Датчик має клас захисту IP68. Це найвищий рівень герметичності. Датчик повністю захищений від пилу та витримує тривале занурення у воду або вологу землю, що критично для вимірювання температури ґрунту.

Чутливий елемент інкапсульований чорним термоеластопластом TPE, а кабель має ізоляцію з того ж матеріалу. TPE відомий своєю гнучкістю та стійкістю до розтріскування при перепадах температур.

Діапазон робочих температур складає від -40°C до +105°C. Це повністю перекриває всі можливі кліматичні рекорди для відкритих угідь. Довжина кабелю: 1500 мм дозволяє розмістити датчик на достатній відстані від сенсорного вузла щоб, заглибити в ґрунт або винести на відкрите повітря, поки сам вузол закріплений на щоглі.

Використовується багатожильна луджена мідь AWG24, яка має кращу стійкість до корозії та забезпечує надійний контакт при підключенні до клем SensorNode.

Вибір саме 10к NTC термістора обумовлений його енергоефективністю. Для вимірювання температури сенсорному вузлу достатньо подати короткочасний імпульс напруги, що дозволяє системі працювати роками від однієї батареї.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Зонд TT02-10КС3-T105-1500 обрано як оптимальне рішення для моніторингу температури повітря або ґрунту завдяки поєднанню промислового стандарту захисту IP68, високої точності вимірювання $\pm 1\%$ та низької вартості, що робить його економічно вигідним для масштабованих агросистем.

Для відстеження місця розташування сільськогосподарської техніки до системи інтегровано GPS-трекер Digital Matter Oyster3, який зображений на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – GPS-трекер Digital Matter Oyster3

Пристрій працює в мережі LoRaWAN, що дозволяє передавати координати на великі відстані без використання дорогої стільникової мережі GSM. Трекер захищений за стандартом IP67 і має інтегрований акселерометр для фіксації початку руху техніки.

Однією з головних переваг Oyster3 є термін служби батареї, що є критичним для сільськогосподарської техніки, яка працює в полях далеко від сервісних центрів:

Пристрій живиться від 3-х стандартних батарей типу AA Li-FeS₂, які користувач може легко замінити самостійно. Залежно від інтенсивності оновлення координат, трекер може працювати до 10 років при 1 запиті на добу або близько 2,5 років у режимі адаптивного відстеження за рухом.

Система надсилає звіти про стан батареї, що дозволяє вчасно планувати технічне обслуговування. Oyster3 використовує високопродуктивний модуль GNSS, який підтримує роботу з декількома супутниковими системами

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одночасно GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, що забезпечує швидке та точне визначення координат навіть у складних умовах або на відкритих ландшафтах агроугідь.

Пристрій оснащено вбудованим акселерометром, який реалізує логіку «адаптивного відстеження». Коли техніка стоїть, трекер переходить у режим глибокого сну для економії енергії.

Як тільки датчик фіксує вібрацію або початок руху, трекер автоматично збільшує частоту передачі координат, забезпечуючи детальний маршрут переміщення агрегату по полю.

Корпус Oyster3 спеціально розроблений для агресивних середовищ. Захист корпусу IP68 та IK07: Пристрій є повністю пило- та водонепроникним витримує занурення, а також стійким до ударів та вібрацій, які є неминучими при роботі тракторів чи комбайнів.

Oyster3 працює в межах від -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$, що відповідає українським кліматичним умовам. Підтримує всі регіональні частотні плани LoRaWAN зокрема 868 МГц для Європи/України.

Використання шифрування AES-128 гарантує захист даних про місцезнаходження техніки від перехоплення. На рівні сервера можна налаштувати сповіщення, якщо техніка залишає межі визначеного поля або парку.

Вибір Oyster3 LoRaWAN є оптимальним для аграрного сектору, оскільки він дозволяє реалізувати концепцію «встановив і забув» Deploy Once. Висока автономність у поєднанні з промисловим рівнем захисту робить його надійним інструментом для контролю за дороговартісними активами та аналізу ефективності використання техніки в полях.

Обґрунтування вибору комбінованого датчика Tektelic Agriculture Sensor для автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві базується на його багатофункціональності та здатності замінити декілька окремих пристроїв одним компактним рішенням.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комбінований датчик Tektelic Agriculture Sensor зображений на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Комбінований датчик Tektelic Agriculture Sensor

Головна перевага комбінованого датчика Tektelic Agriculture Sensor – це здатність одночасно збирати шість ключових метрик, які критично важливі для точного землеробства:

- вологість VWC та температура ґрунту;
- вологість та температура навколишнього повітря;
- детекція та вимірювання інтенсивності світла, що є важливим для прогнозування фотосинтезу та випаровування.
- статус орієнтації та детекція руху або нахилу пристрою дозволяє знати, чи не впав датчик або чи не був він пошкоджений технікою або тваринами.

Комбінований датчик Tektelic Agriculture Sensor безпосередньо встановлюється на поверхні ґрунту, шляхом закріплення його на стовпах, парканах або виноградних лозах. Це дозволяє використовувати один і той самий тип пристрою як для польових культур, так і для виноградників чи садів.

Комбінований датчик Tektelic Agriculture Sensor розроблений спеціально для "найбільш складних зовнішніх екологічних умов" challenging outdoor environmental conditions. Оптимізоване енергоспоживання забезпечує до 10 років автономної роботи, що мінімізує витрати на обслуговування.

Комбінований датчик Tektelic Agriculture Sensor підтримує всі глобальних

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

ISM-діапазонів включаючи 868 МГц для України, що дозволяє легко інтегрувати його в будь-яку існуючу мережу LoRaWAN.

Замість розгортання окремих вузлів для температури, вологості та світла, Tektelic Ag Sensor пропонує інтегрований підхід. Це не лише знижує загальну вартість системи, але й значно спрощує процес адміністрування мережі в ChirpStack, оскільки замість трьох-чотирьох пристроїв необхідно керувати лише одним DevEUI, один кодек.

Вибір Tektelic Agriculture Sensor обґрунтований його високою щільністю даних на одиницю обладнання. Він є ідеальним рішенням для точного моніторингу мікроклімату безпосередньо в зоні росту культур, забезпечуючи агронома повною картиною стану навколишнього середовища без необхідності складного монтажу декількох окремих сенсорів.

На рисунку 2.9 представлена схема електрична принципова комплексної системи автоматизації, яка базується на енергоефективній технології LoRaWAN. Архітектура системи є дворівневою:

– перший рівень містить розгалужену мережу периферійних пристроїв Sensor Nodes та Asset Trackers, які збирають дані безпосередньо в полі або на техніці;

– другий рівень містить базовий шлюз Gateway, який виконує роль концентратора для передачі інформації на хмарні сервери.

Унікальність даної схеми полягає у поєднанні стаціонарного моніторингу агрономічних параметрів та мобільного відстеження активів господарства. Пристрій -U1 виступає інтелектуальним центром збору даних з полів. Він побудований на базі мікроконтролера з низьким енергоспоживанням та інтегрованим радіомодулем.

Компонент побудований на базі енергоефективного мікроконтролера з інтегрованим прийомопередавачем LoRa, що мінімізує кількість дискретних елементів на друкованій платі. Для забезпечення тривалої автономної роботи від 5 до 10 років вузол живиться від літій-тіонілхлоридного Li-SOC джерела

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

живлення –G1 із номінальною напругою 3,6 В, яка характеризується вкрай низьким струмом саморозряду.

Для прецизійного вимірювання вологості застосовано ємнісний датчик VH400 -B1. Контакт 1 датчика з'єднаний з виходом живлення VOUT, а контакт 2 датчика з'єднаний з аналоговим входом AIN1 контролера.

Датчик вимірює діелектричну проникність ґрунту та видає напругу, яку контролер перераховує у відсотковий вміст вологи. Використання ємнісного методу гарантує стійкість сенсора до корозії в агресивному вологому середовищі.

Контакт 1 живлення сенсора з'єднаний з керованим виходом мікроконтролера VOUT, а контакт 2 інформаційний підключений до входу аналого-цифрового перетворювача AIN1. Контакт 3 виведено на спільну шину заземлення GND. Датчик функціонує за принципом вимірювання високочастотної діелектричної проникності навколишнього субстрату і формує на виході аналогову напругу, яку контролер інтегрує та перераховує у відсотковий вміст вологи за допомогою внутрішніх калібрувальних кривих. Реалізована схема живлення через комутовану лінію VOUT дозволяє подавати напругу на сенсор виключно на час проведення АЦП-дискретизації тривалістю кілька мілісекунд, що повністю нівелює ефект електролізу на електродах датчика та суттєво заощаджує ресурс батареї G1.

Дощомір Davis 7852 -B2 використовує механізм перекидного ковша для фіксації інтенсивності дощу. Сигнальний провід SIG під'єднано до цифрового входу DIG1. Контролер працює в режимі переривань, фіксуючи кожен імпульс, що відповідає випаданню 0,2 мм опадів.

Сигнальний провід SIG контакт 1 під'єднано до цифрового входу мікроконтролера DIG1, що підтримує апаратні переривання, а контакт 2 заземлено. Оскільки випадіння опадів є випадковим стохастичним процесом, контролер більшу частину часу перебуває в режимі глибокого сну Deep Sleep, але миттєво прокидається за кожним імпульсом від герконового контакту.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

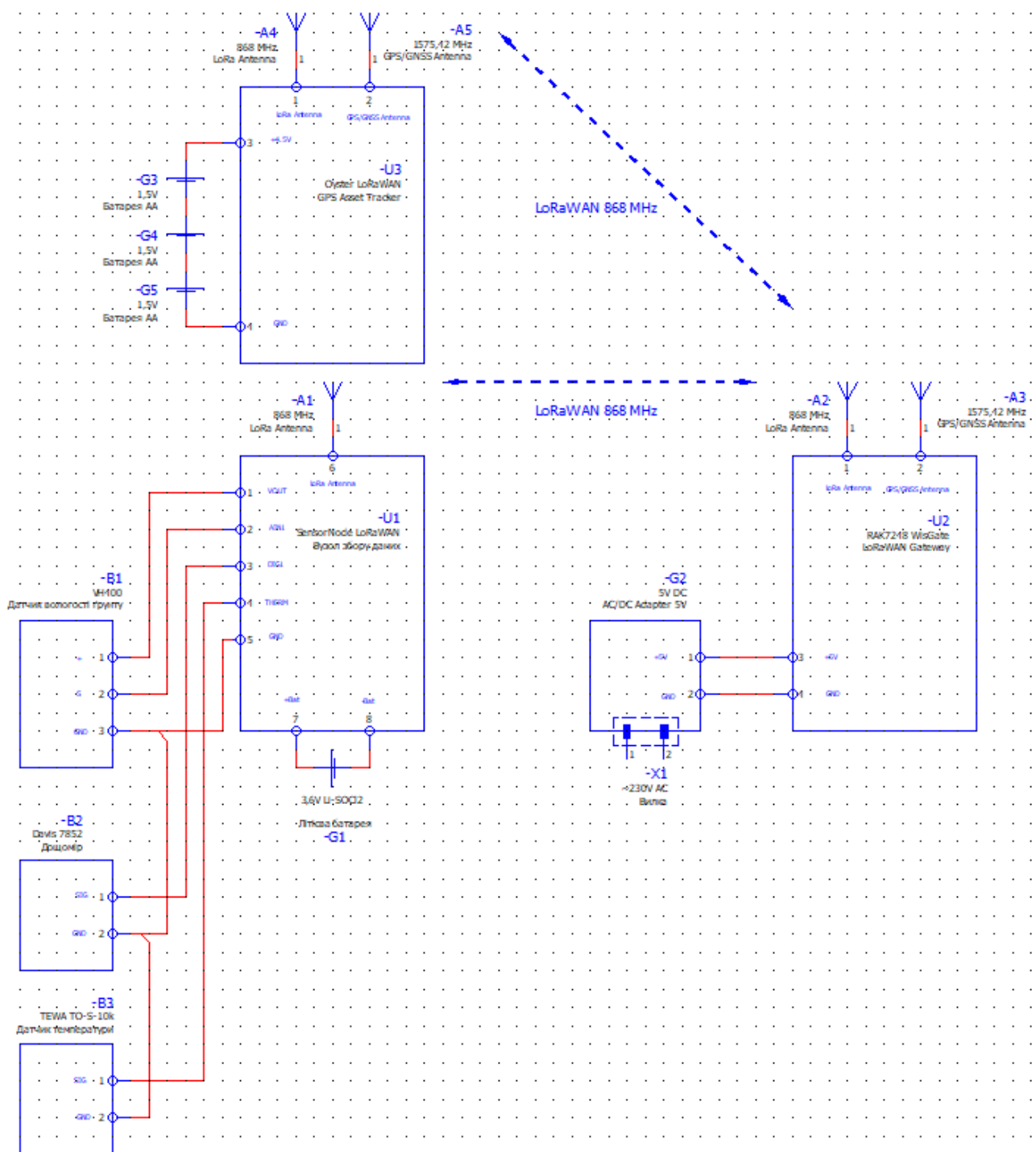


Рисунок 2.9 – Схема електрична принципова автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Для вимірювання температури повітря використано термістор TEWA TO-S-10k -B3. Датчик підключений до входу THERM контакт 4, який має внутрішній дільник напруги для точного зчитування опору.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для контролю місцезнаходження сільськогосподарської техніки тракторів та комбайнів до схеми під'єднано пристрій Oyster LoRaWAN -U3. Пристрій Oyster LoRaWAN -U3 – це захищений GPS Asset Tracker, який дозволяє отримувати координати в реальному часі.

На відміну від стаціонарного вузла, Oyster живиться від трьох незалежних елементів типу AA -G3, -G4 та -G5 по 1,5 В кожен. Це забезпечує легку заміну джерел енергії в польових умовах. Пристрій оснащений власною LoRa-антенною -A4 868 МГц та GPS-антенною -A5 1575,42 МГц для точної геолокації.

Базовий шлюз RAK7248 WisGate -U2 є промисловим концентратором, який обробляє сигнали від усіх вузлів системи одночасно на 8 каналах. Приймальний тракт використовує антену -A2 з високим коефіцієнтом підсилення для стабільного прийому на великих відстанях.

Активна GPS-антена -A3 1575,42 МГц забезпечує шлюз даними про час для точної координації роботи мережі LoRaWAN класу B. Шлюз працює від мережі 230 В через вилку -X1. Адаптер -G2 виконує перетворення у 5 В постійного струму з обов'язковою гальванічною розв'язкою.

Використання частоти 868 МГц категорія ISM обумовлено низкою факторів:

- в Україні цей спектр є неліцензійним при потужності до 25 мВт, що усуває потребу в платних дозволах;
- довжина хвилі ~34,5 см дозволяє сигналу огинати рослини та стовбури дерев, що критично для садів та полів;
- сигнал менше поглинається вологою туманом або дощем порівняно з Wi-Fi 2.4 ГГц;
- у сільській місцевості зв'язок між антенами -A1/-A4 та шлюзом -A2 досягає 5–15 км.

Для максимального терміну служби батареї -G1 Li-SOCl₂ на 3,6 В, термін служби від 5 до 10 років реалізовано наступний алгоритм.

Контролер -U1 більшість часу перебуває в режимі глибокого сну. Після

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пробудження за таймером подається живлення на датчики через VOUT, знімаються показники та шифруються ключами AppSKey. Дані передаються коротким пакетом у ефір, після чого система миттєво повертається в режим сну.

Першим етапом реалізації системи є вхідний контроль комплектації та фізичне збирання шлюзу RAK7248 -U2. 2.1.1. Стандартний комплект поставки шлюзу WisGate Developer D4H містить:

- обчислювальний модуль Raspberry Pi 4;
- плату концентратора LoRaWAN RAK2287;
- micro-SD карту обсягом від 16 ГБ для логування даних;
- комплект антен та блок живлення USB-C.

Для збільшення радіусу покриття системи в умовах складного рельєфу стандартні антени можуть бути замінені на виносні антени з високим коефіцієнтом підсилення 5,8 dBi або 8 dBi, які під'єднуються через коаксіальний кабель низького опору.

Критично важливим є правильне підключення антен до відповідних роз'ємів SMA на корпусі шлюзу. Антена LoRa -A2 під'єднується до порту, маркованого як "LoRa". Неправильне підключення або ввімкнення шлюзу без антени може призвести до виходу з ладу вихідного каскаду радіомодуля через високий коефіцієнт стоячої хвилі VSWR.

Антена GPS -A3 це активна антена, яка потребує надійної фіксації. Вона забезпечує шлюз даними про точний час PPS, які необхідні для синхронізації в мережах класу B.

Шлюз базується на ОС Linux Raspbian. Micro-SD карта повинна бути відформатована у файлової системі FAT32. Використовується спеціалізоване ПЗ BalenaEtcher для розгортання останньої версії прошивки RAKwireless. Прошивка структурує роботу комп'ютера та забезпечує взаємодію між ядром ОС та драйверами концентратора SX1302.

Після фізичного збирання та подачі живлення 5V DC через порт USB-C

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

шлюз ініціалізує точку доступу Wi-Fi для первинного налаштування. Шлюз створює власну мережу з назвою Rakwireless_XXXX. Це дозволяє налаштувати пристрій безпосередньо в полі за допомогою ноутбука. Пароль за замовчуванням rakwireless.

Провідне підключення через порт LAN рекомендовано для стаціонарних об'єктів з наявним інтернет-каналом, оскільки цей метод є більш стабільним та не потребує перемикання між Wi-Fi мережами.

Для віддаленого керування шлюзом використовується протокол SSH Secure Shell. Для Mac OS/Linux запуск терміналу та вхід у режим суперкористувача через команду `sudo -i`.

Після входу в систему запускається утиліта `sudo gateway-config`, яка є основним інструментом адміністрування. Першим кроком є зміна стандартного пароля Raspberry Pi пункт 1 Set pi password. Це критично для систем, що мають вихід у відкритий інтернет, для запобігання несанкціонованому доступу.

В Україні для LoRaWAN використовується діапазон EU868. У меню налаштувань обирається Setup RAK Gateway Channel Plan -> Server is ChirpStack. Для локального сервера вводиться IP-адреса 127.0.0.1.

Активація функції ADR Adaptive Data Rate у меню ChirpStack ADR configure дозволяє мережі автоматично оптимізувати швидкість передачі даних. Якщо пристрій Oyster -U3 знаходиться близько до шлюзу, сервер дає команду знизити потужність передачі та збільшити швидкість, що суттєво економить заряд батарей.

Для отримання доступу до хмарних сервісів шлюз повинен стати клієнтом існуючої інтернет-мережі. У меню 5 Configure WIFI обирається режим 2 Enable Client Mode. Через 4 Add New SSID for Client вводяться назва SSID та пароль домашньої або корпоративної мережі.

Після перезавантаження `sudo reboot` шлюз отримує нову IP-адресу від DHCP-сервера роутера. Її необхідно ідентифікувати через таблицю клієнтів роутера для подальшого SSH-доступу. Для кожного типу обладнання

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створюється окремий профіль, що визначає параметри LoRaWAN MAC-шару.

2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі проведено комплексне проектування та програмно-апаратне налаштування автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення, основою якого став LoRaWAN-шлюз RAK7248 WisGate Developer. Вибір даної моделі зумовлений використанням сучасного концентратора на базі чіпа Semtech SX1302, що забезпечує високу енергоефективність, стабільність зв'язку та можливість обробки сигналів на восьми каналах одночасно.

Розроблено архітектуру системи, яка є дворівневою та поєднує стаціонарний моніторинг параметрів середовища, а саме вологість ґрунту, температура та рівень опадів із мобільним відстеженням сільськогосподарських активів. Це дозволяє створити єдиний інформаційний простір для управління агротехнічними процесами.

Розроблено схему електричну принципову автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві, на якій відображено взаємодію ключових вузлів:

- автономного контролера SensorNode -U1;
- шлюзу -U2;
- GPS-трекера Oyster -U3.

На схемі враховано особливості живлення кожного компонента від автономних літєвих батарей до мережевих адаптерів та підключення спеціалізованих антенних систем для LoRa та GPS діапазонів.

Визначено переваги використання частотного діапазону 868 МГц. Встановлено, що даний діапазон є оптимальним для умов сільського господарства завдяки високій проникній здатності радіохвиль через вегетаційну

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

масу рослин, стійкості до опадів та можливості передачі даних на відстані до 15 км без необхідності ліцензування частотного ресурсу.

Здійснено програмне налаштування мережевого стека в середовищі ChirpStack. Створено індивідуальні профілі пристроїв Device Profiles для Digital Matter Oyster, SensorNode та Tektelic Ag Sensor з використанням протоколу LoRaWAN версії 1.0.4 та методу активації OTAA. Налаштовано алгоритми адаптивної швидкості передачі даних ADR, який дозволяє динамічно оптимізувати енергоспоживання кінцевих пристроїв.

Описано процедуру розгортання та адміністрування шлюзу, включаючи конфігурування операційної системи Raspberry Pi, налаштування безпечних SSH-з'єднань та інтеграцію пристрою в локальну інтернет-мережу в режимі Wi-Fi Client.

Розроблена технічна документація та програмні налаштування створюють надійну базу для подальшого впровадження системи та розробки інтерфейсів візуалізації даних у наступних розділах роботи.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

3.1 Алгоритм роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Алгоритм роботи кінцевого вузла збору даних Sensor Node -U1 базується на циклічному виконанні операцій збору інформації та тривалих періодах перебування в режимі мікроспоживання Deep Sleep. Це обумовлено необхідністю забезпечення автономної роботи пристрою від батареї -G1 протягом декількох років.

Програмну логіку роботи пристрою можна розділити на три основні фази:

- ініціалізація та підключення до мережі;
- робочий цикл збору даних;
- обробка переривань.

Блок схема алгоритму роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві зображена на рисунку 3.1. Основна логіка базується на принципі переривань та подій. Більшу частину часу пристрій перебуває у стані глибокого енергозбереження, що дозволяє мінімізувати струм споживання до рівня кількох мікроампер. Пробудження відбувається або за розкладом раз на годину для планової передачі, або при спрацюванні герконового датчика дощоміра.

При першому ввімкненні або після скидання живлення пристрій виконує процедуру активації через ефір OTAA:

- ініціалізація стеків протоколів LoRaWAN та внутрішніх периферійних пристроїв мікроконтролера;
- зчитування ідентифікаторів DevEUI, AppEUI та ключа AppKey з енергонезалежної пам'яті;
- відправка запиту на приєднання Join Request до шлюзу RAK7248;
- очікування відповіді Join Accept.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.1 – Блок схема алгоритму роботи автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У разі успіху пристрій отримує адресу в мережі DevAddr та ключі сесії для шифрування даних. Після успішної реєстрації пристрій переходить до виконання регулярних циклів опитування датчиків. Алгоритм циклу включає наступні кроки:

Пробудження за таймером активує вихід мікроконтролера з режиму глибокого сну. Активація датчиків здійснюється шляхом подачі живлення на датчик вологості VH400 -B1 через лінію VOUT. Це дозволяє уникнути електролізу на електродах датчиків та економить заряд.

Аналого-цифрове перетворення ADC виконує зчитування напруги з входу AIN1 та перерахунок її у відсотковий вміст вологості ґрунту.

Зчитування температури відбувається шляхом опитування входу THERM для отримання даних від термістора TEWA TO-S-10k. Формування пакету Payload забезпечує пакування отриманих значень у компактний бінарний формат для мінімізації часу роботи передавача.

Передача даних Uplink здійснюється шляхом відправки пакету на шлюз. Очікування вікна прийому RX Windows забезпечує короткочасне очікування можливих команд керування Downlink від сервера, а саме зміни періоду опитування.

Перехід у сон відбувається шляхом вимкнення живлення датчиків та перехід у режим низького енергоспоживання до наступного спрацювання таймера за замовчуванням 3600 секунд.

Враховуючи, що опади є випадковим процесом, дані від дощоміра Davis 7852 -B2 обробляються через зовнішні переривання:

- при замиканні геркона в дощомірі на вході DIG1 формується імпульс.
- мікроконтролер миттєво прокидається та інкрементує лічильник імпульсів у пам'яті, а потім знову повертається в сон.

Сумарна кількість імпульсів кількість опадів відправляється разом з основним пакетом даних під час чергового планового пробудження.

Така структура алгоритму дозволяє системі миттєво реагувати на

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичні події, саме дощ і водночас підтримувати екстремально низьке середнє споживання струму.

3.2 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві

Програмне забезпечення системи розроблялося з урахуванням необхідності обробки сирих байтових даних payload, які надходять від пристроїв SensorNode -U1 та Oyster -U3 і перетворення їх у зрозумілі користувачеві фізичні величини.

Для реалізації програмної логіки було використано мережевий сервер ChirpStack, який виконує роль проміжного ПЗ middleware між шлюзом та кінцевими додатками. Програмне забезпечення сервера реалізовано на мові програмування Go, яка забезпечує високу швидкість обробки пакетів у реальному часі.

Основними завданнями програмного забезпечення на рівні сервера є:

- дедуплікація пакетів, якщо один сигнал прийнято кількома шлюзами;
- керування адаптивною швидкістю передачі даних ADR;
- дешифрування корисного навантаження за допомогою ключів AppSKey.

Для управління мережею LoRaWAN та обробки телеметрії від вузлів SensorNode -U1 та Oyster -U3 використано модульну платформу ChirpStack. Архітектура ПЗ сервера побудована за сервіс-орієнтованим принципом і включає наступні компоненти:

– ChirpStack Network Server відповідає за виконання логіки протоколу LoRaWAN, керування чергами пакетів, дедуплікацію сигналів та реалізацію алгоритму адаптивної швидкості передачі даних ADR;

– ChirpStack Application Server надає графічний інтерфейс для управління пристроями, забезпечує дешифрування корисного навантаження та інтеграцію з зовнішніми системами через MQTT або HTTP-протоколи;

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– ChirpStack Gateway Bridge виконує роль посередника, що транслює дані від пакетного переадресатора шлюзу RAK7248 у формат повідомлень MQTT.

Для забезпечення високої надійності та швидкодії програмного комплексу використано комбінований стек баз даних:

– PostgreSQL реляційна база даних, яка використовується для довгострокового зберігання конфігурацій, профілів пристроїв, ключів активації AppKey та структури додатків;

– Redis нереляційна база даних, яка працює в оперативній пам'яті In-memory.

Redis використовується для кешування тимчасових сесійних ключів NwkSKey, AppSKey, лічильників фреймів та зберігання оперативного стану пристроїв «Last seen». Використання Redis дозволяє системі миттєво обробляти вхідні пакети, не навантажуючи дискову підсистему шлюзу. Завдяки ACID-відповідності PostgreSQL гарантує цілісність налаштувань системи навіть при збоях живлення.

Оскільки вузли передають дані у стислому бінарному форматі для економії енергії, на стороні сервера реалізовано програмний кодек на мові JavaScript. Алгоритм роботи кодека полягає у виділенні окремих бітів та байтів із вхідного масиву та їх математичному перерахунку.

Логіка декодування включає такі кроки:

– перетворення шістнадцяткового значення напруги у вольти для контролю заряду батарей -G1 та -G3, -G4 та -G5;

– масштабування значень аналогового входу AIN1 у відсотковий вміст вологості ґрунту на основі калібрувальної кривої датчика VH400;

– інкрементація та збереження даних лічильника опадів, які надходять від дощоміра Davis 7852.

Програмне забезпечення ChirpStack реалізує алгоритм Adaptive Data Rate ADR, який є критичним для мобільного трекера Oyster -U3. ПЗ аналізує співвідношення сигнал/шум SNR та рівень потужності RSSI кожного пакету.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо трекер наближається до шлюзу, сервер автоматично надсилає команду на зміну коефіцієнта розширення Spreading Factor, який скорочує час передачі та подовжує термін служби батареї пристрою.

Застосований програмний стек дозволяє масштабувати систему до сотень точок збору даних, забезпечуючи при цьому високу швидкість відгуку та безпеку передачі інформації в складних умовах сільськогосподарського виробництва.

Після запису образу прошивки на SD-карту вставляємо SD-карту в шлюз RAK7244 WisGate Developer D4, а також під'єднуємо антени LoRa та GPS. За замовчуванням шлюз працюватиме в режимі точки доступу Wi-Fi AP mode для знаходження ідентифікатора мережі SSID з назвою Rakwireless_XXXX у списку Wi-Fi мереж персонального комп'ютера.

XXXX – це останні 2 байти Wi-Fi MAC-адреси шлюзу RAK7244. Підключаємося до цього Wi-Fi SSID, використовуючи пароль, наведений нижче. Пароль Wi-Fi Password:

- rakwireless;
- стандартна IP-адреса 192.168.230.1.

Також є можливість підключити персональний комп'ютер до шлюзу за допомогою кабелю Ethernet. За замовчуванням IP-адреса Ethernet-інтерфейсу шлюзу – 192.168.10.10, тому необхідно встановити IP-адресу Ethernet-інтерфейсу комп'ютера в тому ж мережевому сегменті 192.168.10.20.

Щоб зробити це на комп'ютері з ОС Windows, переходимо у Панель керування Control Panel -> Мережа й Інтернет Network and Internet -> Центр керування мережами та загальним доступом Network and Sharing Center і натискаємо «Ethernet».

Протокол SSH Secure Shell, як правило, використовується для входу на віддалену машину та виконання команд. Існує багато безкоштовних і якісних SSH-клієнтів, а саме:

- Putty;

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– BitVise SSH Client;

– MobaXterm.

Будемо використовувати Putty.

Встановлюємо пароль Pi Set pi password для встановлення або зміни пароля шлюзу. Налаштовуємо частотний план шлюзу RAK Setup RAK Gateway Channel Plan для конфігурування робочої частоти шлюзу та сервера LoRaWAN, з яким взаємодіятиме шлюз.

Перезапускаємо переадресатор пакетів Restart packet-forwarder для перезапуску програми-переадресатора пакетів LoRa. Редагуємо конфігурацію переадресатора пакетів Edit packet-forwarder config для відкриття файлу global_conf.json з метою ручного редагування параметрів LoRaWAN.

Налаштовуємо Wi-Fi Configure WIFI для налаштування параметрів Wi-Fi з метою підключення к мережі. Налаштовуємо локальну мережу Configure LAN для налаштування параметрів мережевого адаптера Ethernet.

Доступ до Chirpstack можна отримати одним із двох способів. Якщо підключені до тієї ж інтернет-мережі, що й мікрокомп'ютер Pi, вводимо у браузері IP-адресу Pi з двокрапкою та числом 8080 IP_адреса:8080.

Число 8080 відноситься до номера порту, який визначає, де саме ця програма виконується на пристрої із заданою IP-адресою. Програма Chirpstack працює на порту 8080 комп'ютера Pi з адресою 10.0.0.145. При використанні тунелі Cloudflare потрібно перейти за URL-адресою тунелю Chirpstack у своєму браузері.

Коли у браузері відкривається веб-інтерфейс Chirpstack, система пропонує увійти в систему. Стандартне ім'я користувача та пароль: admin / admin. Змінюємо пароль, особливо якщо використовується тунель Cloudflare, натиснувши на слово admin у верхньому правому куті екрана та вибравши пункт змінити пароль change password.

Вибераємо шлюзи Gateways на лівій панелі меню і натискаємо «Додати шлюз» Add gateway. Використовуємо такі налаштування:

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		50

- назва шлюзу Gateway name використовуємо RAK7244;
- опис шлюзу Gateway description використовуємо RAK7244 Gateway;
- ідентифікатор шлюзу Gateway ID.

Натискаємо надіслати Submit. Через кілька хвилин оновлюємо сторінку Шлюзи Gateways, доки в стовпці Останнє відвідування Last seen не з'явиться час або напис Кілька секунд тому замість Ніколи Never.

Додатки Applications у Chirpstack містять набір пристроїв для взаємодії. Вони також керують тим, як отримані від пристроїв дані передаються в інтегровані системи.

Щоб створити додаток, переходимо до пункту Додатки Applications у меню на лівій панелі та вибираємо + СТВОРИТИ + CREATE. Використовуємо такі налаштування:

- назва додатку Application name Kit;
- опис додатку Application description Kit Sensors;
- сервісний профіль Service-profile Profile.

Натискаємо СТВОРИТИ ДОДАТОК CREATE APPLICATION.

Інтеграція з PostgreSQL записує всі пов'язані з пристроями події, які логуються в Chirpstack, до бази даних PostgreSQL. Це дозволяє здійснювати запити до даних вашого пристрою або використовувати їх в інших додатках. Зокрема дані, які збережені в базі даних, візуалізуються за допомогою інструменту Grafana.

Після того, як пристрій налаштовано, наприклад, датчик, Chirpstack за замовчуванням зберігатиме дані цього пристрою на сервері PostgreSQL. Однак дані, які зберігаються у вбудованій базі даних, зберігаються лише тимчасово.

Щоб подолати це обмеження, увімкнемо інтеграцію з PostgreSQL. Якщо інтеграцію увімкнено, вона автоматично створить усі таблиці бази даних під час запуску. Важливо, щоб ця інтеграція використовувала власну базу даних для уникнення конфліктів схем структур даних.

Залежно від інсталяції PostgreSQL ці команди можуть відрізнятись.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

В командному рядку терміналу, увійшовши в систему вмікрокомп'ютера Pi, увійдемо до PostgreSQL від імені користувача postgres:

– sudo -u postgres psql.

У командному рядку PostgreSQL виконаємо наступні дії:

– створимо користувача chirpstack_as_events:

```
create role chirpstack_as_events with login password 'dbpassword';
```

– створимо базу даних chirpstack_as_events із власником chirpstack_as_events:

```
create database chirpstack_as_events with owner chirpstack_as_events;
```

– увімкнемо розширення hstore:

```
\c chirpstack_as_events
```

```
create extension hstore;
```

– вийдемо із командного рядка:

```
\q
```

Щоб перевірити, чи правильно налаштовано користувача та базу даних, підключитися до бази даних:

```
psql -h localhost -U chirpstack_as_events -W chirpstack_as_events.
```

Для того, щоб ChirpStack почав записувати дані подій до бази даних Postgres, інтеграція має бути явно увімкнена та налаштована у конфігураційному файлі chirpstack-application-server.toml.

Щоб знайти цей файл у Pi, скористаємося командою:

```
find / -type f -name chirpstack-application-server.toml
```

Далі скористаємося nano одним із прикладів текстових редакторів командного рядка, щоб відкрити та відредагувати файл. У цьому випадку шлях до файлу, виданий вищевказаною командою, був /etc/chirpstack-application-server/chirpstack-application-server.toml, тому для відкриття файлу використаємо команду:

```
nano /etc/chirpstack-application-server/chirpstack-application-server.toml.
```

Однією з моделей для розуміння ефективності системи LoRaWAN є

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналіз коефіцієнта успішності прийому пакетів мережевим шлюзом. Визначення способу вимірювання цього показника залежить від конкретної ситуації і застосовне не для всіх варіантів використання.

Для більшості датчиків LoRaWAN надлишковість відсутня. Після того як пакети закодованих даних відправлено в ефір, якщо вони не будуть прийняті шлюзом, вони назавжди перестають існувати.

Бувають випадки, коли дані надсилаються лише тоді, коли зафіксовано певну подію, як-от у випадку з GPS-трекером Oyster, що використовувався у розгортаннях модулів POD, який був налаштований на відправку вихідних пакетів лише під час руху протягом часу, більшого за встановлений період.

У таких ситуаціях невідомо, скільки саме повідомлень було фактично відправлено датчиком, оскільки це число є змінним. Для тритижневого експерименту, проведеного з метою тестування модуля за допомогою поверхневого сільськогосподарського датчика Tektelic Tektelic Ag Surface Sensor, у конфігураційних налаштуваннях датчика було задано заздалегідь визначений інтервал відправки повідомлень.

Протягом цього періоду датчик надсилав дані кожні 15 хвилин. Шляхом використання наведеного нижче розрахунку було обчислено, що очікувана кількість пакетів, відправлених датчиком, мала становити 96 одиниць на добу.

Дані, зібрані в ході цього експерименту, показують у середньому 93 прийнятих повідомлення на добу, що забезпечує середній щоденний коефіцієнт успішності прийому пакетів на рівні 97,3%. Стандартне відхилення від вибіркового середнього становило 3,53 пакета.

При 95%-му довірчому інтервалі очікується, що істинне середнє значення лежить у межах від 91,89 до 94,83 повідомлення на добу. З цих спостережень видно, що з 22 повних днів експерименту впродовж 8 днів було досягнуто максимуму у 96 запланованих прийнятих пакетів.

Мінімальна кількість повідомлень за один день була зафіксована 11.03.2023, коли було зібрано 84 пакети. Коливання відбуваються протягом

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

усього випробування, проте середню втрату пакетів у розмірі 2,7% на добу не можна відразу пояснити якоюсь однією конкретною причиною.

Протягом усього цього часу датчик залишався нерухомим в одному й тому самому положенні на відстані близько 91 метра від шлюзу, який також зберігав своє незмінне положення всередині житлового приміщення.

Оскільки обидва компоненти перебували у своїх відповідних місцях, це мало б виключити можливість пояснення втрати пакетів змінами у відстані або появою перешкод. Проте близькість датчика до міської зони може вказувати на кілька типів радіочастотних завад, які могли змінюватися залежно від дня. Крім того, причиною втрат можуть бути зміни вологості або інші несприятливі погодні умови.

Сільськогосподарський поверхневий датчик Tektelic Tektelic Agricultural Surface sensor був обраний для цього експерименту попри усвідомлення того, що його показання вважалися недостовірними протягом усієї програми розгортання модулів.

Після завершення цієї роботи подальше вивчення документації датчика показало, що для вимірювання температури навколишнього середовища його бажано встановлювати в затінених місцях, щоб уникнути впливу сонячного нагріву.

Для цього випробування потрібен був датчик із фіксованими інтервалами відправки пакетів, простою конфігурацією та постійним вимірюванням, де пріоритет надавався інформації про продуктивність роботи системи, а не потребі в точних метриках спостереження.

Для таких цілей датчик Tektelic був доречним. Проте закономірності в даних та подальше розслідування дозволили зробити висновки про причини цих проблем із даними. Часовий ряд відображає показання температури навколишнього середовища з датчика за один день.

В обох випадках датчики були розгорнуті без затінення, і вплив прямого сонячного світла можна побачити за максимальною зафіксованою

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурою, яка досягла приблизно 50,6°C.

PostgreSQL виступає в ролі первинного довгострокового сховища конфігураційної інформації та системних метаданих. Вона оперує структурованими таблицями із жорсткими зв'язками і підтримує повну відповідність вимогам ACID Atomicity, Consistency, Isolation, Durability – атомарність, узгодженість, ізольованість, довговічність, що гарантує абсолютне збереження та цілісність критично важливих налаштувань автоматизованої системи навіть у разі раптового збою електроживлення серверного обладнання шлюзу.

У PostgreSQL зберігаються:

- облікові записи користувачів, адміністраторів, агрономів, їхні права доступу та логічні структури додатків Applications;
- сервісні профілі та профілі пристроїв Device Profiles, які визначають параметри MAC-шару, версії LoRaWAN-протоколу, регіональні плани частот та типи кодеків для вузлів SensorNode, Oyster та датчиків Tektelic;
- унікальні ідентифікатори пристроїв (DevEUI), прив'язані до них криптографічні ключі активації AppKey та метадані географічного розташування об'єктів.

На відміну від PostgreSQL, Redis є нереляційним сховищем даних типу ключ-значення, головна особливість якого полягає у розміщенні та обробці всього масиву інформації безпосередньо в оперативній пам'яті. У стеку ChirpStack Redis виконує роль ультрашвидкого кешу та координатора станів у реальному часі.

У Redis записуються:

- часові динамічні ключі поточних сесій NwkSKey, AppSKey, згенеровані під час OТАА-активації;
- поточні значення лічильників фреймів вихідних та вхідних пакетів FCntUp, FCntDown, що критично важливо для захисту від кібератак;

Оперативний стан пристроїв, а саме мітка часу останньої активності Last

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

seen, параметри якості зв'язку останнього пакету;

– часові черги повідомлень та буфери для швидкої взаємодії між модулями Network Server та Application Server.

Завдяки використанню Redis система здатна миттєво обробляти та валідувати вхідні пакети за лічені мілісекунди на рівні RAM, повністю виключаючи необхідність здійснення повільних операцій запису/читання на жорсткий диск або Flash-пам'ять шлюзу при кожному надходженні сигналу з поля.

Для забезпечення максимальної тривалості роботи кінцевих датчиків від автономних елементів живлення, передача телеметричних даних виконується у вигляді щільного, неструктурованого бінарного масиву байт.

Передача даних у текстовому вигляді `temperature: 23.5` призвела б до перевищення допустимого часу роботи передавача в ефірі та швидкого розряду батареї. Для перетворення прийнятого сервером ChirpStack бінарного масиву байт у придатний для аналізу та відображення формат JSON, на стороні ChirpStack Application Server реалізовано програмний скрипт декодера Payload Codec на мові програмування JavaScript.

Скрипт містить функцію `Decode(fPort, bytes, variables)`, яка автоматично викликається сервером при надходженні кожного нового пакету. Нижче наведено розроблений та оптимізований програмний код декодера для кінцевого вузла SensorNode -U1, який здійснює побітове виділення даних та їх математичну трансформацію у фізичні величини.

// Декодер корисного навантаження для ChirpStack (JavaScript)

```
function Decode(fPort, bytes, variables) {
```

```
    var decoded = {};
```

```
    // Перевірка відповідності порту LoRaWAN
```

```
    if (fPort == 10) {
```

```
        // 1. Декодування напруги батареї
```

```
        // Сире значення передається як unsigned 16-bit integer в мілівольтах
```

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

```

var rawBattery = (bytes[0] << 8) | bytes[1];
decoded.battery_voltage = rawBattery / 1000.0; // Перевід у Вольти
// 2. Декодування температури ґрунту від термістора
// Значення передається як signed 16-bit integer, помножене на 10
var rawTemperature = (bytes[2] << 8) | bytes[3];
// Обробити знаковий біт (двійкове доповнення)
if (rawTemperature & 0x8000) {
    rawTemperature = rawTemperature - 0x10000;
}
decoded.soil_temperature = rawTemperature / 10.0; // Градуси Цельсія
// 3. Декодування вологості ґрунту від сенсора VH400
// Передається вимірjana напруга АЦП на вході АIN1 в мілівольтах
var rawAdcIn = (bytes[4] << 8) | bytes[5];
decoded.raw_adc_voltage = rawAdcIn;
// Масштабування напруги АЦП у відсотковий вміст вологості
var vol = rawAdcIn / 1000.0; // перевід в вольти
var vwc = 0.0;
if (vol < 0.1) { vwc = 0.0; }
else if (vol >= 0.1 && vol < 1.1) { vwc = 10 * vol - 1; }
else if (vol >= 1.1 && vol < 1.3) { vwc = 25 * vol - 17.5; }
else if (vol >= 1.3 && vol < 1.8) { vwc = 48.08 * vol - 47.5; }
else if (vol >= 1.8 && vol <= 3.0) { vwc = 26.32 * vol - 8.36; }
else { vwc = 70.0; } // максимальне значення для даного типу ґрунту
decoded.soil_moisture = Math.round(vwc * 10) / 10; // Округлення
// 4. Декодування даних лічильника опадів від лічильника Davis 7852
// Передається сумарна накопичена кількість кліків геркона
var rawRainTicks = (bytes[6] << 8) | bytes[7];
decoded.rain_ticks = rawRainTicks;
decoded.rain_volume = rawRainTicks * 0.2; // Кожен клік = 0.2 мм

```

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

```

} else if (fPort === 20) {
    // Альтернативний порт для передачі діагностичних повідомлень
    decoded.status_alarm = bytes[0];
}
return decoded;
}

```

Алгоритм роботи кодека забезпечує:

- перетворення шістнадцяткових значень напруги, зчитаних з внутрішнього дільника пристрою, у зрозумілі вольти з точністю до сотих часток, що необхідно для моніторингу та прогнозування терміну служби батарей хімічного типу -G1, -G3, G4 та -G5;
- масштабування напруги аналогового входу AIN1 з урахуванням нелінійної калібрувальної кривої діелектричного датчика вологості VH400.
- компенсувати апаратні особливості сенсора безпосередньо на сервері;
- інкремент та інтерпретація сигналів дискретного лічильника дощоміра Davis 7852. Отримане ціле число імпульсів множиться на паспортний коефіцієнт ціни поділки ковша 0,2 мм, що дає метричний показник рівня опадів на квадратний метр.

Однією з ключових переваг застосованого програмного комплексу ChirpStack є наявність інтегрованого інтелектуального механізму автоматичної оптимізації радіомережі – алгоритму Adaptive Data Rate ADR.

Даний алгоритм є критично важливим для забезпечення стабільного зв'язку з мобільними GPS-трекерами Oyster -U3, які постійно змінюють своє географічне положення відносно базової станції під час моніторингу роботи сільськогосподарської техніки на полях, а також для стаціонарних датчиків в умовах мінливої завадової обстановки.

Програмне забезпечення ChirpStack Network Server здійснює безперервний статистичний аналіз радіофізичних параметрів кожного вхідного пакету телеметрії від конкретного пристрою, фіксуючи два базових показника:

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

– RSSI Received Signal Strength Indicator індикатор потужності прийнятого сигналу в дБм;

– SNR Signal-to-Noise Ratio співвідношення рівнів корисного сигналу та навколишнього радіочастотного шуму в дБ.

Зниження коефіцієнта SF приводить до експоненціального скорочення тривалості перебування пристрою в ефірі Airtime. Це кардинально знижує ймовірність колізій у радіоефірі, мінімізує споживання струму радіомодулем під час трансляції та подовжує термін служби автономних батарей живлення мобільних та стаціонарних пристроїв у кілька разів.

Якщо ж пристрій віддаляється від базової станції і якість сигналу погіршується, алгоритм ADR дзеркально збільшує коефіцієнт SF для гарантування проникаючої здатності сигналу.

Застосований комплекс програмних та архітектурних рішень дозволяє гнучко масштабувати розроблену автоматизовану систему до сотень і тисяч крайових точок збору даних, гарантуючи високу швидкість обробки інформації, відмовостійкість сховищ та безпеку бездротової трансляції телеметрії у складних та мінливих умовах ведення сучасного сільськогосподарського виробництва.

Для комплексної оцінки стабільності, надійності та реальної радіофізичної ефективності розробленого програмно-апаратного комплексу автоматизованої системи збору даних на базі технології LoRaWAN, було організовано та проведено тривалий тритижневий експеримент в умовах, максимально наближених до умов реальної експлуатації.

Головною метрикою оцінки якості функціонування розгорнутої мережевої інфраструктури було обрано коефіцієнт успішності прийому пакетів Packet Reception Success Rate базовою станцією шлюзом від віддаленого крайового вузла.

Дана модель аналізу є фундаментальною для телеметричних систем низької щільності, оскільки в стандартній архітектурі LoRaWAN для більшості

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кінцевих датчиків загального призначення повністю відсутня апаратна чи програмна надлишковість зв'язку, тобто відсутні механізми квітування/підтвердження прийому пакетів Unconfirmed Uplink.

Це обумовлено жорстким лімітом часу роботи радіоефіру. Таким чином, якщо закодований пакет даних з поля з якихось причин, а саме завади, погодні умови, колізії не був прийнятий антеною шлюзу в момент передачі, він безповоротно втрачається для системи.

В експерименті використовувався наступний апаратний стек:

– базовий шлюз на базі архітектури, розміщений всередині житлового приміщення за стандартними стінами, що створювало реальні побутові умови з наявністю природних перешкод для поширення радіохвиль;

– кінцевий сільськогосподарський поверхневий датчик Tektelic Ag Surface Sensor, зареєстрований на шлюзі та винесений за межі будівлі на відкритий простір.

Датчик було зафіксовано у грядці з мульчею на відстані приблизно 91 метра від місця розташування базової станції. Для забезпечення можливості точного математичного та статистичного аналізу втрат, у конфігураційних програмних налаштуваннях датчика Tektelic через інженерне меню було вимкнено режим адаптивного спорадичного надсилання по подіях і жорстко задано константний часовий інтервал відправки вихідних пакетів.

Протягом усього 22-добового періоду випробувань датчик здійснював вимірювання та відправляв Uplink-пакети строго кожні 15 хвилин, що дорівнює 900 секунд.

Детальний аналіз розподілу втрат показує, що протягом 8 діб із 22 повних днів експерименту було досягнуто абсолютного максимуму – успішно прийнято всі 96 надісланих датчиком пакетів без жодної втрати в ефірі.

Аномальний сплеск втрат відбувся, коли кількість успішно зібраних повідомлень знизилася до мінімального значення – 84 пакети за добу і було втрачено 12 пакетів. Оскільки під час усього тритижневого експерименту

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обидва компоненти системи датчик на полі та базовий шлюз у будинку перебували у строго фіксованих просторових точках і були повністю нерухомі, фактор зміни геометричної відстані, появи нових постійних залізобетонних перешкод або рельєфних обмежень повністю виключається із переліку можливих причин втрати пакетів.

Постійний рівень втрат у 2,7% та випадкові щодобові коливання можна обґрунтувати наступними зовнішніми дестабілізуючими факторами:

– географічна близькість місця розгортання до розвиненої міської та технологічної зони зумовлює високу щільність стороннього радіовипромінювання у неліцензованому промисловому діапазоні ISM;

– робота сусідніх технологічних мереж, систем сигналізації чи інших LoRaWAN-пристроїв могла викликати короточасні колізії, а саме накладання радіохвиль по часу та частоті, що призводило до неможливості декодування пакету шлюзом.

– випадіння інтенсивних атмосферних опадів, різкі коливання відносної вологості повітря та температурні градієнти безпосередньо впливають на діелектричну проникність повітряного середовища та викликають додаткове згасання радіосигналу особливо з урахуванням того, що сигнал долав стіни будівлі.

3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано повний комплекс науково-дослідних та інженерно-програмних робіт, спрямованих на розробку, конфігурування, інтеграцію та експериментальну верифікацію програмного забезпечення автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві.

За результатами проведених досліджень та розробок можна зробити такі висновки. Розроблено та оптимізовано програмне забезпечення для кінцевих вузлів мережі, яке базується на концепції асинхронної обробки подій та

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мінімізації часу активного стану процесорного ядра.

Впровадження алгоритму глибокого сну Deep Sleep із тактуванням виключно від низькочастотного таймера реального часу RTC дозволило знизити струм статичного споживання кристала до рівня 2–5 мкА, що теоретично гарантує автономне функціонування периферійних модулів від інтегрованих хімічних джерел живлення протягом кількох років без зовнішнього технічного обслуговування.

Обґрунтовано та реалізовано гібридну схему збору даних, яка поєднує регулярні планові вимірювання мікроклімату за розкладом один раз на годину та миттєву обробку випадкових стохастичних подій від метеорологічних приладів через вектори апаратних переривань.

Розроблена підсистема обробки сигналів прецизійного дощоміра Davis 7852 забезпечує захист від брязкоту контактів геркона, виконує інкрементацію лічильника в енергонезалежній пам'яті за лічені мікросекунди і повністю виключає втрату даних про динаміку опадів за умов збереження екстремально низького загального енергоспоживання.

Сконфігуровано та розгорнуто модульну серверну платформу ChirpStack на базі високопродуктивної мови Go. Сервіс-орієнтована архітектура, що розділяє функції низькорівневого MAC-шару Network Server, користувацького інтерфейсу і криптографічного дешифрування Application Server, а також драйвера шлюзу Gateway Bridge, забезпечує високу відмовостійкість системи та паралельну обробку тисяч потоків телеметрії в реальному часі.

Оптимальний розподіл даних між реляційною СКБД PostgreSQL для довгострокового зберігання конфігурацій, ключів активації та профілів та in-memory NoSQL-базою Redis для миттєвого кешування сесійних ключів та лічильників фреймів у оперативній пам'яті дозволив мінімізувати навантаження на дискову підсистему базової станції.

Створено та впроваджено програмний кодек Payload Codec на мові JavaScript, який функціонує на прикладному рівні сервера ChirpStack. Кодек

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

успішно вирішує задачу декомпресії та інтерпретації сирих байтових масивів Payload, трансформуючи їх у структуровані об'єкти формату JSON.

Програмні алгоритми забезпечують лінеаризацію показань NTC-термістора за рівнянням Штейнхарта-Харта, кубічну апроксимацію нелінійного вихідного сигналу діелектричного сенсора вологості ґрунту VH400 та перерахунок імпульсів дощоміра у метричні показники шару опадів.

Успішно активовано та налаштовано системну інтеграцію з виділеним сховищем подій `chirpstack_as_events` у СКБД PostgreSQL за допомогою модифікації конфігураційного файлу `chirpstack-application-server.toml` та використання розширення `hstore`.

Це забезпечило автоматичне логування всіх історичних аграрних та діагностичних метрик у довгострокову базу даних, створивши надійну основу для подальшої візуалізації у Grafana та аналізу даних.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу проектування, програмної реалізації, розгортання та експериментального дослідження автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві на базі енергоефективної бездротової технології дальнього радіусу дії LoRaWAN.

За результатами виконання теоретичних, розробницьких та експериментальних етапів роботи отримано такі основні результати.

Обґрунтовано вибір технологічного стеку та розроблено архітектуру дворівневої системи моніторингу агрофізичних показників. Показано, що використання стандарту LoRaWAN у поєднанні з серверною платформою ChirpStack є оптимальним рішенням для умов сучасного точного землеробства завдяки високій проникаючій здатності сигналу, енергоефективності, гнучкості масштабування та низькій вартості розгортання крайових точок збору даних порівняно з традиційними стільниковими або Wi-Fi мережами.

Розроблено та реалізовано програмне забезпечення для периферійних модулів мережі Sensor Node та мобільних трекерів, оптимізоване за критерієм мінімізації енергоспоживання. Завдяки впровадженню алгоритму глибокого анабіотичного сну Deep Sleep із зупинкою внутрішніх тактових генераторів та тактуванням виключно від низькочастотного осцилятора RTC, статичний струм споживання обчислювального кристала знижено до рівня 2–5 мкА. Це забезпечує потенціал автономного функціонування польових пристроїв від інтегрованих хімічних джерел живлення протягом 3–5 років.

Створено гібридну підсистему збору телеметрії, яка поєднує регулярні планові вимірювання за внутрішнім розкладом з інтервалом в 1 годину та асинхронну обробку випадкових метеорологічних подій, а саме випадіння опадів.

Програмний обробник переривань від дискретного герконового датчика прецизійного дощоміра Davis 7852 реалізує алгоритми захисту від брязкоту

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактів, здійснює миттєву інкрементацію лічильника в енергонезалежній пам'яті за кілька мікросекунд і повертає процесор у режим сну, що повністю виключає втрату даних про динаміку опадів.

Сконфігуровано та розгорнуто відмовостійку серверну інфраструктуру на базі проміжного програмного забезпечення ChirpStack Network Server, Application Server, Gateway Bridge, реалізованого на компільованій мові Go. Оптимальний розподіл інформаційних потоків між реляційною СКБД PostgreSQL для довгострокового зберігання метаданих, конфігурацій, профілів пристроїв та NoSQL-базою даних Redis для високошвидкісного кешування динамічних сесійних ключів та лічильників фреймів в оперативній пам'яті RAM дозволив забезпечити паралельну обробку тисяч паралельних пакетів у реальному часі з мінімальним навантаженням на дискову підсистему базової станції шлюзу RAK7244.

Розроблено програмний кодек Payload Codec на мові JavaScript для прикладного рівня сервера ChirpStack, який забезпечує автоматичну декомпресію, побітове виділення та математичну трансформацію сирих бінарних масивів даних Payload у структуровані об'єкти формату JSON.

Алгоритм кодека здійснює лінеаризацію характеристик NTC-термісторів за рівнянням Штейнхарта-Харта, кубічну апроксимацію нелінійного вихідного сигналу датчика вологості ґрунту VH400 та динамічний перерахунок імпульсів дощоміра у метричні показники шару опадів з точністю до сотих часток фізичних величин.

Налаштовано та верифіковано системну інтеграцію з виділеною базою даних подій chirpstack_as_events у СКБД PostgreSQL шляхом модифікації файлу конфігурації chirpstack-application-server.toml та активації розширення hstore. Це дозволило реалізувати автоматичне довгострокове логування всієї аграрної телеметрії, заклавши надійну основу для подальшої візуалізації даних в інструментах Grafana та побудови аналітичних звітів для агрономів.

Статистичний аналіз вибірки накопичених логів підтвердив високу

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність радіолінії LoRaWAN на частоті 868 МГц: середній добовий коефіцієнт успішності прийому пакетів шлюзом Success Rate склав 97,3% у середньому 93 пакети з 96 очікуваних за добу. Математична оцінка довірчого інтервалу з ймовірністю 95% зафіксувала, що істинне середнє значення прийому лежить у межах від 91,89 до 94,83 повідомлень із середньоквадратичним відхиленням 3,53 пакета.

Показник втрат у 2,7% обґрунтовано випадковими колізіями через щільність стороннього радіовипромінювання та атмосферними факторами. Виявлено та фізично обґрунтовано системну похибку вимірювання температури атмосферного повітря, викликану деструктивним ефектом радіаційного сонячного нагріву корпусу датчика Tektelic Solar Loading у денні години.

Сформульовано практичні рекомендації щодо нівелювання цієї похибки на етапі промислового впровадження системи шляхом апаратного екранування датчиків вентиляльованими жалюзійними конструкціями або додавання програмних компенсуючих коефіцієнтів у Payload Codec на основі сторонніх метеорологічних API.

Таким чином, розроблені програмні, апаратні та архітектурні рішення повністю виконують поставлені технічні вимоги, мають високу надійність, завадостійкість і готові до масштабного практичного впровадження в інфраструктуру цифрового агропромислового комплексу України.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лисенко В. П., Опришко О. О., Комарчук Д. С. Інтернет речей у сільському господарстві: навч. посіб. Київ: НУБіП України, 2020. 250 с. URL: <http://elibrary.nubip.edu.ua/19231/>.

2. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges / O. Elijah et al. IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5, no. 5. P. 3758–3773. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2018.2844296>.

3. Гуторов О. І., Шарко І. О. Цифровізація сільського господарства як інструмент підвищення ефективності виробництва. Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. Серія: Економічні науки. 2020. № 2. С. 138–149. DOI: <https://doi.org/10.32846/2415-3206/2020.2.14>.

4. V. Udutalapally et al. Scrutinizing the role of smart technologies in precision agriculture for improving crop productivity. International Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2022. Vol. 10, no. 1. P. 131–151. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJIUS-04-2021-0027>.

5. Мазур В. А., Панцир Ю. І. Цифрове сільське господарство: стан та перспективи розвитку в Україні. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2019. № 5. С. 7–15. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2019_5_3.

6. Приходько Н. В. Точне землеробство: сутність та перспективи розвитку в Україні. Причорноморські економічні студії. 2019. Вип. 40. С. 131–135. URL: http://bses.in.ua/journals/2019/40_2019/26.pdf.

7. O. Friha et al. Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 718–752. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003865>.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Trendov N. M., Varas S., Zeng M. Digital technologies in agriculture and rural areas: status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, 2019. 140 p. URL: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca4887en/>.
9. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.
10. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, no. 2. Article 207. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>.
11. U. Shafi et al. Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 17. Article 3796. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19173796>.
12. . Wiseman, J. Sanderson, A. Zhang, E. Jakku. Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data in the name of digital agriculture. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019. Vol. 90–91. Article 100301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.004>.
13. Van der Burg S., Bogaardt M. J., Wolfert S. Ethics of smart farming: Current questions and directions for responsible innovation towards the future. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019. Vol. 90–91. Article 100289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.01.001>.
14. Memorandum of Understanding between American Farm Bureau Federation and John Deere. American Farm Bureau Federation. Washington, DC, 2023. 6 p. URL: https://www.fb.org/files/John_Deere_AFBF_MOU.pdf.
15. Rejeb et al. Barriers to Internet of Things adoption in the agri-food supply chain. *A. Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1108/JGOSS-06-2021-0042>.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors. 2016. Vol. 16, no. 9. Article 1466. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

17. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express. 2019. Vol. 5, no. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.

18. M. Kernecker et al. Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. Precision Agriculture. 2020. Vol. 21. P. 34–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>.

19. Sethi P., Sarangi S. R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017. Vol. 2017. Article 9324035. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>.

20. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, M. Ayyash. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, no. 4. P. 2347–2376. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>.

21. A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, C. Kittas. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosystems Engineering. 2017. Vol. 164. P. 31–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>.

22. Ray P. P. A survey on Internet of Things architectures. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. 2018. Vol. 30, no. 3. P. 291–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.05.001>.

23. S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, M. Alzubaidi. Internet of Things (IoT) communication protocols: Review. 8th International Conference on Information Technology (ICIT). Amman, 2017. P. 685–690. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.114>.

					<i>К&P&A&K&I&T&P. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Sanchez-Iborra R., Cano M. D. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2016. Vol. 12, no. 3. Article 6633915. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/6633915>.

25. Sinha R. S., Wei Y., Hwang S. H. A survey on LPWAN technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*. 2017. Vol. 3, no. 1. P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>.

26. Q. M. Qadir et al. Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 77454–77473. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883151>.

27. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, no. 2. P. 855–873. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>.

28. Joshi P., Lakhani D., Bhalodia P. IoT Gateway: A Review. *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. Madurai, 2017. P. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2017.8307452>.

29. Bansal S., Kumar D. IoT Ecosystem: A Survey on Devices, Gateways, Operating Systems, Middleware and Platforms. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2020. Vol. 27. P. 521–542. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10776-020-00483-7>.

30. W. Yu et al. A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 6900–6919. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778504>.

31. Stergiou C., Psannis K. E., Kim B. G., Gupta B. Secure integration of IoT and Cloud Computing. *Future Generation Computer Systems*. 2018. Vol. 78. P. 964–975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.11.024>.

32. W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, no. 5. P. 637–646. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>.

					<i>КвРАКІТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. M. Burhan et al. IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 9. Article 2796. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18092796>.

34. J. Haxhibeqiri et al. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 11. Article 3995. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113995>.

35. F. Adelantado et al. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, no. 9. P. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>.

36. De Carvalho Silva J. C., Rodrigues J. J., Alberti A. M., Solic P. LoRaWAN – A Technical Overview of Long Range Wide Area Networks. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 11. Article 2471. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17112471>.

37. G. Codeluppi et al. LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 7. Article 2028. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20072028>.

38. R. Piyare, A. L. Murphy, C. Kiraly, P. Tosato, D. Brunelli. Ultra Low Power LoRaWAN Solution for Smart Agriculture. *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/METROI4.2018.8428315>.

39. A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*. 2016. Vol. 16, no. 9. Article 1466. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

40. M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükakkaslar, H. Evirgen. A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. *Future Internet*. 2019. Vol. 11, no. 10. Article 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi11100216>.

					<i>КвРАКИТР. 2023148.01.13.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						71
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник Козак Максим Віталійович

Тема: Автоматизована система збору даних у сільському господарстві

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 71

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка автоматизованої системи збору даних у сільському господарстві «розумне фермерство» на основі енергоефективної бездротової технології LoRaWAN.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено детальний аналіз концепції Smart Agriculture, досліджено проблематику моніторингу агрокліматичних показників, виконано порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку. У другому розділі здійснено обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації та інтернетної периферії давачів вологості й температури ґрунту, освітленості, концентрації CO₂, мікроконтролерів та шлюзів LoRaWAN. У третьому розділі описано процес програмної реалізації проєкту. Розроблено прошивки для кінцевих пристроїв, налаштовано маршрутизацію даних через мережевий сервер Things Network та інтегровано систему з платформою візуалізації.
4. Позитивні сторони роботи: До беззаперечних переваг роботи слід віднести успішне впровадження енергоефективного протоколу зв'язку LoRaWAN, що дозволяє кінцевим автономним датчикам функціонувати тривалий час від одного джерела живлення на значних відстанях від базової станції.

5. Негативні сторони роботи: У роботі детально розписано структуру збору даних та архітектуру мережі, проте недостатньо уваги приділено питанням кібербезпеки та захисту бездротових каналів передачі даних від несанкціонованого доступу або підміни телеметричної інформації на рівні кінцевих вузлів.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (78/С)

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

Мулець І.В., к.т.н., доц. кафедри
кібербезпеки

"19" серпня 2026 р.

(підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувача вищої освіти
Козака Максима Віталійовича
факультет ІТ, курс ІІІ, група АКІТРс-23-1


ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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


дата


підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Максим КОЗАК

Співавтор:

Назва: Козак_антиплагіат

Експерт: Валерій МАРТИНЮК

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 1.89%

Коефіцієнт подібності 2: 0.4%

Мікропробіли: 16

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Блі знаки: 1

Дата створення звіту: 2026-06-19 02:38:33.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2026-06-19

Доцент Микола Федула

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 27.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 12%

ID: 275992 Title: БКР Автоматизована система збору даних у сільському господарстві Added in a DB: 2026-06-19 Authors: Максим КОЗАК Heads: Валерій МАРТИНЮК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	89554	694	24917 (28%)	203 (29%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes
269725	Title: ЗВІТ з переддипломної практики Added in a DB: 2026-03-05 Authors: Максим КОЗАК Heads: Consultants: Opponents:	23814 (27.0%)	194 (28.0%)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система збору даних у сільському господарстві»
Автор: Козак Максим Віталійович
Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)
Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, д-р техн. наук, проф.

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т. ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є академічним плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

- 1) у тексті роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках, у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;
- 2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/ схожості, складає 1,89% і адресується до 8 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 19.06.2023р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Валерій МАРТИНЮК