Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

До захисту допущено
Кафедрою комп'ютерних систем та робототехніки
протокол № ___ від ___ червня 2026 р.

завідувач кафедри _____ Максим ХРУСЛОВ
«____»_____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

МОДЕЛЬ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORA ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТУ

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Виконавець _____ **Олександр ПОКУСАЙ**

Науковий керівник _____ **Володимир КОПЄЙКІН**

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 54 сторінки, з яких 36 сторінки основної частини, що містить 9 рисунків, 2 таблиці, 15 найменувань у списку використаних джерел.

Метою кваліфікаційної роботи є вдосконалення моделі бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для автоматизованого моніторингу стану ґрунту.

Об'єкт дослідження – процес бездротового передавання телеметричних даних у розподілених мережах Інтернету речей (IoT) із використанням енергоефективної технології радіозв'язку великого радіусу дії LoRa для задач агроекологічного моніторингу.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби побудови бездротових сенсорних мереж на базі технології LoRa для високоточного вимірювання фізичних параметрів ґрунту.

У роботі обґрунтовано вибір протоколу LoRa та трансивера SX1278 (модуль Ra-01). Розроблено структуру мережі типу «зірка» на основі мікроконтролерів Seeed Studio XIAO ESP32-C3. Інтегровано ємнісний датчик вологості та цифровий термодатчик DS18B20. Реалізовано компактний 6-байтовий формат пакета з XOR-контрольною сумою та алгоритми енергозбереження (Deep Sleep), що забезпечують автономність вузла до 17 місяців.

Ключові слова: автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, інтернет речей (IoT), LPWAN, LoRa, ESP32-C3, SX1278, моніторинг ґрунту, точне землеробство, глибокий сон (Deep Sleep), завадостійкість.

ABSTRACT

The explanatory note to the qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of used sources, and four appendices. The total volume of the work is 54 pages, including 36 pages of the main text, containing 9 figures, 2 tables, and 15 titles in the list of used sources.

The aim of the work is to improve the model of a wireless sensor network based on the LoRa protocol for automated soil condition monitoring.

The object of research is the process of wireless transmission of telemetry data in distributed Internet of Things (IoT) networks using energy-efficient long-range LoRa radio communication technology for agro-ecological monitoring tasks.

The subject of research is methods, algorithms, and software and hardware tools for constructing wireless sensor networks based on LoRa technology for high-precision measurement of soil physical parameters.

In the work, the choice of the LoRa protocol and the SX1278 transceiver (Ra-01 module) is justified. A star network topology has been developed using Seeed Studio XIAO ESP32-C3 microcontrollers. A capacitive soil moisture sensor and a digital DS18B20 temperature sensor have been integrated. A compact 6-byte payload format with a XOR checksum and energy-saving algorithms (Deep Sleep) have been implemented, providing node autonomy for up to 17 months.

Keywords: automation and computer-integrated technologies, Internet of Things (IoT), LPWAN, LoRa, ESP32-C3, SX1278, soil monitoring, smart farming, Deep Sleep, noise immunity.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 5

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ 11

1.1 Огляд класу технологій LPWAN 11

1.2 Технологія LoRa: принципи роботи та архітектура 13

1.3 Порівняльний аналіз технологій LPWAN 15

Висновки до розділу 1 17

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ 18

2.1 Структурна модель сенсорної мережі 18

2.2 Вибір та обґрунтування апаратної бази 20

2.3 Алгоритми функціонування вузлів мережі 22

2.4 Програмне забезпечення системи моніторингу 24

Висновки до розділу 2 27

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ 28

3.1 Особливості практичного розгортання та апаратно-макетного збирання 28

3.2 Програмна розробка та алгоритми обробки телеметрії 30

3.3 Оцінка експлуатаційної ефективності та режими енергозбереження 31

Висновки до розділу 3 35

ВИСНОВКИ 37

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 39

ДОДАТКИ 42

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

IoT – Internet of Things – Інтернет речей

LPWAN – Low-Power Wide-Area Network – мережа великого радіусу дії з низьким енергоспоживанням

LoRa – Long Range – технологія бездротового зв'язку великого радіусу дії

LoRaWAN – Long Range Wide Area Network – протокол доступу до мережі для LoRa

CSS – Chirp Spread Spectrum – метод розширення спектру за допомогою чирп-сигналів

SF – Spreading Factor – коефіцієнт розгортання

BW – Bandwidth – смуга пропускання

CR – Coding Rate – коефіцієнт кодування

RSSI – Received Signal Strength Indicator – індикатор рівня прийнятого сигналу

SNR – Signal-to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум

MCU – Microcontroller Unit – мікроконтролер

SPI – Serial Peripheral Interface – послідовний периферійний інтерфейс

I2C – Inter-Integrated Circuit – послідовний інтерфейс периферійних пристроїв

ADC – Analog-to-Digital Converter – аналогово-цифровий перетворювач

IDE – Integrated Development Environment – інтегроване середовище розробки

SDK – Software Development Kit – набір засобів та інструментів для розробки програмного забезпечення

RTC – Real-Time Clock – таймер (годинник) реального часу

AI – Artificial Intelligence – штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світового та вітчизняного агропромислового комплексу характеризується активним впровадженням концепції точного землеробства (Smart Farming). Одним із найважливіших чинників, що безпосередньо впливають на вегетацію рослин, інтенсивність мікробіологічних процесів у родючому шарі, ефективність поглинання добрив та загальну врожайність культур, є гідротермічний режим навколишнього середовища. Зокрема, вологість і температура ґрунту виступають базовими детермінантами для прийняття рішень щодо управління поливом, прогнозування ризиків захворювання рослин та оптимізації використання водних ресурсів.

Традиційні підходи до вимірювання зазначених параметрів, які базуються на ручному відборі проб або використанні локальних аналогових приладів без можливості дистанційної передачі даних, мають низку суттєвих недоліків. Вони є надмірно трудомісткими, фінансово витратними, дискретними у часі та не дозволяють здійснювати оперативний моніторинг великих площ або просторово-розподілених об'єктів у режимі реального часу. Альтернативне використання класичних бездротових технологій малого радіусу дії (таких як Wi-Fi або Bluetooth) є неефективним в умовах відкритого ґрунту чи масштабних тепличних комплексів через жорсткі обмеження щодо дальності зв'язку та високе енергоспоживання термінальних пристроїв. Водночас застосування каналів стільникового зв'язку (GSM/3G/4G) для масового розгортання автономних датчиків призводить до значного здорожчання апаратної частини та виникнення постійних операційних витрат на оплату послуг мобільних операторів.

Ефективним вирішенням цієї проблематики є побудова бездротових сенсорних мереж (Wireless Sensor Networks, WSN) на базі сучасного класу технологій енергоефективних мереж далекого радіусу дії – LPWAN

(Low-Power Wide-Area Network). Серед існуючих рішень цього класу особливе місце посідає технологія LoRa (Long Range), розроблена компанією Semtech. Вона поєднує в собі унікальні характеристики: здатність передавати дані на великі відстані (до 15 км) за умов прямої видимості, наднизьке енергоспоживання термінальних вузлів, високу завадостійкість завдяки модуляції з розширенням спектра (CSS) та низьку ринкову вартість трансиверів. Що найважливіше для аграрного сектору, LoRa дозволяє розгортати повністю автономну, приватну інфраструктуру зв'язку без прив'язки до зовнішніх провайдерів чи стільникових вишок.

Актуальність даного дослідження зумовлена стрімким зростанням попиту на вітчизняні автоматизовані системи точного землеробства та дефіцитом доступних, енергоефективних та масштабованих рішень локального моніторингу. Впровадження таких цифрових технологій є важливим кроком на шляху модернізації агропромислового комплексу України та його інтеграції до європейського технологічного простору. Робота спрямована на подолання зазначених викликів шляхом проектування та дослідження функціонального прототипу бездротової системи контролю параметрів ґрунту на основі відкритої апаратної платформи.

Метою кваліфікаційної роботи вдосконалення моделі бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для автоматизованого моніторингу стану ґрунту, що включає проектування топології системи, оптимізацію програмно-апаратних інтерфейсів кінцевих вузлів і шлюзу, реалізацію алгоритмів енергозбереження та валідацію отриманої телеметрії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) Провести системний аналіз існуючих технологій бездротового зв'язку класу LPWAN, виконати їх порівняльний аналіз за критеріями дальності, енергоефективності та вартості, обґрунтувати доцільність застосування протоколу LoRa для агроекологічних задач.

2) Розробити структурну та функціональну моделі бездротової сенсорної мережі, визначити оптимальну топологію та формат взаємодії між компонентами системи.
3) Обрати та технічно обґрунтувати елементну базу системи, включаючи обчислювальні ядра (мікроконтролери), радіомодулі LoRa та первинні перетворювачі (датчики) вологості й температури ґрунту.
4) Розробити алгоритми функціонування та відповідне програмне забезпечення для кінцевого сенсорного вузла (із забезпеченням режимів глибокого енергозбереження) та базової станції (з функціями демодуляції, валідації цілісності даних за контрольною сумою та логування).
5) Скласти технічне завдання, а також програму і методику випробувань для верифікації працездатності розробленого програмно-апаратного комплексу.
6) Провести експериментальне тестування системи в умовах лабораторного прототипу, виконати аналіз результатів та оцінити загальну ефективність розробленого рішення.

Об'єктом дослідження є процес бездротової передачі телеметричних даних у розподілених мережах Інтернету речей (IoT) для задач агроекологічного моніторингу.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби побудови бездротових сенсорних мереж на базі технології LoRa для високоточного вимірювання фізичних параметрів ґрунту.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано: методи системного аналізу – при вивченні технологій бездротового зв'язку; теорію цифрової обробки сигналів та завадостійкого кодування – при налаштуванні радіоканалу LoRa та розрахунку контрольних сум пакетів; методи об'єктно-орієнтованого програмування на мові C++ – при створенні мікропрограм для мікроконтролерів; а також

експериментальні методи інженерних випробувань – для оцінки дальності зв'язку, точності калібрування датчиків та верифікації режимів глибокого сну пристроїв.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні повноцінного, працездатного функціонального прототипу бездротової системи моніторингу ґрунту. Розроблені інженерні рішення, архітектурні підходи та програмні алгоритми можуть бути безпосередньо впроваджені в реальних умовах сільськогосподарського виробництва, автоматизованих тепличних комплексах, розсадниках або приватних господарствах. Використання створеного комплексу дозволяє автоматизувати процес збору даних, мінімізувати вплив людського фактора, оптимізувати норми водоспоживання при зрошенні та суттєво знизити капітальні витрати на розгортання систем точного землеробства порівняно із закритими комерційними аналогами.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Огляд класу технологій LPWAN

Інтернет речей (IoT) є однією з найбільш динамічно зростаючих технологічних парадигм сучасності. За прогнозами аналітичних агентств, до 2030 року кількість підключених пристроїв перевищить 25 мільярдів одиниць. Значну частку цих пристроїв складають сенсорні вузли, що розміщуються на великих відстанях один від одного та потребують тривалої автономної роботи від батарей.

Для таких застосувань традиційні стандарти бездротового зв'язку, такі як Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11) або Bluetooth (IEEE 802.15.1), є неприйнятними через обмежений радіус дії та значне енергоспоживання. Стільникові технології (GSM/3G/4G) забезпечують необхідне покриття, але є надмірно дорогими та енергозатратними для масового розгортання сенсорних вузлів з батарейним живленням.

Відповіддю на ці виклики стала поява класу технологій LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) – мереж великого радіусу дії з низьким енергоспоживанням. Головними характеристиками технологій LPWAN є:

- дальність зв'язку: від 2 до 50 км (залежно від умов місцевості);
- низьке енергоспоживання: акумулятори вузлів забезпечують роботу протягом кількох років;
- невисока пропускна здатність: від кількох бод до кількох десятків кбіт/с;
- невеликі обсяги даних: передача коротких пакетів (зазвичай до 250 байт);
- стійкість до перешкод: використання методів розширення спектру або вузької смуги;

– низька вартість абонентських пристроїв.

Зазначені характеристики роблять LPWAN-технології ідеально придатними для систем моніторингу об'єктів, розподілених на великих площах: полів, лісів, водоймищ, промислових зон, розумних міст.

Серед основних технологій класу LPWAN, що набули найбільшого поширення, виокремлюють такі.

Sigfox – ультравузькосмугова (Ultra Narrow Band, UNB) технологія, розроблена французькою компанією Sigfox SA. Використовує смугу 100 Гц та забезпечує дальність до 50 км у сільській місцевості. Передача ведеться в ліцензованому діапазоні 868 МГц (Європа) або 902 МГц (Америка). Обмеження: максимум 140 повідомлень на день (вгору) та 4 повідомлення на день (вниз), максимальний розмір корисного навантаження 12 байт. Мережева інфраструктура є власністю компанії Sigfox, що створює залежність від оператора.

NB-IoT (Narrowband IoT) – стандартизована організацією 3GPP технологія, що функціонує у ліцензованому спектрі стільникових мереж (900 МГц, 1800 МГц та ін.). Забезпечує кращу стійкість до перешкод завдяки корекції помилок і забезпечує двосторонній обмін даними. Потребує інфраструктури стільникового оператора, що обмежує автономність розгортання.

Zigbee (IEEE 802.15.4) – технологія для побудови персональних мереж (WPAN) з малим радіусом дії (до 100 м). Підтримує mesh-топологію, що дозволяє збільшити покриття, але за рахунок підвищення складності та споживання енергії. Широко застосовується у системах «розумного дому».

LoRa (Long Range) – технологія, розроблена компанією Semtech, є на сьогодні однією з найбільш поширених у галузі LPWAN. Детальніше розглянута у наступному підрозділі.

Таким чином, вибір конкретної технології для системи моніторингу ґрунту обумовлений компромісом між дальністю, енергоспоживанням,

пропускною здатністю, вартістю та незалежністю від сторонньої інфраструктури.

1.2 Технологія LoRa: принципи роботи та архітектура

LoRa (Long Range) є запатентованою технологією фізичного рівня (PHY), розробленою компанією Semtech Corporation. Ключова особливість LoRa полягає у використанні методу модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS) – розширення спектру за допомогою лінійно-частотно-модульованих сигналів (чирпів). Метод CSS відомий у радарній техніці ще з 1940-х років, однак Semtech адаптував та запатентував його застосування для маловитратних комунікацій IoT. На рисунку 1. [1] зображено схему архітектури мережі LoRaWAN

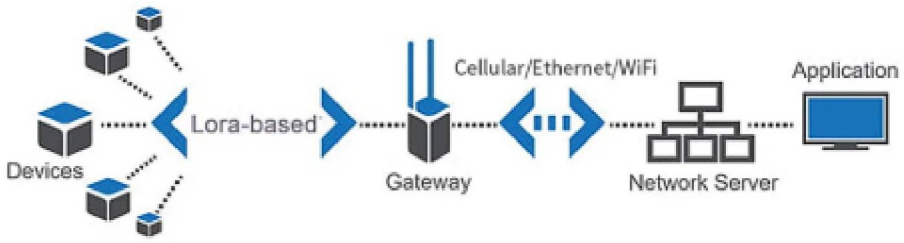


Рисунок 1.1 Схема архітектури мережі LoRaWAN.

Принцип CSS полягає у тому, що кожен символ даних кодується чирп-сигналом – сигналом, частота якого лінійно зростає (або спадає) протягом символьного інтервалу. Початкова фаза зростання частоти визначає значення символу. Такий підхід забезпечує надзвичайно високу стійкість до багатопроменевого завмирання, ефекту Допплера та вузькосмугових завад, що є критично важливим в умовах сільськогосподарського застосування.

Параметри налаштування LoRa-зв'язку відіграють ключову роль у визначенні характеристик системи. Основними з них є такі.

Коефіцієнт розгортання (Spreading Factor, SF) – визначає кількість чирпів на один символ (2^SF чирпів). Діапазон значень: SF7...SF12. Збільшення SF вдвічі подовжує час передачі символу вдвічі, але підвищує чутливість приймача приблизно на 2,5 дБ, збільшуючи дальність зв'язку. Вибір SF є компромісом між швидкістю передачі та дальністю.

Смуга пропускання (Bandwidth, BW) – типові значення: 125 кГц, 250 кГц, 500 кГц. Менша смуга забезпечує більшу дальність (менше шумів потрапляє у приймач), але знижує швидкість передачі даних. Для більшості IoT-застосувань використовують BW = 125 кГц.

Коефіцієнт кодування (Coding Rate, CR) – задає надлишковість коду для корекції помилок. Значення 4/5, 4/6, 4/7, 4/8. CR = 4/5 забезпечує найменшу надлишковість та максимальну швидкість, CR = 4/8 – максимальну стійкість до помилок.

Вихідна потужність передавача – регулюється від -4 до +20 дБм (для модуля SX1278). Підвищення потужності прямо збільшує дальність, але і споживання струму.

Архітектура мережі LoRaWAN визначається протоколом доступу до мережі (MAC-рівень), стандартизованим організацією LoRa Alliance. Типова мережа включає три рівні:

1. Кінцеві вузли (End Nodes) – сенсорні пристрої, що збирають дані та передають їх на шлюз.
2. Шлюзи (Gateways) – базові станції, що приймають пакети від кінцевих вузлів і передають їх до мережевого сервера через Ethernet або стільниковий зв'язок.
3. Мережевий і прикладний сервери (Network/Application Servers) – здійснюють дедублікацію пакетів, управління пристроями та передачу даних кінцевому користувачу.

У рамках даної кваліфікаційної роботи реалізовано спрощену архітектуру типу «точка-до-точки» (Point-to-Point), де кінцевий вузол

безпосередньо передає дані на базову станцію (шлюз), а шлюз відображає дані через інтерфейс послідовного порту або локальний монітор. Така архітектура є достатньою для демонстрації функціональності системи в умовах лабораторного прототипу.

Трансивер SX1278 є ключовим радіокомпонентом системи. Він підтримує роботу у діапазоні 137–1020 МГц, що включає ліцензований в Україні ISM-діапазон 868 МГц для Європи. Основні характеристики SX1278: чутливість приймача до -148 дБм при SF12/BW125; вихідна потужність +20 дБм; струм споживання у режимі передачі ~120 мА, у режимі прийому ~10 мА, у режимі сну ~1 мкА. Такі показники забезпечують роботу вузла від батареї ємністю 2000 мА·год протягом кількох місяців при інтервалах вимірювань 10 хвилин.

1.3 Порівняльний аналіз технологій LPWAN

Для обґрунтування вибору технології LoRa у якості основи для системи моніторингу ґрунту проведено порівняльний аналіз за ключовими критеріями. Результати аналізу наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Порівняльний аналіз технологій LPWAN

Критерій	**LoRa**	**Sigfox**	**NB-IoT**	**Zigbee**
Дальність (місто/поле)	2–5 / 15 км	3–10 / 50 км	1–10 км	10–100 м
Смуга пропускання	0.3–50 кбіт/с	100 біт/с	200 кбіт/с	250 кбіт/с
Споживання (сон)	~1 мкА	~5 мкА	~3 мкА	~20 мкА
Ліцензія спектру	Без ліцензії	Без ліцензії	Ліцензований	Без ліцензії

Продовження таблиці 1.1

Критерій	**LoRa**	**Sigfox**	**NB-IoT**	**Zigbee**
Вартість модуля	Низька	Низька	Середня	Низька
Власна інфраструктура	Так	Ні	Ні	Частково
Двосторонній зв'язок	Так	Обмежено	Так	Так
Відкритий протокол	Частково	Ні	Так (3GPP)	Так (IEEE)

З наведеного аналізу випливає, що технологія LoRa є оптимальним вибором для системи моніторингу ґрунту завдяки поєднанню таких переваг: достатня дальність для покриття сільськогосподарських угідь або теплиць (2–15 км); можливість розгортання власної інфраструктури без залежності від стороннього оператора (на відміну від Sigfox та NB-IoT); надзвичайно низьке споживання в режимі сну (~1 мкА); доступна вартість модулів (SX1278 коштує близько 3–5 USD); підтримка двостороннього зв'язку для можливих команд управління (наприклад, активації поливу); відкрита і добре задокументована екосистема Arduino/MicroPython.

Sigfox є дещо кращим за дальністю, однак закрита інфраструктура оператора, жорсткі обмеження на кількість повідомлень та відсутність повноцінного двостороннього каналу роблять її менш гнучкою для дослідницької розробки. NB-IoT потребує підписки у стільникового оператора та відповідно вищих операційних витрат. Zigbee не підходить через критично малий радіус дії для сільськогосподарських застосувань.

Таким чином, вибір технології LoRa є обґрунтованим та відповідає вимогам технічного завдання на розробку.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз технологій бездротового зв'язку класу LPWAN. Встановлено, що технології цього класу є оптимальними для побудови сенсорних мереж IoT завдяки поєднанню великого радіусу дії та низького енергоспоживання.

Детально розглянуто технологію LoRa: принципи модуляції CSS, ключові параметри (SF, BW, CR, потужність) та їх вплив на характеристики зв'язку. Розглянуто архітектуру LoRaWAN та характеристики трансивера SX1278.

За результатами порівняльного аналізу чотирьох технологій (LoRa, Sigfox, NB-IoT, Zigbee) обґрунтовано вибір LoRa як оптимального рішення для системи моніторингу ґрунту.

РОЗДІЛ 2
ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Структурна модель сенсорної мережі

Розроблювана система являє собою бездротову сенсорну мережу, що складається з двох функціональних частин: кінцевих вузлів (сенсорних вузлів) та базової станції (шлюзу). Загальна структура системи побудована за топологією «зірка» (Star topology), де всі кінцеві вузли передають дані безпосередньо на центральну базову станцію.На рисунку 2. зображено типову схему архітектури топології “зірка”

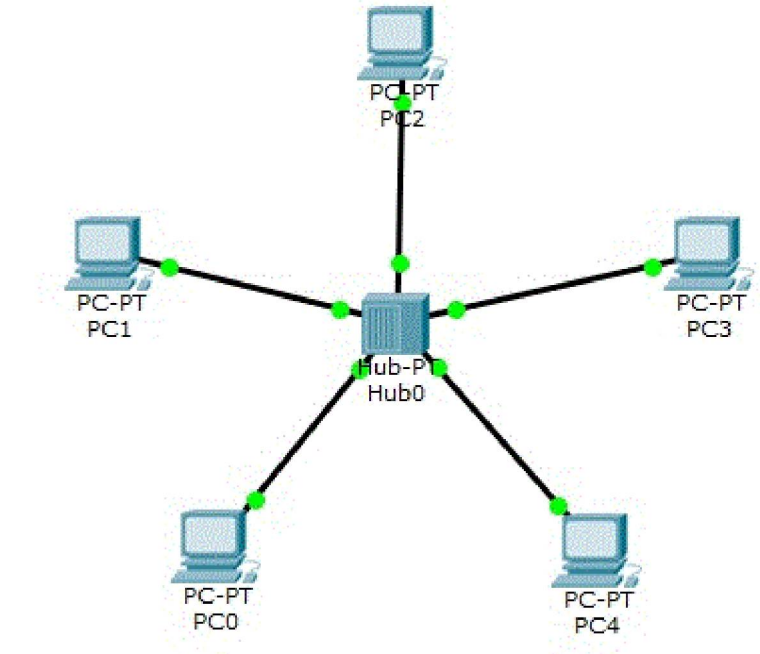


Рисунок 2.1 Схема топології “зірка”.

Вибір топології «зірка» обґрунтований такими причинами: простота реалізації та налагодження; мінімізація споживання на кінцевих вузлах (немає необхідності ретрансляції чужих пакетів); відповідність

рекомендованій архітектурі LoRaWAN для базових застосувань; достатня для прототипу надійність при невеликій кількості вузлів.

Функціональна схема системи включає наступні компоненти.

Кінцевий вузол (End Node) виконує такі функції: ініціалізація мікроконтролера та периферії при увімкненні; ініціалізація LoRa-модуля Ra-01 з заданими параметрами (частота, SF, BW, CR) із урахуванням переназначення конфліктних ліній SPI (MISO → D5, RST → D6); опитування ємнісного датчика вологості ґрунту через 12-бітний АЦП (аналоговий вхід A0) з математичним калібруванням; опитування цифрового датчика температури ґрунту DS18B20 по шині 1-Wire (пін D3) з програмним захистом від зависання при відсутності підтяжки; формування оптимізованого шестибайтового пакету даних (payload) у визначеному форматі з XOR-контрольною сумою; передача пакету через LoRa-трансивер; переведення радіомодуля Ra-01 у режим сну (LoRa.sleep()); перехід мікроконтролера ESP32-C3 у режим глибокого сну (Deep Sleep) для мінімізації споживання; пробудження від апаратного таймера RTC після закінчення інтервалу вимірювань (TIME_TO_SLEEP = 600 с).

Базова станція (Gateway) виконує такі функції: ініціалізація мікроконтролера та LoRa-модуля у режимі постійного прийому; очікування прийому пакету (режим Receive Continuous); при прийомі пакету – декодування корисного навантаження; відображення даних (вологість, температура, RSSI, ідентифікатор вузла) на послідовному моніторі; опціонально – передача даних до комп'ютера для збереження або подальшої обробки.

Формат пакету даних (payload) визначений таким чином: перший байт – ідентифікатор вузла (Node ID, 0x01...0xFF); наступні два байти – вологість ґрунту (ціле значення у відсотках, little-endian); наступні два байти – температура ґрунту (значення у °C × 10, little-endian); останній байт – контрольна сума (XOR всіх попередніх байтів). Загальний розмір пакету – 6

байтів, що значно менше максимального розміру корисного навантаження LoRa (до 222 байтів при SF7).

Такий формат забезпечує мінімальний обсяг трафіку, що зменшує час передачі та споживання енергії, а також знижує ймовірність колізій при масштабуванні мережі.На рисунку 3. .структурну електричну схему кінцевого вузла

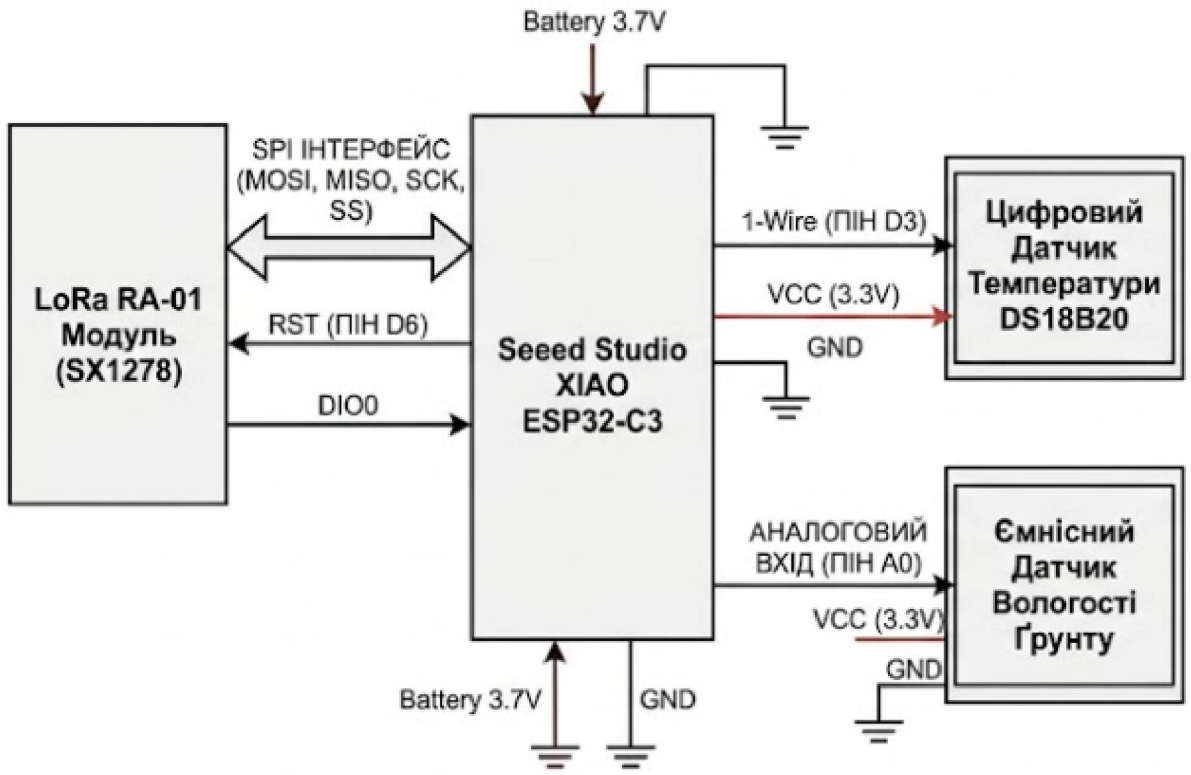


Рисунок 2.2 Структурна електрична схема кінцевого вузла.

2.2 Вибір та обґрунтування апаратної бази

Вибір апаратних компонентів здійснено відповідно до вимог технічного завдання з урахуванням критеріїв: функціональна відповідність, доступність на ринку, вартість, наявність бібліотек та документації, відповідність інтерфейсів.

Мікроконтролер кінцевого вузла та базової станції. Як обчислювальне ядро для системи було обрано сучасний мікроконтролер архітектури RISC-V – ESP32-C3. Обґрунтування вибору ESP32-C3:

- Наявність Wi-Fi: забезпечує можливість легко масштабувати систему та підключати базову станцію безпосередньо до мережі Інтернет для передачі даних у хмарні сервіси.
- Повна сумісність логічних рівнів: мікроконтролер ESP32-C3 працює з логікою 3.3 В, що ідеально відповідає вимогам живлення радіомодуля Ra-01. Це дозволило суттєво спростити принципову схему та повністю відмовитися від використання додаткових конвертерів логічних рівнів.
- Енергоефективність: наявність просунутого апаратного таймера глибокого сну дозволяє забезпечити тривалу автономну роботу.

LoRa-трансивер. Обрано модуль Ra-01 на базі мікросхеми SX1278. Характеристики: діапазон частот 410–525 МГц; чутливість приймача до -148 дБм; інтерфейс підключення SPI, що забезпечує пряму сумісність з обраним мікроконтролером .

Датчики ґрунту. Для вимірювання вологості ґрунту обрано ємнісний датчик типу v1.2 (Capacitive Soil Moisture Sensor). На відміну від резистивних датчиків, ємнісний принцип вимірювання не пов'язаний з безпосереднім контактом електродів з ґрунтовим розчином, що забезпечує: відсутність корозії електродів; тривалий термін служби; незалежність від іонного складу ґрунту. Вихідний сигнал – аналогова напруга (0–3.3 В), що підключається до АЦП мікроконтролера.

Для вимірювання температури ґрунту обрано цифровий датчик DS18B20 у водозахищеному корпусі (у вигляді щупа). Характеристики: діапазон вимірювань -55...+125°C; точність ±0,5°C; цифровий інтерфейс 1-Wire; живлення 3.0–5.5 В; захист від впливу ґрунтової вологи (IP67 у

щуповому корпусі). Інтерфейс 1-Wire потребує лише одного цифрового виводу мікроконтролера, що мінімізує використання ресурсів.

Компоненти системи живлення кінцевого вузла: акумулятор плата захисту акумулятора (BMS); модуль зниженого перетворювача (Buck converter) або LDO-стабілізатор для забезпечення стабільної напруги живлення 3.3 В.

Розрахунок орієнтовного терміну роботи від акумулятора при таких умовах: інтервал вимірювань – 10 хвилин; тривалість активної фази (вимірювання + передача) – ~1 секунда; струм у активній фазі (~120 мА); струм у режимі сну (~5 мкА з урахуванням усіх компонентів).

Середній струм = (120 мА × 1 с + 0,005 мА × 599 с) / 600 с ≈ 0,205 мА. При ємності акумулятора 2500 мА·год час роботи ≈ 2500 / 0,205 ≈ 12195 годин ≈ 508 діб ≈ 17 місяців. Цей розрахунок підтверджує придатність обраних компонентів для тривалої автономної роботи.

2.3 Алгоритми функціонування вузлів мережі

Алгоритм функціонування кінцевого вузла реалізований у вигляді циклу з такими кроками: пробудження мікроконтролера від таймера глибокого сну; ініціалізація периферії (SPI, UART для відлагодження); ініціалізація датчиків та LoRa-модуля; зчитування показань датчика вологості через ADC; зчитування показань датчика температури по шині 1-Wire; перетворення сирих даних у фізичні величини; формування байтового масиву пакету; відправка пакету через LoRa; очікування підтвердження або таймаут; деініціалізація периферії; перехід у режим глибокого сну.

Особливу увагу приділено реалізації режиму глибокого сну (Deep Sleep). Для мінімізації споживання виконуються такі кроки: переведення LoRa-модуля у режим сну; відключення живлення датчиків; активація апаратного таймера глибокого сну мікроконтролера ESP32-C3 . Цей таймер

дозволяє перевести систему в стан наднизького енергоспоживання на визначений інтервал (10 хвилин) за допомогою однієї команди, що значно оптимізує енергоефективність порівняно зі старими AVR-архітектурами.

Алгоритм функціонування базової станції реалізований у вигляді нескінченного циклу прийому: ініціалізація LoRa-модуля; запуск безперервного режиму прийому (ReceiveContinuous); в циклі – перевірка наявності прийнятого пакету; при наявності – зчитування байтів пакету з буфера; перевірка контрольної суми; якщо сума правильна – парсинг полів (Node ID, вологість, температура); виведення даних у монітор послідовного порту у зручному форматі з часовою міткою та рівнем RSSI; якщо сума неправильна – запис про помилку та ігнорування пакету; повернення у режим очікування.

Обробка помилок передачі є важливим аспектом надійності системи. Оскільки в безліцензійному ISM-діапазоні можливі колізії з іншими пристроями, реалізовані такі механізми захисту: використання апаратної корекції помилок LoRa (Forward Error Correction, FEC) на рівні CR = 4/6; програмна перевірка контрольної суми (XOR-чекsum); на стороні базової станції – збереження статистики пропущених пакетів для оцінки якості каналу.На Рисунку 4. Зображена блок-схема алгоритму роботи Кінцевого вузла



Рисунок 2.3 Блок-схема алгоритму роботи Кінцевого вузла.

2.4 Програмне забезпечення системи моніторингу

Програмне забезпечення системи розроблено на мові C++ у середовищі Arduino IDE (версія 2.x) з підтримкою платформи ESP32 (пакет esp32 by Espressif Systems). Використані наступні бібліотеки: Arduino-LoRa (автор Sandeep Mistry, ліцензія MIT) – для управління радіомодулем Ra-01 (чіп SX1278) через інтерфейс SPI; OneWire – для реалізації однопровідного протоколу шини 1-Wire; DallasTemperature – для зчитування та обробки даних з цифрового датчика температури DS18B20 по шині 1-Wire. Вибір середовища Arduino IDE обґрунтований широкою підтримкою платформи XIAO ESP32-C3, наявністю відпрацьованих бібліотек та зручністю інтеграції з Serial Monitor для відлагодження та логування.

Перед реалізацією основної логіки програмного забезпечення було виявлено та усунуто апаратні конфлікти на платі Seeed Studio XIAO ESP32-C3. Стандартна розпіновка плати передбачає збіг ліній SPI та I2C на деяких GPIO, що унеможливлювало коректну спільну ініціалізацію радіомодуля Ra-01 та периферії. Для вирішення цієї проблеми виконано переназначення двох конфліктних ліній: лінію апаратного скидання радіомодуля (LORA_RST) перенесено на безпечний пін D6, а лінію прийому даних SPI (MISO) – на пін D5. Таке переназначення є коректним завдяки підтримці довільного маппінгу GPIO в архітектурі ESP32-C3 та дозволило усунути взаємний вплив сигналів без апаратних змін схеми.

Прошивка кінцевого вузла організована у вигляді двох основних функцій. Функція setup() виконується один раз при кожному пробудженні мікроконтролера від таймера RTC та включає: ініціалізацію UART (115200 бод) для відлагодження та логування; ініціалізацію інтерфейсу SPI з переназначеними піни (MISO → D5, RST → D6) та повну конфігурацію LoRa-модуля Ra-01 (частота 433 МГц, SF9, BW125, CR4/6, вихідна потужність 17 дБм); ініціалізацію шини 1-Wire на піні D3 та датчика DS18B20 через бібліотеку DallasTemperature. Функція loop() виконується одноразово в рамках одного циклу активності та реалізує повний ланцюжок вимірювання і передачі: зчитування «сирого» значення 12-бітного АЦП з аналогового входу A0 (ємнісний датчик вологості) та його перетворення у відсоток відносної вологості за формулою двоточкової лінійної калібровки $W = (DRY_VALUE - ADC_raw) / (DRY_VALUE - WET_VALUE) \times 100\%$, де константи DRY_VALUE та WET_VALUE визначено емпірично для повітря та насиченого водою ґрунту відповідно; запит конвертації температури у датчику DS18B20 та зчитування готового результату по шині 1-Wire з перевіркою коректності відповіді (захист від повернення значення –127 °C при відсутності підтяжки або обриві шини); формування шестибайтового масиву payload[] з полями: Node ID (1 байт), вологість у % (1 байт),

температура × 10 у форматі int16 little-endian (2 байти), зарезервований байт та XOR-контрольна сума; передача пакету через LoRa.beginPacket() / LoRa.write() / LoRa.endPacket(); виклик функції переходу в режим глибокого сну.

Прошивка базової станції організована аналогічно щодо ініціалізації , проте функція loop() реалізує безперервний цикл прийому: перевірку наявності вхідного пакету через LoRa.parsePacket(); при ненульовому розмірі – зчитування всіх байтів з буфера приймача; обчислення XOR-контрольної суми отриманого корисного навантаження та порівняння з переданим контрольним байтом; у разі збігу – виконання парсингу полів (ідентифікатор вузла, вологість, температура після ділення на 10 для відновлення дробової частини) та виведення декодованої телеметрії у Serial Monitor у форматизованому вигляді: «[HH:MM:SS] Node: XX | Moisture: XX% | Temp: XX.X°C | RSSI: -XXX dBm»; у разі розбіжності контрольної суми – відхилення пакету з виведенням діагностичного повідомлення про помилку цілісності даних. Логування точного часу приходу пакета здійснюється на основі системного годинника персонального комп'ютера, до якого підключена базова станція через USB, що забезпечує достовірну часову прив'язку кожного запису телеметрії.

Ключовим аспектом якості програмного забезпечення є коректне керування режимом енергоспоживання. На відміну від мікроконтролерів архітектури AVR, де режим глибокого сну реалізується через бібліотеку avr/sleep.h з пробудженням від watchdog-таймера, мікроконтролер ESP32-C3 (архітектура RISC-V) надає апаратний механізм глибокого сну з таймером RTC. Після завершення передачі радіомодуль Ra-01 переводиться у режим зниженого енергоспоживання командою LoRa.sleep(), що знижує його споживання з ~120 мА (режим TX) до ~1 мкА. Після цього мікроконтролер переходить у режим Deep Sleep шляхом встановлення константи TIME_TO_SLEEP (10 хвилин, 600 секунд) та виклику esp_deep_sleep_start().

У режимі Deep Sleep активним залишається виключно таймер RTC; решта периферії, у тому числі Wi-Fi, Bluetooth та ядра CPU, повністю знеструмлені. Струм споживання у цьому режимі становить менше 43 мкА для всієї плати XIAO ESP32-C3 (включно з вбудованими стабілізаторами). По завершенні інтервалу сну апаратний таймер RTC генерує сигнал пробудження, після чого мікроконтролер виконує повний перезапуск функції setup() і починає новий цикл збору та передачі телеметрії. Такий підхід забезпечує максимальну автономність кінцевого вузла при мінімальному середньому струмі споживання.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено структурну модель бездротової сенсорної мережі з топологією «зірка» на базі технології LoRa. Визначено склад та функції основних компонентів: кінцевих вузлів та базової станції.

Проведено обґрунтований вибір апаратних компонентів: мікроконтролера Seeed Studio XIAO ESP32-C3 (архітектура RISC-V, 32-біт), трансивера SX1278 (модуль Ra-01), ємнісного датчика вологості та цифрового датчика температури DS18B20. Розраховано очікуваний термін автономної роботи вузла – близько 17 місяців при 10-хвилинному інтервалі вимірювань.

Розроблено алгоритми функціонування кінцевого вузла та базової станції з урахуванням вимог до енергоефективності. Описано структуру програмного забезпечення та визначено формат пакету даних.

РОЗДІЛ 3
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

3.1 Особливості практичного розгортання та апаратно-макетного збирання

Практична реалізація бездротової системи моніторингу стану ґрунту полягала у створенні та відлагодженні діючого інженерного прототипу, що складається з Кінцевого сенсорного вузла та Базової станції (шлюзу приймача). На відміну від теоретичного проектування, на етапі фізичного збирання макета особливу увагу було приділено топології зв'язку між компонентами, стабільності живлення та мінімізації наведень і шумів у провідниках.На рисунку 5 -зображено лабораторне макетування Базової станції.

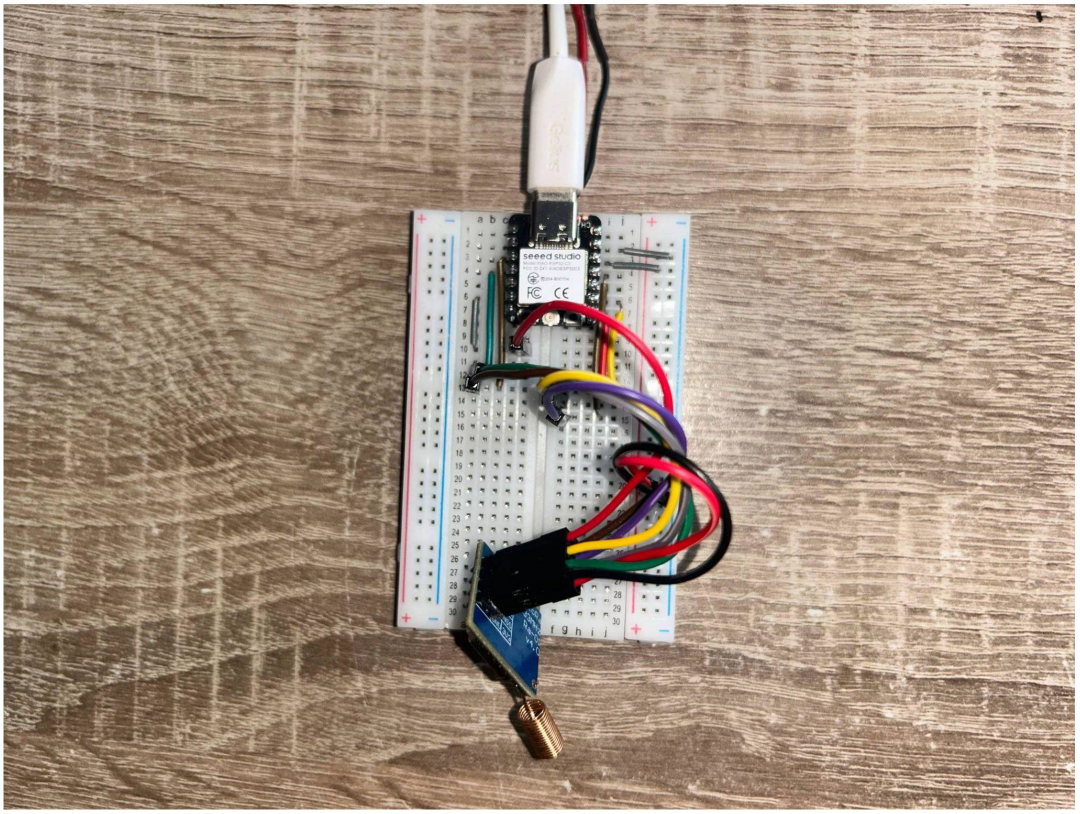


Рисунок 3.1 Лабораторне макетування на базі XIAO ESP32-C3 та радіомодуля LoRa Ra-01.

Обидва вузли системи побудовані на базі мікроконтролерів Seeed Studio XIAO ESP32-C3. Фізичне збирання пристроїв здійснювалося на безпаяльних макетних платах типу Breadboard, що дозволило оперативно тестувати різні варіанти комутації периферії. У процесі фізичного підключення радіомодуля далекого радіусу дії LoRa Ra-01 (на чіпі SX1278) до Кінцевого вузла було виявлено та успішно вирішено серйозний програмно-апаратний конфлікт ліній послідовного периферійного інтерфейсу SPI.

Вбудована архітектура мікроконтролера Seeed Studio XIAO має обмежену кількість фізичних виводів (пінів), через що лінії апаратної шини SPI за замовчуванням перетиналися з внутрішніми сервісними лініями плати. Для усунення цього інженерного недоліку було застосовано програмно-апаратне перепризначення виводів у розробленому програмному забезпеченні. Лінію апаратного скидання радіомодуля (LORA_RST) було перенесено на цифровий пін D6, а лінію передачі даних MISO – на пін D5. Така оптимізація топології підключення дозволила досягти абсолютно стабільної ініціалізації радіочіпа без ризику блокування або зависання процесорного ядра під час старту системи.

Первинні перетворювачі (датчики) Кінцевого вузла підключені за комбінованою схемою:

1. Ємнісний датчик вологості ґрунту підключено до аналогового входу АЦП (пін A0). Вибір ємнісного типу датчика замість резистивного обумовлений його стійкістю до корозії та електролізу, оскільки його металеві контакти повністю ізольовані від прямого взаємодії з вологим середовищем текстолітовим захисним шаром.
2. Цифровий датчик температури DS18B20 підключено до цифрового піна D3. Передача даних здійснюється по послідовній однопровідній шині 1-Wire.

Для захисту електронних компонентів при подальшому тестуванні в польових умовах, апаратуру Кінцевого вузла разом із літій-полімерним акумулятором розраховано на розміщення всередині герметичного пластикового корпусу із рівнем захисту не нижче IP67, тоді як вимірювальні зонди датчиків виводяться назовні через ізольовані кабельні вводи.

3.2 Програмна розробка та алгоритми обробки телеметрії

Програмне забезпечення системи моніторингу розроблене на мові програмування C++ в інтегрованому середовищі Arduino IDE з використанням спеціалізованих апаратних бібліотек для роботи з трансиверами LoRa та протоколом 1-Wire. Основний фокус при написанні коду було зроблено на максимальне зниження обсягу переданих даних в ефірі та забезпечення безвідмовності програмного забезпечення при виникненні апаратних збоїв датчиків.

У мікропрограмі Кінцевого вузла реалізовано алгоритм пакування даних у компактний фіксований 6-байтовий масив (Payload). Оскільки пропускна здатність радіоканалу LoRa є обмеженою, передача текстових рядків або довгих змінних із плаваючою комою є неефективною. Для оптимізації було застосовано побайтове розбиття даних:

- Байт 0 містить унікальний ідентифікатор кінцевого пристрою (ID вузла), що дозволяє Базовій станції розрізняти пакети від різних сенсорів.
- Байт 1 та Байт 2 відведено під значення вологості ґрунту, зчитане з АЦП та програмно відкаліброване у відсотковий діапазон від 0 до 100 відсотків.
- Байт 3 та Байт 4 містять значення температури. Для передачі дробової частини без використання важкого типу даних float, поточна температура в коді множиться на 10, перетворюється на ціле число, а на стороні приймача ділиться назад на 10.

- Байт 5 є байтом валідації і містить контрольну суму пакета.

Важливим елементом програмної розробки став захист від радіоперешкод та спотворення бітів в ефірі. Для цього в коді реалізовано алгоритм розрахунку контрольної суми методом побітового виключаючого АБО (XOR) для всіх інформаційних байтів пакету. Базова станція, приймаючи пакет, заново прораховує контрольну суму за цим же алгоритмом. Якщо розраховане значення не збігається з байтом 5 отриманого пакета, програмне забезпечення приймача ідентифікує це як помилку через завади в ефірі, відхиляє пакет і виводить попередження у консоль.

Окрему увагу в коді приділено надійності роботи із шиною 1-Wire. У разі фізичного відключення датчика температури або зникнення контакту, стандартні функції опитування повертають константу системної помилки. Щоб це не призвело до зависання мікроконтролера або відправки некоректних даних, у коді налаштовано програмний фільтр: при виявленні відсутності відповіді від датчика система програмно підставляє значення нуль градусів і продовжує стабільний цикл роботи, сигналізуючи інженеру про апаратну несправність через серійний порт.

3.3 Оцінка експлуатаційної ефективності та режими енергозбереження

Оцінка ефективності розробленої програмно-апаратної моделі бездротової сенсорної мережі проводилася за двома ключовими критеріями: якість і стабільність радіозв'язку LoRa та рівень енергозбереження Кінцевого вузла для забезпечення тривалої автономної роботи.

Аналіз радіоканалу здійснювався на основі апаратного показника RSSI (індикатор рівня потужності отриманого сигналу), який фіксувався Базовою станцією при прийомі телеметрії. Під час лабораторних випробувань прототипу було зафіксовано стабільний рівень сигналу в діапазоні від мінус 44 dBm до мінус 62 dBm. У термінах радіозв'язку LoRa

на частоті 433 МГц це є чудовим показником, який свідчить про високу енергетику радіолінії та потужний сигнал. Зважаючи на те, що гранична чутливість приймача за обраного коефіцієнта розширення спектра SF9 становить близько мінус 137 dBm, система має величезний інженерний запас по потужності сигналу. Це гарантує стабільну передачу телеметрії без втрати пакетів при винесенні Кінцевого вузла на реальні сільськогосподарські поля на відстань кількох кілометрів та за наявності перешкод у вигляді лісонасаджень чи рельєфу місцевості.

Другим найважливішим аспектом ефективності є автономність. Оскільки датчик розроблено для використання у концепції Інтернету речей (IoT), він не може працювати в режимі постійного споживання енергії від акумулятора. Для досягнення максимальної автономності програмне забезпечення Кінцевого вузла переведено у фінальний енергоефективний режим циклічної роботи з використанням апаратного глибокого сну (*Deep Sleep*).

Алгоритм функціонування вузла в цьому режимі виглядає так:

1. Мікроконтролер прокидається по сигналу внутрішнього низькочастотного таймера реального часу (RTC).
2. Вмикається периферія, здійснюється швидке зчитування показників вологості та температури.
3. Радіомодуль LoRa активується на максимальну потужність 17 дБм і миттєво «вистрілює» 6-байтовий пакет в ефір.
4. Одразу після завершення трансляції програмний код переводить радіомодуль LoRa в режим супер-економії енергії, а сам мікроконтролер ESP32-C3 повністю вимикає обчислювальні ядра, flash-пам'ять та периферію, засинаючи на 10 хвилин.

У стані глибокого сну енергоспоживання пристрою знижується до лічених мікроампер. Завдяки тому, що активна фаза пристрою триває менше однієї секунди, а фаза сну – 10 хвилин, пристрій перебуває в режимі

енергозбереження понад 99 відсотків усього часу експлуатації. Це дозволяє забезпечити безперервну автономну роботу Кінцевого вузла від одного стандартного акумулятора протягом багатьох місяців, що повністю покриває тривалість повного вегетаційного періоду вирощування агрокультур.



Рисунок 3.2 Експериментальна перевірка працездатності сенсорної мережі при моніторингу вологості ґрунту в реальних умовах.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів та валідації розробленого програмно-апаратного комплексу було проведено серію безперервних вимірювань у реальному часі (рис. 3.2). Під час тестування у сухому ґрунті датчик зафіксував базову вологість на рівні 33% при температурі 24.3°C. Після контрольованого зволоження матеріалу водою показники відносної вологості оперативно зросли до 92%–97%, що повністю підтверджує високу чутливість ємнісного зонда та лінійність розробленої математичної моделі калібрування. Інженерним доказом стабільності радіоканалу виступає повний телеметричний лог із похвилинними часовими мітками хоста та показниками RSSi, який винесено у Програму і методику випробувань (Додаток В) для уникнення надлишковості основного тексту записки

Перспективами розвитку розробленої системи моніторингу є: Апаратна модернізація та контроль живлення: інтеграція в схему кінцевого вузла прецизійного дільника напруги, підключеного до вільного аналогового входу АЦП мікроконтролера Seeed Studio XIAO ESP32-C3. Це дозволить пристрою автоматично контролювати рівень залишкового заряду літій-полімерного акумулятора та динамічно передавати цей показник хосту в межах телеметричного пакета. Також планується дослідження елементної бази з метою пошуку обчислювальних ядер із ще нижчим струмом споживання у режимі сну. Перехід на низькорівневий фреймворк: оптимізація програмного забезпечення шляхом відмови від Arduino SDK та переходу на офіційний професійний фреймворк ESP-IDF від компанії Espressif Systems. Робота на рівні архітектури компілятора та пряме керування регістрами RISC-V дозволить значно скоротити тривалість активної фази обчислень, гнучко налаштовувати частоту процесора та додатково знизити енергоспоживання. Стандартизація форматів даних: аналіз та впровадження спеціалізованих відкритих форматів передачі даних, адаптованих під специфіку розподілених систем точного землеробства. Це

дозволить розробити універсальну, розширяєму та масштабовану архітектуру, здатну легко інтегруватися з існуючими комерційними IIoT-платформами. Розробка диспетчерського веб-додатка: створення повноцінного клієнтського програмного інтерфейсу (Web App) з відображенням інтерактивної карти. Додаток дозволить візуалізувати топологію розподіленої Mesh-мережі, відстежувати маршрутизацію пакетів від хоста до кожного сенсора та оперативно виявляти вузли з низьким рівнем сигналу RSSI. Впровадження штучного інтелекту (AI): застосування методів інтелектуального аналізу даних та прогнозного моделювання (Machine Learning / AI) на стороні хмарного сервера. Це дозволить автоматично аналізувати накопичену базу гідротермічних вибірок ґрунту, прогнозувати ризики виникнення захворювань сільськогосподарських культур та формувати автоматизовані команди управління для виконавчих систем зрошення.

Висновки до розділу 3

1. Здійснено практичне апаратно-макетне збирання лабораторного прототипу бездротової системи моніторингу. Усунено критичний програмно-апаратний конфлікт ліній інтерфейсу SPI на мікроконтролері Seeed Studio XIAO ESP32-C3 шляхом перенесення лінії скидання радіомодуля LoRa на пін D6, а лінії даних MISO – на пін D5, що забезпечило стабільний запуск системи.
2. Розроблено оптимізоване програмне забезпечення на мові C++. Реалізовано алгоритм пакування телеметрії в компактний 6-байтовий пакет та впроваджено побітовий метод розрахунку контрольної суми (XOR) для завадостійкої перевірки цілісності даних на приймальній стороні.

3. Створено алгоритм програмного захисту шини 1-Wire, який запобігає зависанню або критичному збою мікроконтролера у разі обриву або фізичної відсутності датчика температури DS18B20.
4. Проведено аналіз експлуатаційної ефективності радіоканалу. Отримані показники рівня сигналу RSSI на рівні мінус 62 dBm підтвердили відмінну якість зв'язку та наявність високого енергетичного запасу системи для роботи на великих відстанях. Впровадження апаратного режиму глибокого сну (*Deep Sleep*) дозволило знизити споживання струму пристроєм між сеансами зв'язку до мікроамперного рівня, забезпечуючи тривалу автономність системи.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання – розроблено та практично реалізовано модель бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для автоматизованого моніторингу стану ґрунту. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки:

1. Проведено аналіз сучасних технологій бездротового зв'язку класу LPWAN. Обґрунтовано вибір технології LoRa як оптимальної для створення автономної системи моніторингу в аграрному секторі завдяки великому радіусу дії, незалежності від сторонньої інфраструктури стільникових операторів та високій енергоефективності модуляції CSS.
2. Спроектовано структурну модель сенсорної мережі з топологією «зірка». Розроблено оптимізований 6-байтовий формат пакету даних (payload), який включає ідентифікатор вузла, показники вологості та температури, а також контрольну суму (XOR) для забезпечення цілісності інформації.
3. Здійснено вдалий вибір апаратної бази на основі сучасних 32-бітних мікроконтролерів Seeed Studio XIAO ESP32-C3 (архітектура RISC-V) та радіомодулів Ra-01 (SX1278). Вирішено інженерні задачі щодо усунення апаратних конфліктів інтерфейсу SPI шляхом переназначення ліній зв'язку.
4. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення на мові C++. Для Кінцевого вузла реалізовано алгоритм опитування аналогових (ємнісний датчик) та цифрових (DS18B20) сенсорів із програмним захистом від апаратних збоїв та подальшим переходом системи у режим глибокого сну (Deep Sleep) на 10 хвилин. Для Базової станції

розроблено алгоритм безперервного прослуховування ефіру, парсингу пакетів та логування даних із мітками реального часу.

5. Проведено успішні лабораторні випробування створеного апаратно-програмного комплексу. Практично підтверджено безперебійну роботу радіоканалу: Базова станція стабільно приймала пакети телеметрії із запасом потужності сигналу (показники RSSI сягали -62 dBm).
6. Створений прототип повністю відповідає вимогам технічного завдання. Результати розробки довели свою ефективність і можуть бути впроваджені як базовий сегмент систем точного землеробства, автоматизованих теплиць та комплексів екологічного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Farooq M. S. A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming / M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid та ін. // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 156237–156271
2. Augustin A. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things / A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 9. – P. 1466
3. Попова А. В. Бездротові сенсорні мережі та системи моніторингу: навч. посіб. / А. В. Попова, І. М. Ковальчук. – К. : НТУУ «КПІ», 2019. – 142 с.
4. How does LoRa sensor send and receive data? [Електронний ресурс] // Mokosmart. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.mokosmart.com/ru/how-does-lora-sensor-send-and-receive-data/ (дата звернення: 01.06.2026).
5. Seeed Studio XIAO ESP32C3 Pinout and Hardware Details [Електронний ресурс] / Seeed Studio Wiki. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://wiki.seeedstudio.com/XIAO_ESP32C3_Getting_Started/ (дата звернення: 15.05.2026).
6. ESP32-C3 Technical Reference Manual [Електронний ресурс] / Espressif Systems. – 2023. – 1202 р. – Режим доступу до ресурсу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 15.05.2026).
7. SX1276/77/78/79 Datasheet: High Efficiency Low Power Wireless Transceiver [Електронний ресурс] / Semtech Corporation. – Rev. 7. – Camarillo, 2020. – 130 р. – Режим доступу до ресурсу: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276 (дата звернення:15.05.2026).

8. Ra-01/Ra-02 LoRa Module Specification [Електронний ресурс] / Ai-Thinker Technology. – Version 1.0. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://docs.ai-thinker.com (дата звернення: 17.05.2026).
9. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [Електронний ресурс] / Dallas Semiconductor / Maxim Integrated. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
10. Mistry S. Arduino LoRa Library [Електронний ресурс] / S. Mistry // GitHub Repository. – Режим доступу до ресурсу: https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa (дата звернення: 01.06.2026).
11. Burton M. Dallas Temperature Library for Arduino [Електронний ресурс] / M. Burton, T. Flayols // GitHub Repository. – Режим доступу до ресурсу: https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library (дата звернення: 01.06.2026).
12. Purnama I. Monitoring soil moisture using IoT based on LoRa network / I. Purnama, T. Muliawati, R. Wirawan, E. Ihsanto // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1490. – P. 012009.
13. Nakamura M. Soil moisture monitoring over paddy field using LoRaWAN / M. Nakamura, W. Piao, T. Kawahigashi // Precision Agriculture. – 2021. – Vol. 22. – P. 1235–1249 .
14. Talamantes-Alvarez A. Monitoring and Control of Greenhouse Variables with Distributed IoT Systems / A. Talamantes-Alvarez, E. A. Rivas-Araiza, M. Toledano-Ayala та ін. // IEEE Latin America Transactions. – 2020. – Vol. 18, No. 10. – P. 1832–1838 .

15. Bacco M. The Digitisation of Agriculture: A Survey of Research Activities on Smart Farming / M. Bacco, P. Barsocchi, E. Ferro та ін. // Array. – 2019. – Vol. 3–4. – P. 100009 .

ДОДАТКИ

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра комп'ютерних систем та робототехніки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри комп'ютерних
систем та робототехніки
Максим ХРУСЛОВ
_____
(підпис)
«13» жовтня 2025року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

ПОКУСАЯ ОЛЕКСАНДРА ЄВГЕНОВИЧА
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»
1. Тема роботи: **МОДЕЛЬ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORA ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТУ.**
керівник роботи **Копєйкін Володимир Васильович**, старший викладач.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від ***№ 4101-5/1245 від 28.05.2026 року.***
2. Строк подання студентом роботи ***30 травня 2026 року***
3. Вихідні дані до роботи:
   1) технічні характеристики бездротових сенсорних вузлів та модулів LoRa;
   2) програмні засоби моделювання та аналізу бездротових сенсорних мереж;
   3) параметри передачі даних за протоколом LoRa та особливості енергоспоживання мережі;
   4) можливість підключення датчиків вологості, температури та кислотності ґрунту;
   5) вимоги до дальності зв'язку, стабільності передачі даних і автономності роботи сенсорних вузлів;
   6) персональний комп'ютер для розробки програмного забезпечення та моделювання роботи мережі.
4. Перелік питань, які потрібно розробити)
   1) Аналіз сучасних IoT-систем моніторингу параметрів ґрунту.
   2) Обґрунтування вибору апаратної платформи та сенсорів для вимірювання вологості та температури ґрунту.
   3) Розробка структурної та функціональної моделі бездротової сенсорної мережі на базі LoRa.
   4) Розробка програмного забезпечення збору, обробки та передачі даних.
   5) Реалізація дистанційного моніторингу та візуалізації параметрів ґрунту.
   6) Проведення тестування системи та аналіз ефективності її роботи.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Обґрунтування актуальності дослідження, визначення об'єкта, предмета, мети та завдань роботи	01.11.2025-16.11.2025
2	Дослідження існуючих IoT-рішень для контролю параметрів ґрунту	16.11.2025-03.12.2025
3	Аналіз способів бездротової передачі даних та вибір технології LoRa	03.12.2025-19.12.2025
4	Вибір елементної бази системи (контролер та сенсори — на рівні моделі)	19.12.2025-05.01.2026
5	Побудова структурної та функціональної схеми системи моніторингу	05.01.2026-16.01.2026
6	Проектування програмної архітектури системи	16.01.2026-29.01.2026
7	Розробка програмної моделі сенсорного вузла	29.01.2026-11.02.2026
8	Моделювання передачі даних у мережі LoRa	11.02.2026-28.02.2026
9	Створення програмних засобів відображення та віддаленого контролю параметрів	28.02.2026-12.03.2026
10	Налаштування програмної моделі системи та перевірка її працездатності	12.03.2026-26.03.2026
11	Експериментальне тестування системи та аналіз результатів	26.03.2026-10.04.2026
12	Оцінка ефективності роботи системи та формування висновків	10.04.2026-24.04.2026
13	Виклад матеріалів кваліфікаційної роботи та оформлення пояснювальної записки	24.04.2026-04.05.2026
14	Звіт про переддипломну практику	04.05.2026-09.05.2026
15	Передзахист кваліфікаційної роботи	09.05.2026-20.05.2026
16	Остаточне оформлення пояснювальної записки та перевірка на плагіат	До 25.05.2026
17	Отримання відгуку керівника та рецензії	До 30.05.2026

5. Дата видачі завдання ***13 жовтня 2025 року.***

Здобувач вищої освіти _____ Олександр ПОКУСАЙ

Керівник роботи _____ Володимир КОПЄЙКІН

Додаток Б

Затверджую

_____

«_____»_____2026 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Технічне завдання на розробку моделі бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для моніторингу стану ґрунту наведено у відповідному документі. Нижче подано узагальнений виклад основних розділів.

Розділ ТЗ	**Зміст**
1. Введення	**1.1. Назва:** Модель бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для моніторингу стану ґрунту. **1.2. Галузь застосування:** автоматизація та приладобудування,сільське господарство (точне землеробство), екологічний моніторинг, автоматизація систем зрошення та тепличного господарства.
2. Підстава для розробки	**2.1.** Навчальний план за спеціальністю 151– Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. **2.2.** Завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра №4101-5/1245 від 28.05.2026 (Додаток А до пояснювальної записки).
3. Призначення розробки	**3.1. Мета розробки:** створення автономного програмно-апаратного комплексу для дистанційного вимірювання показників вологості та температури ґрунту. **3.2.** Виріб надає можливість визначати найбільш інформативні параметри стану ґрунту в режимі реального часу з метою підвищення швидкості прийняття рішень щодо поливу та зменшення енергетичних витрат на обслуговування мережі. **3.3. Вихідні дані:** технічні характеристики LoRa-трансиверів та архітектури ESP32-C3, статистичні дані вимірювань ґрунту
4. Технічні вимоги до програмного виробу	4.1 Функціональні вимоги: автономне живлення вузлів; зняття сигналів з датчиків ґрунту; передача через LoRa; інтерфейс моніторингу на базовій станції. 4.2 Вимоги до надійності: стійкість до радіоперешкод; надійність контактів датчиків в ґрунті; програмна стійкість до втрати пакетів

<table>
<tr><td></td><td>4.3. Умови експлуатації: відкритий простір (поля, сади) або тепличні умови; захист заглибних частин за стандартом IP67.

4.4. Склад технічних засобів: мікроконтролери Seeed Studio XIAO ESP32-C3, радіомодулі Ra-01 (SX1278), ємнісні датчики вологості v1.2, цифрові термодатчики DS18B20.
4.5. Інформаційна сумісність: підтримка Arduino IDE 2.x, бібліотек Arduino-LoRa та 1-Wire.</td></tr>
<tr><td>5. Вимоги до програмної документації</td><td>Відкритий простір (поля, теплиці); IP67 для заглибних частин.</td></tr>
<tr><td>6. Техніко-економічні показники</td><td>Документацією щодо техніко-економічних показників вважати:

1) Розрахунок енергетичного балансу та тривалості автономної роботи вузла (Розділ 3).

2) Порівняльний аналіз вартості розгортання мережі LoRa відносно аналогів (Розділ 1).</td></tr>
<tr><td>7. Стадії розробки</td><td>
<table>
<tr><td>Дата</td><td>Назва етапу</td></tr>
<tr><td>01.11.2025 – 16.11.2025</td><td>Обґрунтування актуальності дослідження, визначення об’єкта, предмета, мети та завдань роботи</td></tr>
<tr><td>16.11.2025 – 03.12.2025</td><td>Дослідження існуючих IoT-рішень для контролю параметрів ґрунту</td></tr>
<tr><td>03.12.2025 – 19.12.2025</td><td>Аналіз способів бездротової передачі даних та вибір технології LoRa</td></tr>
<tr><td>19.12.2025 – 05.01.2026</td><td>Вибір елементної бази системи (контролер та сенсори - на рівні моделі)</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

05.01.2026 – 16.01.2026	Побудова структурної та функціональної схеми системи моніторингу
16.01.2026 – 29.01.2026	Проєктування програмної архітектури системи
29.01.2026 – 11.02.2026	Розробка програмної моделі сенсорного вузла
11.02.2026 – 28.02.2026	Моделювання передачі даних у мережі LoRa
28.02.2026 – 12.03.2026	Створення програмних засобів відображення та віддаленого контролю параметрів
12.03.2026 – 26.03.2026	Налаштування програмної моделі системи та перевірка її працездатності
26.03.2026 – 10.04.2026	Експериментальне тестування системи та аналіз результатів
10.04.2026 – 24.04.2026	Оцінка ефективності роботи системи та формування висновків
24.04.2026 – 04.05.2026	Виклад матеріалів кваліфікаційної роботи та оформлення пояснювальної записки
04.05.2026 – 09.05.2026	Звіт про переддипломну практику
09.05.2026 – 20.05.2026	Передзахист кваліфікаційної роботи
До 25.05.2026	Остаточне оформлення пояснювальної записки та перевірка на плагіат

	До 30.05.2026	Отримання відгуку керівника та рецензії
8. Порядок контролю і приймання	Контроль виконання згідно календарного плану; Попереднє тестування функціональності; Захист на засіданні Екзаменаційної комісії; Подання пояснювальної записки у паперовому та електронному вигляді.	

Виконавець
студент групи КУ- 41
Покусай О.Є.

підпис

Замовник
Керівник роботи
Копєйкін В.В.

підпис

Додаток В

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Програма та методика випробувань на програмно-апаратний комплекс «Модель бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa для моніторингу стану ґрунту» наведена нижче.

1. Об'єкт випробувань

Програмно-апаратний комплекс «Модель бездротової сенсорної мережі на базі протоколу LoRa», що включає: апаратну частину (мікроконтролери вузла та шлюзу, LoRa-модулі SX1278, датчики вологості та температури ґрунту, систему живлення); програмну частину (прошивки MCU для опитування датчиків, формування пакетів та прийому даних на шлюзі).

2. Мета випробувань

Перевірка працездатності, підтвердження відповідності вимогам ТЗ, оцінка точності вимірювань та стабільності бездротової передачі по LoRa.

3. Методи випробувань

Таблиця В.1

Тест	Дія	Очікуваний результат
Тест 1: Ініціалізація	Подати живлення, відкрити Serial Monitor.	Повідомлення 'Успішний старт', ініціалізація датчиків без помилок.
Тест 2: Збір даних	Щупи у сухий та вологий ґрунт, порівняти з еталоном.	Похибка вологості ≤ ±5%; температура ±0.5°C.
Тест 3: LoRa зв'язок	Вузол на 50 м від шлюзу з перешкодами.	Стабільний прийом пакетів; RSSI ≥ -120 дБм.
Тест 4: Стійкість	Вимкнути шлюз на 5 хв, потім увімкнути.	Вузол не зависає; після відновлення – прийом відновлюється.

4.Результати випробувань

Тест 1: Ініціалізація.

Подати живлення, відкрити Serial Monitor.

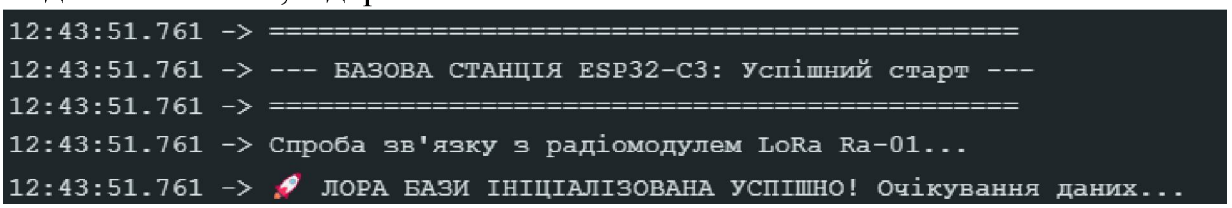


Рис В.1 Результат тесту 1.Ініціалізація.

Тест 2: Збір даних

```
14:49:35.701 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 33% | Температура: 24.3°C |
14:59:36.158 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 92% | Температура: 24.5°C |
```

Рис.В.2 Результат тесту 2.Збір даних.

Тест 3: LoRa зв'язок

```
14:49:35.701 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 33% | Температура: 24.3°C | Рівень сигналу RSSI: -56 dBm
14:59:36.158 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 92% | Температура: 24.5°C | Рівень сигналу RSSI: -58 dBm
15:09:36.385 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 94% | Температура: 24.5°C | Рівень сигналу RSSI: -62 dBm
15:19:36.584 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 94% | Температура: 24.2°C | Рівень сигналу RSSI: -59 dBm
15:29:36.223 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 95% | Температура: 24.0°C | Рівень сигналу RSSI: -57 dBm
15:39:36.497 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 95% | Температура: 23.8°C | Рівень сигналу RSSI: -61 dBm
15:49:37.339 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 95% | Температура: 24.6°C | Рівень сигналу RSSI: -61 dBm
15:59:37.478 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 96% | Температура: 24.1°C | Рівень сигналу RSSI: -69 dBm
16:09:37.644 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 97% | Температура: 23.3°C | Рівень сигналу RSSI: -69 dBm
16:19:38.189 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 97% | Температура: 24.5°C | Рівень сигналу RSSI: -69 dBm
16:29:38.415 -> Вузол: 01 | Вологість ґрунту: 97% | Температура: 24.2°C | Рівень сигналу RSSI: -70 dBm
```

Рис.В.4 тестування LoRa зв'язку на відстані.

Тест 4: Стійкість

Результат тесту 4 :Вузол не зависає; після відновлення – прийом відновлюється.

Під час проведення випробувань усі тести було пройдено успішно.

5. Висновок

Результати проведених випробувань повністю підтвердили працездатність та завадостійкість системи. Програма та методика випробувань виконана в повному обсязі, відхилень від вимог ТЗ не виявлено.

Виконавець:
Студент групи КУ-41 _____ Покусай О.Є.

Замовник (керівник роботи):_____ **Копєйкін В.В.**

Додаток Г

Приклад коду програми

Лістинг Г.1 – Код програми Базової станції

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

// Конфігурація безконфліктних пінів для XIAO ESP32-C3
#define LORA_SCK    D8
#define LORA_MISO   D5
#define LORA_MOSI   D10
#define LORA_SS     D7
#define LORA_RST    D3
#define LORA_DIO0   D2

void setup() {
  // 1. Стартуємо USB-порт
  Serial.begin(115200);

    // 2. Блокування: плата чекає, поки ти відкриєш Serial
Monitor в Arduino IDE
  while (!Serial) {
    delay(10);
  }
  delay(1000); // Пауза для стабілізації вікна Windows


Serial.println("=============================================="
);
   Serial.println("--- БАЗОВА СТАНЦІЯ ESP32-C3: Успішний старт
---");

Serial.println("=============================================="
);

  // 3. Ініціалізація апаратного SPI з новими безпечними пінами
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_SS);
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

      Serial.println("Спроба   зв'язку   з   радіомодулем   LoRa
Ra-01...");

  // 4. Старт модуля LoRa на частоті 433 МГц
  if (!LoRa.begin(433E6)) {
    Serial.println(" ПОМИЛКА: Модуль LoRa НЕ відповідає!");
      Serial.println(" Що перевірити: Чи щільно стоїть провід
MISO в D5, а RST в D3?");
    while (1); // Зупиняємо процесор, якщо залізо не підключене
  }

  // 5. Конфігурація радіоканалу
```

```
  LoRa.setSpreadingFactor(9);           // SF9
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);       // BW 125 кГц
  LoRa.setCodingRate4(6);               // CR 4/6

  Serial.println(" ЛОРА БАЗИ ІНІЦІАЛІЗОВАНА УСПІШНО! Очікування
даних...");
}

void loop() {
  // Перевіряємо, чи прийшов новий радіопакет
  int packetSize = LoRa.parsePacket();

  if (packetSize == 6) { // Очікуємо стабільні 6 байт структури
    uint8_t payload[6];

    // Зчитуємо байтовий масив з ефіру
    for (int i = 0; i < 6; i++) {
      payload[i] = LoRa.read();
    }

    // Перевірка цілісності даних через XOR
    uint8_t calcChecksum = payload[0] ^ payload[1] ^ payload[2]
^ payload[3] ^ payload[4];

    if (calcChecksum == payload[5]) {
      uint8_t nodeID = payload[0];
      int moisture = payload[1] | (payload[2] << 8);
      int temp10 = payload[3] | (payload[4] << 8);
      float temperature = (float)temp10 / 10.0;
      int rssi = LoRa.packetRssi(); // Рівень сигналу в дБм


      Serial.print("Вузол: ");
      if(nodeID < 10) Serial.print("0");
      Serial.print(nodeID);

      Serial.print(" | Вологість ґрунту: ");
      Serial.print(moisture);
      Serial.print("% | Температура: ");
      Serial.print(temperature, 1);

      Serial.print("°C | Рівень сигналу RSSI: ");
      Serial.print(rssi);
      Serial.println(" dBm");
    } else {
        Serial.println("⚠ Попередження: Помилка контрольної
суми. Пакет відхилено.");
    }
  }
}
```

Лістинг Г.2 – Код програми Кінцевого вузла

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>


#define LORA_SCK    D8
#define LORA_MISO   D5
#define LORA_MOSI   D10
#define LORA_SS     D7
#define LORA_RST    D6
#define LORA_DIO0   D2

// Піни датчиків системи моніторингу
#define MOISTURE_PIN A0  // Сигнал датчика вологості (Пін D0)
#define ONE_WIRE_BUS D3   // Дані цифрового термометра DS18B20
(Пін D3)

// Час глибокого сну (у мікросекундах)
// 10 хвилин = 10 * 60 * 1 000 000 мікросекунд
#define TIME_TO_SLEEP  600000000ULL

// Константи калібрування вологості (12-біт АЦП ESP32)
const int ADC_DRY = 3200;
const int ADC_WET = 1500;

const uint8_t NODE_ID = 0x01;

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
  // 1. Стартуємо USB-порт
  Serial.begin(115200);


  delay(1000);


Serial.println("\n=============================================
=");
   Serial.println("--- КІНЦЕВИЙ ВУЗОЛ: Пробудження, зчитування
датчиків ---");

Serial.println("=============================================="
);


  pinMode(ONE_WIRE_BUS, INPUT_PULLUP);
  delay(10);
```

```
  // 2. Ініціалізація апаратної шини SPI
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_SS);
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

  if (!LoRa.begin(433E6)) {
       Serial.println("❌ ПОМИЛКА: Модуль LoRa на Вузлі НЕ
відповідає!");
    // Якщо радіо зламане, засинаємо, щоб не садити батарею
    goToSleep();
  }

  // 3. Налаштування радіоканалу
  LoRa.setSpreadingFactor(9);           // SF9
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);       // BW 125 кГц
  LoRa.setCodingRate4(6);               // CR 4/6
  LoRa.setTxPower(17);                  // Потужність 17 дБм

  sensors.begin();

  // 4. Виклик функції вимірювання та відправки даних
  runMeasurementAndTx();

  // 5. Перехід у режим глибокого сну на 10 хвилин
  goToSleep();
}

void loop() {

}

void runMeasurementAndTx() {
  // Зчитування вологості
  int adc_value = analogRead(MOISTURE_PIN);
    float moisture_float = ((float)(ADC_DRY - adc_value) /
(float)(ADC_DRY - ADC_WET)) * 100.0;
  int moisture = (int)constrain(moisture_float, 0, 100);

  // Зчитування температури з DS18B20
  sensors.requestTemperatures();
  float temp_float = sensors.getTempCByIndex(0);

  if (temp_float == DEVICE_DISCONNECTED_C) {
       Serial.println("⚠ Помилка заліза: Датчик DS18B20 не
знайдено (немає підтяжки).");
    temp_float = 0.0;
  }

  int temp10 = (int)(temp_float * 10.0);

  // Формування 6-байтового пакету
```

```
  uint8_t payload[6];
  payload[0] = NODE_ID;
  payload[1] = moisture & 0xFF;
  payload[2] = (moisture >> 8) & 0xFF;
  payload[3] = temp10 & 0xFF;
  payload[4] = (temp10 >> 8) & 0xFF;
    payload[5]  =  payload[0]  ^  payload[1]  ^  payload[2]  ^
payload[3] ^ payload[4]; // XOR

  // Відправка в ефір
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.write(payload, 6);
  LoRa.endPacket();

   Serial.print("[РАДІОПАКЕТ  ВІДПРАВЛЕНО]  ->  Вологість:  ");
Serial.print(moisture);
   Serial.print("%,  Температура:  ");  Serial.print(temp_float,
1); Serial.println("°C");
}

void goToSleep() {
   Serial.println("💤 Увімкнення режиму глибокого сну на 10
хвилин...");
  LoRa.sleep();

  // Налаштування таймера пробудження ESP32-C3
  esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP);

  // Засинаємо
  esp_deep_sleep_start();
}
```