

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі
платформи Meshtastic

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи CI-41
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Борох М. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лецишин Ю.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Луцик Н.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Дмитроца Л.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 25 » квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Бороху Миколі Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів
на базі платформи Meshtastic

Керівник роботи Лецишин Юрій Зіновійович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » 04 2026 року № 4/9-188.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проєктна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

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

1. Схема електрична структурна

2. Схема електрична принципова

3. Блок схема алгоритму роботи системи

4. UML-діаграма станів

5. UML-діаграма компонентів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О. Я. доцент кафедри МТ</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент

Борох М. В.

Керівник роботи

Лешишин Ю.3.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Борох М. В. Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: Meshtastic, ESP32, UART, SPI, I²C, алгоритм.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з чотирьох розділів.

У першому розділі виконано аналіз технічного завдання, та укладено вимоги до комп'ютеризованої системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic та аналіз можливих рішень.

В другому розділі описується процес проектування та реалізації проекту, комп'ютеризованої системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic. Приводиться розробка апаратного забезпечення для функціонування системи. Розглядаються бібліотеки та реалізація функцій побудованих на основі них, їх алгоритми.

В третьому розділі проводиться програмна реалізація, налаштування та тестування комп'ютеризованої системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic.

Четвертий розділ описує безпеку життєдіяльності, основи охорони праці.

ABSTRACT

Borokh M. V. Computer System for Data Exchange for Warehouse Employees Based on the Meshtastic Platform: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 — computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: Meshtastic, ESP32, UART, SPI, I2C, algorithm.

The bachelor's qualification work consists of four sections.

The first section analyzes the technical task, and concludes the requirements for a computerized data exchange system for warehouse workers based on the Meshtastic platform and analyzes possible solutions.

The second section describes the process of designing and implementing the project, a computerized data exchange system for warehouse workers based on the Meshtastic platform. The development of hardware for the functioning of the system is presented. Libraries and the implementation of functions built on their basis, their algorithms are considered.

The third section provides software implementation, configuration and testing of a computerized data exchange system for warehouse workers based on the Meshtastic platform.

The fourth section describes the safety of life, the basics of labor protection.

ЗМІСТ

СПИСОК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	11
1.1 Аналіз завдань платформи Meshtastic	11
1.2 Принципи побудови і роботи платформи Meshtastic.....	14
1.3 Аналіз вимог до системи обміну даними.....	188
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Розробка структури системи	22
2.2 Обґрунтування вибору апаратної частини системи обміну даними.....	24
2.2.1 Вибір плати мікроконтролера ESP32-S3.....	24
2.2.2 Вибір модуля радіо модему LoRa SX1278.....	24
2.2.3 Вибір GPS модуля Foxeer m10q 180 v1	29
2.2.4 Вибір екрану OLED SSD1306	31
2.3 Опис шин, протоколів, які використовуються в проекті.	32
2.3.1 Алгоритмічна організація протоколу Meshtastic.....	32
2.3.2 Принцип роботи протоколу LoRa.....	32
2.4 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи	36
2.5 UML-діаграма станів.....	39
2.7 UML-діаграма компонентів.....	42

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Борох М. В.			Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.					6	64
Н. Контр.		Луцик Н.С.				ТНТУ, каф. КС, гр. CI-41		
Затверд.		Осухівська Г.М.						

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	45
3.1 Опис коду програми роботи системи.....	45
3.2 Налаштування мережі Meshtastic.....	52
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	57
4.1 Долікарська допомога при укусах змій, комах, тварин.....	57
4.2 Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання.	59
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
Додаток А. Технічне завдання	
Додаток Б. Перелік елементів	
Додаток В. Код програми	

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І
СКОРОЧЕНЬ

I2C — Inter-Integrated Circuit

SPI — Serial Peripheral Interface

UART — universal asynchronous receiver-transmitter

USB — Universal Serial Bus

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку логістики та складського господарства особливого значення набуває забезпечення оперативного та надійного обміну інформацією між працівниками складських комплексів. Від швидкості передачі повідомлень, координації дій персоналу та своєчасного отримання виробничих завдань значною мірою залежить ефективність виконання складських операцій, раціональність використання ресурсів та загальна продуктивність роботи підприємства. У великих складських приміщеннях із розгалуженою інфраструктурою, значною кількістю металевих конструкцій та великою площею покриття використання традиційних засобів зв'язку не завжди забезпечує необхідний рівень надійності та доступності передачі даних.

Поширеним засобом комунікації є мобільний зв'язок та бездротові мережі Wi-Fi, однак їх використання пов'язане із залежністю від існуючої телекомунікаційної інфраструктури, необхідністю забезпечення стабільного покриття та додатковими витратами на обслуговування. Крім того, у разі аварійних ситуацій або відсутності доступу до мережі Інтернет ефективність таких рішень суттєво знижується. Тому актуальним напрямом є застосування автономних бездротових мереж, здатних функціонувати незалежно від зовнішньої інфраструктури та забезпечувати надійний обмін повідомленнями між користувачами.

Одним із перспективних рішень для побудови таких систем є використання технології LoRa та платформи Meshtastic [1-4]. Технологія LoRa забезпечує передачу даних на значні відстані при низькому енергоспоживанні, а платформа Meshtastic дозволяє організовувати децентралізовані mesh-мережі, у яких кожен вузол може не лише приймати та передавати повідомлення, але й виконувати функції ретранслятора. Це забезпечує розширення зони покриття мережі та підвищення її стійкості до відмов окремих вузлів. Завдяки цьому Meshtastic є перспективною платформою для створення систем зв'язку на об'єктах складської логістики, де необхідно забезпечити надійний обмін

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даними між працівниками незалежно від наявності мережі Інтернет або мобільного покриття.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає у необхідності розроблення сучасних комп'ютерних систем обміну даними для працівників складів, які поєднують автономність, енергоефективність, простоту розгортання та надійність функціонування. Використання платформи Meshtastic дозволяє створити гнучку систему зв'язку, придатну для експлуатації на складах різного масштабу, а також забезпечити оперативне інформування персоналу про виробничі завдання, зміни в логістичних процесах та аварійні ситуації.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic, дослідження принципів її функціонування та оцінка ефективності використання в умовах складського комплексу. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз існуючих технологій бездротового зв'язку, обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів, розробити структуру системи, дослідити особливості передачі повідомлень у mesh-мережі та оцінити основні технічні характеристики запропонованого рішення. Отримані результати можуть бути використані для впровадження автономних систем комунікації на підприємствах логістичної сфери та підвищення ефективності організації роботи складського персоналу.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз завдань платформи Meshtastic

Meshtastic — це відкрита програмно-апаратна платформа для організації автономного бездротового обміну повідомленнями на основі технології LoRa та mesh-мереж. Основним призначенням платформи є забезпечення передачі текстових повідомлень, координат місцезнаходження та службових даних між користувачами без використання мобільного зв'язку, мережі Інтернет або іншої централізованої телекомунікаційної інфраструктури. Проєкт Meshtastic є програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, що дозволяє використовувати широкий спектр доступних апаратних платформ на базі мікроконтролерів сімейства ESP32 та LoRa-трансиверів виробництва Semtech серій SX127x і SX126x [1-6].

Основою функціонування Meshtastic є технологія LoRa (Long Range), яка забезпечує передачу невеликих обсягів даних на значні відстані при мінімальному енергоспоживанні. На відміну від традиційних бездротових технологій, таких як Wi-Fi або Bluetooth, LoRa орієнтована на передачу інформації з низькою швидкістю, проте на відстані від кількох кілометрів у міських умовах до десятків кілометрів на відкритій місцевості. Завдяки використанню спеціальних методів модуляції сигналу технологія LoRa забезпечує високу завадостійкість та стабільність зв'язку навіть у складних умовах поширення радіохвиль.

Важливою особливістю Meshtastic є використання принципів mesh-мережі. У традиційних мережах передача даних здійснюється через центральний вузол або базову станцію, тоді як у mesh-мережі кожен вузол може виконувати функції приймача, передавача та ретранслятора повідомлень.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Борох М. В.			Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Пояснююча записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Лецишин Ю.З.								11	64
Н. Контр.		Луцик Н.С.						ТНТУ, каф. КС, гр. CI-41			
Затверд.		Осухівська Г.М.									

Якщо прямий зв'язок між двома пристроями відсутній через значну відстань або наявність перешкод, повідомлення може бути автоматично передане через один або декілька проміжних вузлів. Такий підхід дозволяє суттєво розширити зону покриття мережі та підвищити її стійкість до відмов окремих елементів системи. У результаті мережа продовжує функціонувати навіть у випадку виходу з ладу частини вузлів або зміни їх розташування.

Для роботи Meshtastic використовуються компактні пристрої (див. рис.1.1), що складаються з мікроконтролера, LoRa-модуля, антени та джерела живлення. Більшість сучасних вузлів додатково оснащуються GPS-модулями, OLED-дисплеями, акумуляторами та засобами бездротового підключення через Bluetooth або Wi-Fi. Налаштування та керування пристроями здійснюється за допомогою мобільних додатків для операційних систем Android та iOS або через спеціалізовані програми для персональних комп'ютерів. Взаємодія між смартфоном і вузлом Meshtastic зазвичай відбувається через Bluetooth Low Energy, що дозволяє користувачеві відправляти та отримувати повідомлення безпосередньо зі свого мобільного пристрою.



Рисунок 1.1 – Обмін даними через додаткові пристрої Meshtastic

Платформа підтримує передачу як широкомовних повідомлень для всіх учасників мережі, так і приватних повідомлень між окремими користувачами. Для забезпечення конфіденційності використовується шифрування даних,

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдяки чому інформація захищена від несанкціонованого доступу. Крім текстових повідомлень система може передавати географічні координати, телеметричні дані від датчиків, інформацію про стан пристроїв та інші службові повідомлення. Це значно розширює сферу використання Meshtastic та дозволяє застосовувати її не лише як засіб обміну повідомленнями, але й як основу для побудови систем моніторингу та керування.

Сьогодні Meshtastic використовується в багатьох сферах діяльності. Однією з найпоширеніших є туристичні походи, експедиції та активний відпочинок на природі. У місцях, де відсутнє покриття мобільних операторів, користувачі можуть підтримувати зв'язок між собою на значних відстанях, передавати повідомлення та відстежувати місцезнаходження учасників групи. Завдяки низькому енергоспоживанню пристрої можуть працювати від акумуляторів протягом кількох днів або навіть тижнів без підзарядки.

Іншим важливим напрямом використання є забезпечення зв'язку під час надзвичайних ситуацій (див. рис.1.2). У випадку стихійних лих, техногенних аварій або пошкодження телекомунікаційної інфраструктури Meshtastic дозволяє швидко організувати автономну мережу обміну інформацією між рятувальними службами, волонтерами та постраждалими. Оскільки система не потребує наявності базових станцій або доступу до Інтернету, вона може функціонувати навіть за повного відключення традиційних каналів зв'язку.

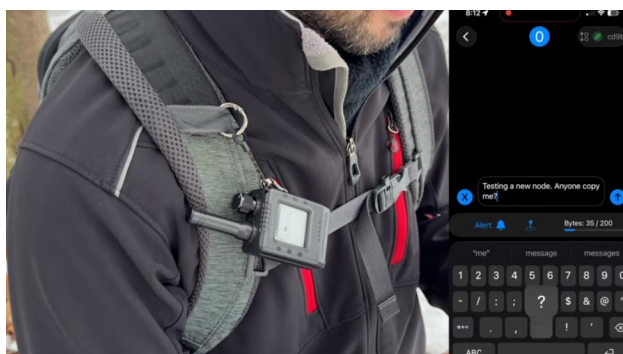


Рисунок 1.2 – Meshtastic для пошукових операцій

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Платформа також активно використовується у сфері аматорського радіозв'язку, для побудови експериментальних мереж Інтернету речей, моніторингових систем та дослідницьких проєктів. Завдяки відкритому програмному коду користувачі можуть модифікувати програмне забезпечення, додавати нові функції та інтегрувати різноманітні датчики й виконавчі пристрої. Це робить Meshtastic популярним інструментом серед розробників електроніки, студентів технічних спеціальностей та ентузіастів бездротових технологій.

Перспективним напрямом застосування Meshtastic є логістика та складське господарство. У великих складських комплексах, де металеві стелажі та будівельні конструкції можуть погіршувати якість бездротового зв'язку, використання mesh-мережі дозволяє забезпечити стабільний обмін повідомленнями між працівниками. Кожен пристрій може виступати ретранслятором, що сприяє покращенню покриття мережі та підвищенню надійності доставки повідомлень. Такий підхід дозволяє організувати оперативний обмін виробничими завданнями, повідомленнями про переміщення вантажів, аварійними сповіщеннями та іншою службовою інформацією без необхідності використання зовнішньої телекомунікаційної інфраструктури.

1.2 Принципи побудови і роботи платформи Meshtastic

Платформа Meshtastic побудована на принципах децентралізованого бездротового обміну даними із використанням технології LoRa та архітектури mesh-мереж (див. рис.1.3) [1-7]. Основною метою платформи є забезпечення надійного зв'язку між користувачами без необхідності використання мобільних операторів, точок доступу Wi-Fi, серверів або іншої централізованої телекомунікаційної інфраструктури. На відміну від традиційних систем зв'язку, у яких передача інформації здійснюється через центральний вузол або базову

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станцію, Meshtastic використовує принцип рівноправної взаємодії вузлів мережі, коли кожен пристрій може самостійно приймати, обробляти, передавати та ретранслювати повідомлення [1-4].

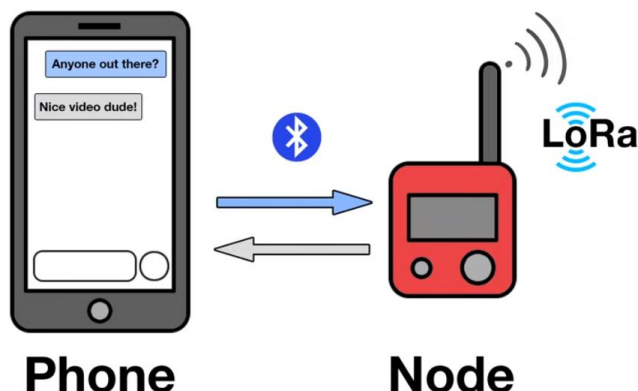


Рисунок 1.3 – Підключення додаткових пристроїв до Meshtastic

Основу апаратної частини платформи становлять пристрої, побудовані на базі мікроконтролерів сімейства ESP32 та радіомодулів LoRa серій SX1276, SX1278, SX1262 або інших сумісних чипів [1-7]. Кожен вузол мережі є автономним пристроєм, що містить мікроконтролер, радіомодуль, антену та джерело живлення. Додатково вузли можуть оснащуватися GPS-приймачами, дисплеями, датчиками та іншими периферійними компонентами. Програмне забезпечення Meshtastic встановлюється безпосередньо на мікроконтролер і забезпечує керування всіма функціями вузла, включаючи передачу даних, маршрутизацію повідомлень, шифрування та взаємодію з користувачем.

Принцип роботи платформи базується на використанні технології LoRa, яка забезпечує передачу інформації на великі відстані за рахунок застосування методу розширеного спектра Chirp Spread Spectrum. На відміну від традиційних радіотехнологій, LoRa дозволяє передавати невеликі обсяги даних на відстані від кількох кілометрів у міських умовах до десятків кілометрів на відкритій місцевості при дуже низькому енергоспоживанні. Саме тому платформа Meshtastic орієнтована переважно на передачу текстових повідомлень, координат місцезнаходження та телеметричних даних, а не великих мультимедійних файлів.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після увімкнення пристрою вузол автоматично починає прослуховувати радіоканал та передавати службову інформацію про свою присутність у мережі. Інші вузли, які знаходяться в зоні дії радіозв'язку, отримують ці дані та формують інформацію про сусідні пристрої. Таким чином створюється динамічна карта мережі, яка постійно оновлюється залежно від зміни розташування користувачів, умов поширення сигналу та інших факторів. Завдяки цьому кожен вузол знає про наявність інших пристроїв у мережі та може брати участь у маршрутизації повідомлень.

Ключовою особливістю Meshtastic є використання mesh-принципу передачі даних (див. рис.1.4). Якщо два вузли не можуть встановити прямий радіозв'язок через значну відстань або наявність перешкод, повідомлення може бути доставлене через проміжні вузли. Наприклад, якщо вузол А не бачить вузол С, але обидва мають зв'язок із вузлом В, повідомлення від вузла А спочатку передається вузлу В, а потім ретранслюється до вузла С. У результаті мережа здатна покривати значно більшу територію, ніж окремі радіопристрій. Кожен вузол автоматично виконує функцію ретранслятора, що дозволяє розширювати мережу без встановлення спеціалізованого мережевого обладнання.

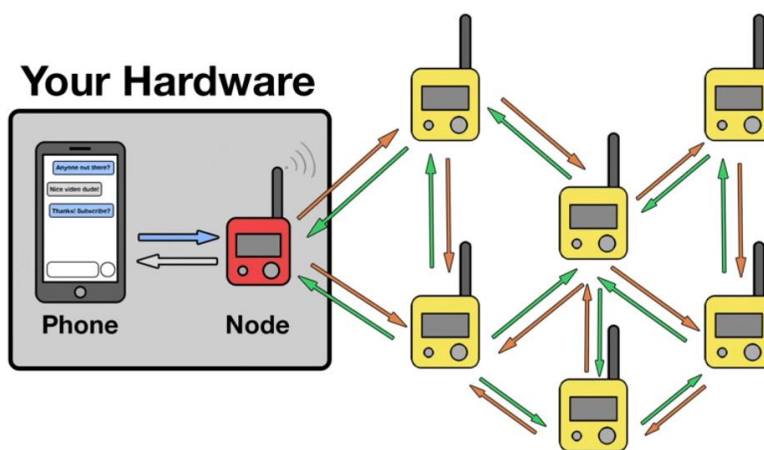


Рисунок 1.4 – Mesh-принцип передачі даних

Для уникнення неконтрольного розповсюдження пакетів у мережі використовується механізм обмеження кількості ретрансляцій. Кожне

повідомлення містить службовий параметр, що визначає допустиму кількість переходів між вузлами. Після досягнення встановленого ліміту подальша ретрансляція пакета припиняється. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на радіоканал, підвищити ефективність використання пропускну здатності мережі та знизити енергоспоживання пристроїв.

Передача інформації в Meshtastic здійснюється у вигляді спеціальних пакетів даних, які містять службову та корисну інформацію. До службових даних належать унікальний ідентифікатор вузла, адреса відправника, адреса отримувача, параметри маршрутизації, часові мітки та інші технічні відомості. Корисна частина пакета може містити текстове повідомлення, координати GPS, телеметричні дані або іншу інформацію, яку необхідно передати користувачам мережі. Перед відправленням пакет проходить процедуру кодування та шифрування, після чого передається через LoRa-модуль.

Важливим принципом роботи Meshtastic є забезпечення конфіденційності інформації. Для цього використовується симетричне шифрування повідомлень за допомогою спільного ключа каналу. Усі пристрої, що належать до одного каналу зв'язку, використовують однаковий криптографічний ключ, який дозволяє розшифровувати отримані повідомлення. Якщо пакет отримує вузол, який не має відповідного ключа, зміст повідомлення залишається недоступним. Завдяки цьому забезпечується захист даних від несанкціонованого доступу навіть у відкритому радіоефірі.

Для взаємодії користувача з мережею використовується мобільний додаток або програмне забезпечення для персонального комп'ютера. З'єднання між смартфоном та вузлом Meshtastic зазвичай здійснюється через Bluetooth Low Energy. Користувач формує повідомлення у додатку, після чого воно передається на найближчий вузол мережі. Далі пакет автоматично поширюється мережею відповідно до алгоритмів маршрутизації. Отримувач бачить повідомлення у своєму мобільному додатку або на дисплеї пристрою залежно від конфігурації системи.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково платформа підтримує передачу геолокаційної інформації. Якщо вузол обладнаний GPS-приймачем, його координати можуть періодично передаватися до мережі. Це дозволяє відображати розташування користувачів на карті, контролювати переміщення мобільних об'єктів та організовувати навігацію в межах мережі. Також підтримується передача телеметричних даних від зовнішніх датчиків, що відкриває можливості для використання Meshtastic у системах моніторингу, автоматизації та Інтернету речей.

Важливою перевагою платформи є її висока автономність. Завдяки низькому енергоспоживанню технології LoRa більшість вузлів можуть працювати від акумуляторів протягом декількох днів або навіть тижнів без підзарядки. Це дозволяє використовувати Meshtastic у польових умовах, на промислових об'єктах, у логістичних комплексах та інших місцях, де відсутні стаціонарні джерела живлення або традиційна телекомунікаційна інфраструктура.

1.3 Аналіз вимог до системи обміну даними

Під час проєктування комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic необхідно визначити перелік функціональних, технічних та експлуатаційних вимог, виконання яких забезпечить ефективне функціонування системи в реальних умовах роботи складського комплексу. Як апаратну основу системи обрано мікроконтролер ESP32, LoRa-трансивер SX1278, GPS-модуль для визначення координат та OLED-дисплей SSD1306 для локального відображення інформації. Поєднання зазначених компонентів дозволяє створити автономний вузол mesh-мережі, здатний виконувати функції приймання, обробки, передачі та відображення даних.

Основною вимогою до системи є забезпечення надійного бездротового обміну повідомленнями між працівниками складу незалежно від наявності

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішньої телекомунікаційної інфраструктури. Система повинна функціонувати автономно та забезпечувати передачу інформації без використання мереж мобільного зв'язку, точок доступу Wi-Fi або підключення до мережі Інтернет. Для реалізації цієї вимоги використовується технологія LoRa та програмна платформа Meshtastic, які дозволяють організувати децентралізовану mesh-мережу з можливістю ретрансляції повідомлень через проміжні вузли.

Система повинна підтримувати передачу текстових повідомлень між користувачами мережі. Повідомлення мають доставлятися окремим користувачам або групам користувачів із високою ймовірністю успішного прийому. Для умов складського комплексу особливого значення набуває можливість роботи в середовищі з великою кількістю металевих конструкцій, стелажів та обладнання, які можуть створювати перешкоди для поширення радіосигналів. У зв'язку з цим система повинна підтримувати автоматичну ретрансляцію пакетів даних через проміжні вузли мережі, що дозволить забезпечити стабільний зв'язок навіть у випадках відсутності прямої видимості між передавачем і приймачем.

Важливою вимогою є забезпечення достатньої дальності зв'язку. Для обраного LoRa-модуля SX1278, який працює в діапазоні 433 МГц, система повинна забезпечувати впевнений зв'язок у межах складських приміщень на відстанях до кількох сотень метрів залежно від особливостей забудови та кількості перешкод. При використанні декількох вузлів-ретрансляторів зона покриття повинна масштабуватися відповідно до площі складського комплексу без необхідності використання центрального мережевого обладнання.

Система повинна підтримувати функцію визначення місцезнаходження працівників або транспортних засобів за допомогою GPS-модуля. Координати можуть використовуватися для контролю переміщення персоналу, моніторингу маршрутів руху навантажувачів, визначення місця виконання робіт або оперативного пошуку співробітників на території підприємства. Передача

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

координат повинна здійснюватися автоматично через задані інтервали часу або за запитом користувача. Отримана інформація має бути доступною для інших вузлів мережі відповідно до налаштувань доступу.

Для відображення службової інформації вузол повинен бути обладнаний OLED-дисплеєм SSD1306. Дисплей повинен забезпечувати виведення основних параметрів роботи системи, зокрема ідентифікатора вузла, рівня сигналу LoRa, стану мережевого з'єднання, рівня заряду акумулятора, часу роботи пристрою, інформації про отримані повідомлення та координати місцезнаходження. Наявність локального дисплея дозволяє використовувати пристрій як автономний термінал навіть без підключення до смартфона або комп'ютера.

Однією з ключових вимог до системи є забезпечення високої надійності функціонування. Кожен вузол повинен автоматично відновлювати роботу після перезавантаження або короткочасної втрати зв'язку. Програмне забезпечення повинно підтримувати механізми контролю доставки повідомлень, повторної передачі пакетів у разі виникнення помилок та автоматичного оновлення інформації про сусідні вузли мережі. Також необхідно забезпечити стабільну роботу системи при тривалому безперервному функціонуванні.

Важливою вимогою є енергоефективність. Оскільки вузли можуть використовуватися як переносні пристрої, система повинна забезпечувати мінімальне споживання електроенергії. Мікроконтролер ESP32 повинен підтримувати режими енергозбереження, а LoRa-модуль повинен перебувати в режимі очікування за відсутності передачі даних. Це дозволить забезпечити тривалу автономну роботу пристрою від акумуляторного живлення без необхідності частого заряджання.

Система повинна забезпечувати захист переданих даних. Усі повідомлення мають передаватися із використанням механізмів шифрування, що реалізовані платформою Meshtastic. Використання криптографічного захисту дозволить запобігти несанкціонованому доступу до службової

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інформації підприємства та забезпечити конфіденційність обміну даними між працівниками.

Важливою характеристикою системи є масштабованість. Архітектура мережі повинна дозволяти додавання нових вузлів без необхідності внесення змін до вже існуючої інфраструктури. Кожен новий пристрій після налаштування повинен автоматично інтегруватися до мережі та брати участь у процесах маршрутизації повідомлень. Це дозволить адаптувати систему до складських комплексів різного масштабу та конфігурації.

Система також повинна забезпечувати простоту використання. Працівники складу не повинні володіти спеціальними технічними знаннями для роботи з обладнанням. Інтерфейс користувача має бути інтуїтивно зрозумілим, а основні функції — доступними через просте меню та зрозумілі повідомлення на дисплеї. Час підготовки пристрою до роботи повинен бути мінімальним.

Таким чином, комп'ютерна система обміну даними для працівників складів, побудована на базі компонентів ESP32, LoRa SX1278, GPS-модуля та OLED-дисплея SSD1306, повинна забезпечувати автономний обмін повідомленнями, підтримку mesh-маршрутизації, визначення координат користувачів, локальне відображення інформації, захищену передачу даних, високу надійність, енергоефективність та можливість масштабування. Сукупність зазначених характеристик дозволить створити ефективну систему оперативного зв'язку для координації роботи персоналу складських комплексів та підвищення ефективності виконання логістичних операцій.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структури системи

Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic повинна складатись із наступних модулів і компонентів та виконувати наступні задачі:

1) Система обміну даними побудована на основі апаратно програмної платформи Meshtastic складається з плати мікроконтролера ESP32, який виконує всі операції пов'язані із роботою алгоритмів роботи Mesh мережі, шифрування, виводу інформації на екран. Також для зв'язку з планшетом використовується протокол Bluetooth;

2) Система повинна обмінюватись даними з іншими Meshtastic пристроями за допомогою протоколу LoRa, який реалізовано за допомогою радіомодема SX1278, який в свою чергу керується мікроконтролером ESP32 через шину передачі даних SPI;

3) Для відображення службових даних або виводу повідомлень використовується екран OLED SSD1306, який також керується за допомогою мікроконтролера ESP32 через шину I2C ;

4) Оскільки для коректної організації роботи складів необхідно знати місце перебування працівників, або при потребі обладнання, то до системи додано GPS модуль. Модуль відстежує координати пристрою та надсилає їх на мікроконтролера ESP32 по шині UART, а мікроконтролер, в свою чергу надсилає через протокол Meshtastic на сервер або додаток на планшеті;

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Борох М. В.			Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Пояснююча записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Лецишин Ю.З.								22	64
Н. Контр.		Луцик Н.С.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41			
Затверд.		Осухівська Г.М.									

За цими вимогами та критеріями було розроблено структурну схему комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic рис. 2.1.

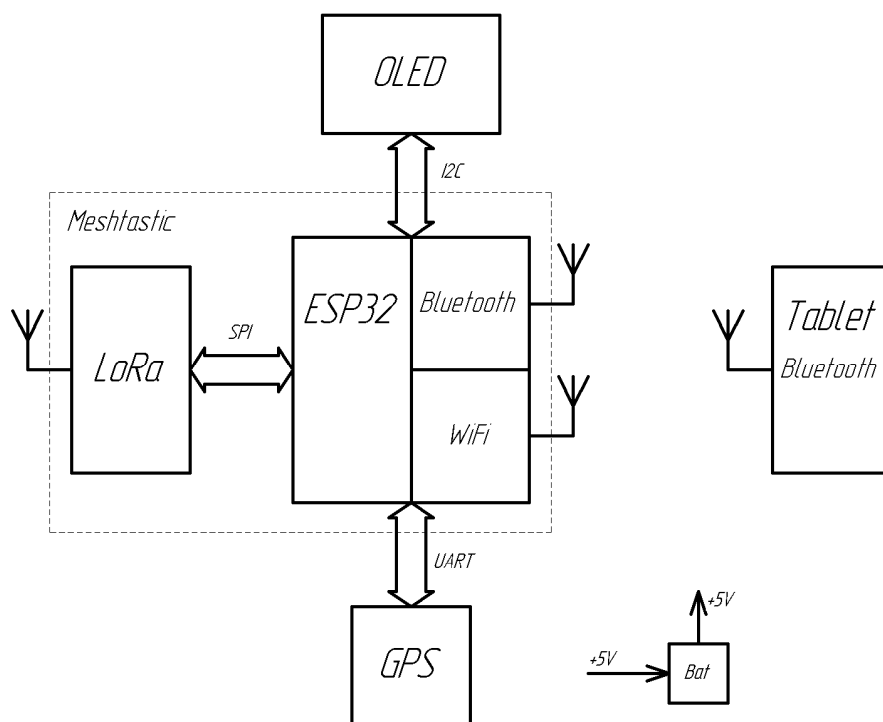


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи

Загалом мікроконтролер ESP32 виконує організацію зв'язку в Mesh мережі через радіо модем LoRa, отримує поточні координати пристрою від модуля GPS та відображає режими роботи пристрою та надіслані повідомлення на OLED екрані. Також мікроконтролер ESP32 надсилає повідомлення на планшет Tablet із спеціалізованим додатком через безпроводний зв'язок Bluetooth.

Система має автономне живлення від Li-ion акумулятора розміру 18650, що поєднаний із підвищуючим перетворювачем, який генерує струм напругою +5В. Акумулятор заряджається від будь якого USB Type-C зарядного пристрою напругою +5В.

2.2 Обґрунтування вибору апаратної частини системи обміну даними

2.2.1 Вибір плати мікроконтролера ESP32-S3

Для реалізації комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic як основний обчислювальний модуль було обрано мікроконтролерну плату на базі ESP32-S3. Вибір даної платформи обумовлений її високою продуктивністю, широкими можливостями інтеграції з периферійними пристроями, підтримкою бездротових технологій та повною сумісністю з програмним забезпеченням Meshtastic. Крім того, ESP32-S3 є сучасним представником сімейства мікроконтролерів ESP32, який має покращені характеристики порівняно з попередніми поколіннями та забезпечує достатній запас обчислювальних ресурсів для реалізації всіх функцій проєктованої системи [2].

Мікроконтролер ESP32-S3 (див. рис.2.2) побудований на базі двоядерного процесора Xtensa LX7 з тактовою частотою до 240 МГц. Наявність двох обчислювальних ядер дозволяє ефективно розподіляти виконання різних завдань між процесами системи. Зокрема, одне ядро може обслуговувати роботу мережових протоколів і взаємодію з LoRa-модулем, тоді як друге може використовуватися для обробки інформації від GPS-приймача, керування інтерфейсом користувача та відображення даних на OLED-дисплеї. Така архітектура сприяє підвищенню швидкодії системи та забезпечує стабільну роботу навіть при одночасному виконанні декількох функцій.

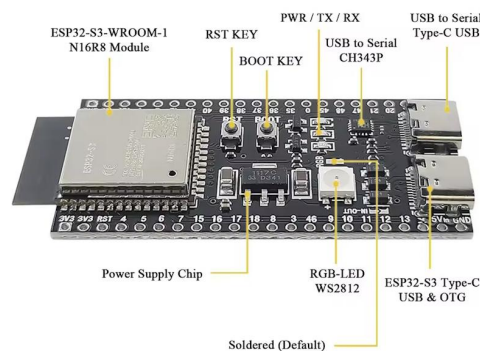


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32-S3

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з важливих переваг ESP32-S3 є значний обсяг оперативної та флеш-пам'яті, що дозволяє розміщувати програмне забезпечення платформи Meshtastic, зберігати конфігураційні дані та підтримувати роботу додаткових програмних модулів. У процесі функціонування вузол повинен обробляти інформацію про сусідні пристрої мережі, таблиці маршрутів, повідомлення користувачів, координати GPS та службові параметри системи. Наявність достатнього обсягу пам'яті дозволяє виконувати ці операції без перевантаження мікроконтролера та забезпечує можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи.

Важливим фактором вибору ESP32-S3 є наявність великої кількості універсальних цифрових входів-виходів, що забезпечують підключення всіх необхідних компонентів проєктованої системи. Для взаємодії з LoRa-трансивером SX1278 використовується інтерфейс SPI, який забезпечує високошвидкісний обмін даними між мікроконтролером та радіомодулем. GPS-модуль підключається через послідовний інтерфейс UART, що дозволяє отримувати навігаційні дані у реальному часі. Для керування OLED-дисплеєм SSD1306 використовується інтерфейс I²C, який потребує лише двох сигнальних ліній та забезпечує просту інтеграцію дисплея до системи. Таким чином, ESP32-S3 має достатню кількість апаратних ресурсів для одночасного підключення всіх компонентів без використання додаткових розширювачів портів.

Ще однією перевагою ESP32-S3 є підтримка бездротових технологій Wi-Fi та Bluetooth Low Energy. Хоча передача службових повідомлень між вузлами системи здійснюється через LoRa-мережу, наявність Bluetooth дозволяє реалізувати взаємодію пристрою зі смартфоном користувача через мобільний додаток Meshtastic. Це спрощує налаштування параметрів вузла, перегляд отриманих повідомлень, зміну конфігурації мережі та контроль стану системи без необхідності підключення до комп'ютера. Наявність Wi-Fi також може бути

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використана для оновлення програмного забезпечення або інтеграції з іншими інформаційними системами підприємства.

Для проєктованої системи важливе значення має енергоефективність. ESP32-S3 підтримує декілька режимів зниженого енергоспоживання, включаючи Light Sleep та Deep Sleep. Використання цих режимів дозволяє значно зменшити споживання електроенергії під час періодів неактивності та збільшити тривалість автономної роботи вузлів від акумуляторного живлення. Це особливо актуально для мобільних пристроїв працівників складу, які повинні працювати протягом усієї зміни без необхідності підзаряджання.

2.2.2 Вибір модуля радіо модему LoRa SX1278

Одним із ключових компонентів комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic є радіомодем LoRa SX1278 (див. рис.2.3) [3], який забезпечує бездротову передачу інформації між вузлами мережі. Вибір даного модуля обумовлений необхідністю створення автономної системи зв'язку з великою дальністю дії, низьким енергоспоживанням та можливістю роботи в умовах складської інфраструктури, де використання традиційних бездротових технологій не завжди забезпечує необхідний рівень надійності. Модуль SX1278 виробництва компанії Semtech є одним із найпоширеніших рішень для побудови мереж на основі технології LoRa та широко використовується в системах Інтернету речей, телеметрії, дистанційного моніторингу та автономного обміну даними.

Основною перевагою SX1278 є використання технології LoRa, яка забезпечує передачу даних на значні відстані при низькому рівні споживання електроенергії. На відміну від традиційних бездротових інтерфейсів, таких як Wi-Fi або Bluetooth, технологія LoRa орієнтована на передачу невеликих пакетів даних із високою завадостійкістю та можливістю роботи в умовах значного ослаблення сигналу. Завдяки використанню методу модуляції Chirp Spread Spectrum забезпечується висока чутливість приймача, що дозволяє

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснювати передачу повідомлень навіть за дуже низького рівня прийнятого сигналу. Це є особливо важливим для складських приміщень, у яких металеві конструкції, стелажі та обладнання можуть створювати суттєві перешкоди для поширення радіохвиль.



Рисунок 2.3 – Радіо модем LoRa SX1278

Модуль SX1278 підтримує роботу в діапазоні частот 433 МГц, який характеризується кращою проникною здатністю радіосигналу через різноманітні перешкоди порівняно з вищими частотними діапазонами. Для умов складського комплексу це є важливою перевагою, оскільки сигнал на частоті 433 МГц ефективніше проходить крізь металеві конструкції, стіни та інші елементи будівельної інфраструктури. Використання цього діапазону дозволяє забезпечити стабільний зв'язок між вузлами мережі навіть у складних умовах експлуатації та підвищує загальну надійність системи обміну даними.

Ще однією важливою перевагою SX1278 є висока чутливість приймача, яка може досягати значень близько -148 дБм залежно від параметрів налаштування каналу зв'язку. Завдяки цьому система здатна приймати сигнали навіть за значного ослаблення радіохвиль та працювати на значних відстанях без необхідності використання потужних передавачів. Максимальна вихідна потужність передавача модуля становить до 20 дБм, що забезпечує достатню дальність зв'язку для побудови локальних mesh-мереж на території складських комплексів, логістичних центрів або виробничих підприємств.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для інтеграції з мікроконтролером ESP32-S3 модуль SX1278 використовує стандартний інтерфейс SPI, який забезпечує високошвидкісний обмін даними та простоту підключення. Взаємодія між мікроконтролером і радіомодемом здійснюється через набір керуючих регістрів, що дозволяє програмно налаштовувати частоту передачі, швидкість обміну даними, коефіцієнт розширення спектра, смугу пропускання каналу, потужність передавача та інші параметри роботи радіосистеми. Така гнучкість налаштування дозволяє адаптувати характеристики зв'язку до конкретних умов експлуатації та вимог проєктованої системи.

Однією з ключових вимог до системи обміну даними є забезпечення автономної роботи від акумуляторного живлення. У цьому аспекті SX1278 має суттєві переваги завдяки низькому енергоспоживанню. У режимі очікування модуль споживає незначний струм, а під час передачі даних споживання залишається значно меншим порівняно з модулями Wi-Fi або стільникового зв'язку. Це дозволяє використовувати пристрої протягом тривалого часу без підзаряджання та забезпечує ефективну роботу мобільних вузлів працівників складу.

Важливим аргументом на користь використання SX1278 є його сумісність із платформою Meshtastic. Програмне забезпечення Meshtastic підтримує роботу з радіомодулями сімейства SX127x та забезпечує реалізацію алгоритмів mesh-маршрутизації, ретрансляції повідомлень, шифрування даних та автоматичного формування мережі. Завдяки цьому значно спрощується розробка програмного забезпечення системи та скорочується час створення прототипу. Використання готової платформи дозволяє зосередитися на розробці прикладних функцій системи обміну даними для працівників складів без необхідності реалізації низькорівневих протоколів зв'язку.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.3 Вибір GPS модуля Foxeer m10q 180 v1

Для реалізації функцій визначення місцезнаходження користувачів у комп'ютерній системі обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic було обрано GPS-модуль Foxeer M10Q-180 V1 (див. рис.2.4). Вибір даного навігаційного модуля обумовлений його високою точністю позиціонування, швидким визначенням координат, низьким енергоспоживанням та повною сумісністю з мікроконтролерними платформами сімейства ESP32. Використання GPS-модуля дозволяє реалізувати функції визначення поточного місцезнаходження мобільних вузлів мережі, передачу координат через LoRa-мережу та моніторинг переміщення персоналу або транспортних засобів на території складського комплексу.

Основою GPS-модуля Foxeer M10Q-180 V1 є сучасний навігаційний чипсет u-blox серії M10, який належить до нового покоління супутникових приймачів із підвищеною чутливістю та покращеними характеристиками точності позиціонування. На відміну від попередніх поколінь навігаційних модулів, серія M10 забезпечує одночасну роботу з декількома глобальними супутниковими навігаційними системами, серед яких GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Використання багатосистемного позиціонування дозволяє значно збільшити кількість доступних супутників, скоротити час визначення координат та підвищити точність роботи навіть у складних умовах прийому сигналів.



Рисунок 2.4 – GPS модуль Foxeer m10q 180 v1

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з основних переваг модуля Foxeer M10Q-180 V1 є висока чутливість приймача. Завдяки використанню сучасного навігаційного процесора модуль здатний стабільно приймати сигнали супутників навіть за наявності часткових перешкод або несприятливих умов поширення радіохвиль. Це особливо важливо для складських комплексів, де значна частина території може бути оточена металевими конструкціями, транспортними засобами та іншими об'єктами, які можуть впливати на якість прийому навігаційного сигналу. Висока чутливість приймача дозволяє підтримувати стабільне визначення координат навіть при частковому перекритті огляду неба.

Важливим критерієм вибору модуля є його точність. За сприятливих умов експлуатації Foxeer M10Q-180 V1 забезпечує визначення координат з похибкою в межах кількох метрів, що є цілком достатнім для задач моніторингу персоналу та транспортних засобів на території складського комплексу. Такий рівень точності дозволяє визначати розташування користувачів у різних зонах підприємства, контролювати виконання маршрутів та забезпечувати додатковий рівень безпеки під час виконання виробничих операцій.

Ще однією перевагою навігаційного модуля є висока швидкість отримання координат після ввімкнення живлення. Завдяки вдосконаленим алгоритмам обробки навігаційних сигналів та швидкому пошуку супутників час першого визначення координат значно скорочується порівняно з більш ранніми моделями GPS-приймачів. Це дозволяє оперативно вводити пристрій у робочий режим та швидко отримувати актуальну інформацію про місцезнаходження користувача.

Для інтеграції з мікроконтролером ESP32-S3 модуль Foxeer M10Q-180 V1 використовує стандартний інтерфейс UART. Такий спосіб підключення характеризується простотою реалізації та мінімальними вимогами до апаратних ресурсів мікроконтролера. Навігаційні дані передаються у вигляді стандартних повідомлень формату NMEA, які містять інформацію про координати, висоту

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

над рівнем моря, швидкість переміщення, кількість видимих супутників, точний час та інші параметри. Отримані дані можуть оброблятися програмним забезпеченням на базі ESP32 та використовуватися для формування інформаційних повідомлень у мережі Meshtastic.

2.2.4 Вибір екрану OLED SSD1306

Для відображення службової інформації в комп'ютерній системі обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic було обрано OLED-дисплей SSD1306 (див. рис.2.5). Вибір даного дисплея обумовлений його компактними розмірами, низьким енергоспоживанням, простотою підключення та широкою підтримкою в середовищах розробки для мікроконтролерів сімейства ESP32. Використання OLED-дисплея дозволяє забезпечити локальне відображення інформації про роботу вузла без необхідності постійного підключення до смартфона або персонального комп'ютера.

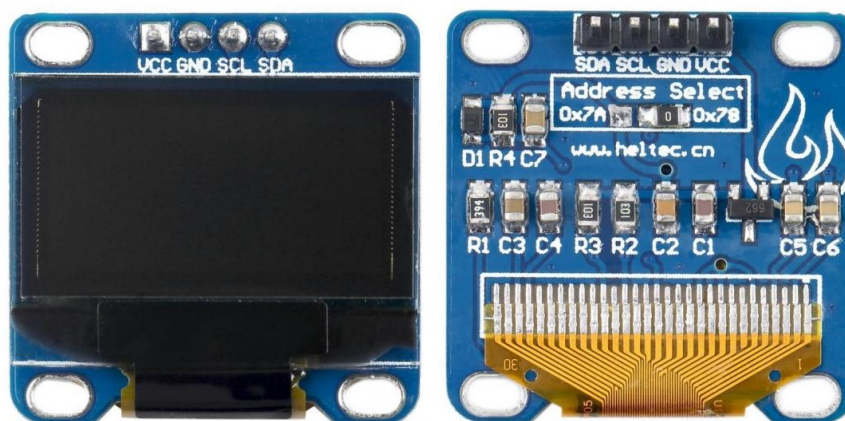


Рисунок 2.5 – Екран OLED SSD1306

Дисплей SSD1306 має роздільну здатність 128×64 пікселі, що є достатнім для відображення текстових повідомлень, координат GPS, рівня сигналу LoRa, стану мережі, рівня заряду акумулятора та інших службових параметрів системи. Завдяки використанню OLED-технології кожен піксель випромінює світло самостійно, що забезпечує високу контрастність зображення та добру

читабельність інформації навіть за різних умов освітлення. Відсутність підсвічування додатково сприяє зниженню енергоспоживання пристрою.

Перевагою SSD1306 є використання інтерфейсу I²C, який потребує лише двох сигнальних ліній для підключення до мікроконтролера ESP32-S3. Це спрощує апаратну реалізацію пристрою та дозволяє залишити достатню кількість виводів для підключення LoRa-модуля SX1278, GPS-приймача та інших периферійних компонентів. Для даного дисплея існує велика кількість готових програмних бібліотек, що значно спрощує розробку програмного забезпечення та створення інтерфейсу користувача.

У проєктованій системі дисплей SSD1306 використовується для відображення ідентифікатора вузла, поточного часу, координат місцезнаходження, рівня сигналу LoRa, кількості активних вузлів мережі, інформації про отримані повідомлення та стану роботи пристрою. Це дозволяє працівнику складу оперативно отримувати необхідну інформацію без використання додаткових засобів відображення даних. Таким чином, OLED-дисплей SSD1306 є оптимальним рішенням для реалізації локального інтерфейсу користувача в комп'ютерній системі обміну даними на базі платформи Meshtastic завдяки своїй компактності, енергоефективності, простоті інтеграції та достатнім функціональним можливостям.

2.3 Опис шин, протоколів, які використовуються в проєкті.

2.3.1 Алгоритмічна організація протоколу Meshtastic

Принцип роботи протоколу Meshtastic базується на використанні технології LoRa та mesh-маршрутизації для передачі повідомлень між вузлами мережі. Після увімкнення пристрою на базі ESP32 мікроконтролер ініціалізує LoRa-модуль SX1278, GPS-приймач та інші периферійні компоненти, після чого вузол починає прослуховувати радіоканал і передавати службову інформацію про свою присутність у мережі. Інші вузли, що знаходяться в зоні

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дії радіозв'язку, приймають ці повідомлення та формують список сусідніх пристроїв. Коли користувач створює повідомлення, мікроконтролер формує пакет даних, додає службову інформацію, адресу відправника та отримувача, після чого виконується шифрування повідомлення за алгоритмом AES-256 (див. рис.2.6). Підготовлений пакет передається через радіомодем SX1278 у LoRa-мережу.

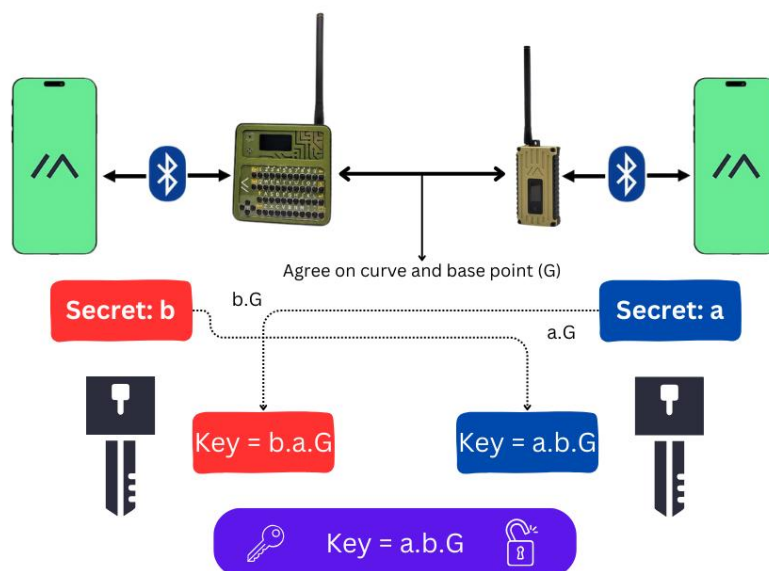


Рисунок 2.6 – Організація протоколу Meshtastic

Основним алгоритмом маршрутизації в Meshtastic є Managed Flood Routing (кероване затоплення). Його суть полягає в тому, що повідомлення не передається по заздалегідь визначеному маршруту, як у класичних мережах, а поширюється мережею через ретрансляцію вузлами. При отриманні пакета вузол аналізує його унікальний ідентифікатор. Якщо пакет отримано вперше, вузол зберігає його в пам'яті та може ретранслювати далі. Якщо пакет уже був оброблений раніше, він відкидається. Це дозволяє уникнути нескінченних циклів передачі. Крім того, кожен пакет містить лічильник переходів (Hop Limit), який обмежує кількість ретрансляцій.

У сучасних версіях Meshtastic використовується вдосконалений механізм керованого затоплення. Вузли не ретранслюють пакет миттєво. Перед повторною передачею вводиться випадкова затримка, величина якої залежить

від якості прийнятого сигналу (SNR). Вузли, які знаходяться далі від джерела сигналу та отримали слабший сигнал, мають меншу затримку та передають повідомлення раніше. Ближчі вузли, які отримали сильний сигнал, чекають довше. Якщо за цей час вони почують уже ретрансльований пакет, повторна передача скасовується. Це суттєво зменшує кількість зайвих передач у мережі.

Починаючи з версії 2.6 для приватних повідомлень використовується алгоритм Next-Hop Routing. Перший пакет доставляється за допомогою Managed Flood Routing. Після успішної доставки вузли запам'ятовують, через який проміжний вузол пакет був доставлений найкраще. Наступні повідомлення передаються вже через цей вузол, а не шляхом повного затоплення мережі. Якщо маршрут стає недоступним, система автоматично повертається до Managed Flood Routing та повторно шукає шлях.

Для вашої роботи цей алгоритм особливо важливий, оскільки дозволяє зменшити навантаження на мережу великого складу.

Кожен вузол Meshtastic періодично передає службові пакети (NodeInfo). Отримуючи їх, пристрій формує список сусідів, які знаходяться в зоні прямої радіовидимості. Для кожного вузла зберігаються:

- ID пристрою;
- рівень RSSI;
- значення SNR;
- час останнього контакту;
- координати GPS.

На основі цих даних будується локальна карта мережі.

Усі повідомлення в Meshtastic передаються в зашифрованому вигляді. Вузли одного каналу використовують спільний криптографічний ключ. Перед передачею повідомлення шифрується, а після отримання розшифровується. Якщо вузол не має відповідного ключа, він може ретранслювати пакет, але не може прочитати його зміст. Це забезпечує конфіденційність службових повідомлень працівників складу.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.2 Принцип роботи протоколу LoRa

Протокол LoRa (Long Range) призначений для бездротової передачі невеликих обсягів даних на значні відстані при мінімальному енергоспоживанні. Принцип його роботи базується на використанні методу модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS), який передбачає передачу інформації за допомогою спеціальних частотних імпульсів зі змінною частотою. На відміну від традиційних радіотехнологій, LoRa забезпечує високу завадостійкість та можливість прийому сигналів навіть за дуже низького рівня потужності, що дозволяє значно збільшити дальність зв'язку. Перед передачею дані, сформовані мікроконтролером, надходять до радіомодуля SX1278, де кодуються та перетворюються у послідовність LoRa-пакетів (див. рис.2.7). Після цього сформований сигнал передається через антену в радіоканал на заданій частоті.

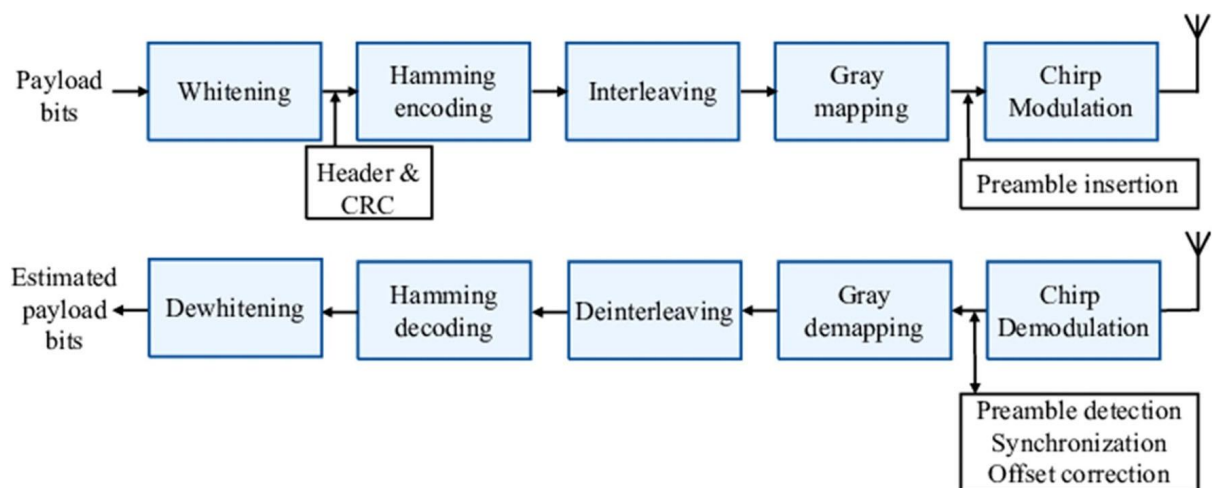


Рисунок 2.7 – Послідовність роботи протоколу LoRa

На приймальній стороні радіомодуль постійно прослуховує ефір та аналізує отримані сигнали. Після виявлення LoRa-пакета виконується його демодуляція, перевірка цілісності даних та декодування інформації. Далі пакет передається до мікроконтролера для подальшої обробки. Для підвищення надійності зв'язку протокол підтримує механізми виправлення помилок, налаштування смуги пропускання каналу, коефіцієнта розширення спектра та

швидкості передачі даних. Зі збільшенням коефіцієнта розширення спектра зростає дальність зв'язку та завадостійкість системи, проте зменшується швидкість передачі інформації.

Технологія LoRa оптимізована для передачі коротких повідомлень, телеметричних даних та координат місцезнаходження, тому широко використовується в системах Інтернету речей, моніторингу та автономного зв'язку. Для проєктованої системи обміну даними між працівниками складів LoRa забезпечує передачу текстових повідомлень, координат GPS та службових даних між вузлами мережі на значних відстанях без використання мобільного зв'язку або мережі Інтернет. Завдяки високій чутливості приймача та низькому енергоспоживанню технологія дозволяє створити надійну та автономну систему зв'язку, здатну функціонувати в умовах складських приміщень із великою кількістю металевих конструкцій та інших перешкод для поширення радіосигналу.

2.4 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи

Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic наведена на рис.2.8.

Алгоритм роботи комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів починається з ініціалізації всіх апаратних модулів пристрою після подачі живлення на мікроконтролер ESP32. На першому етапі запускається послідовний інтерфейс Serial для налагодження роботи системи, після чого ініціалізується шина I²C та OLED-дисплей SSD1306, який використовується для відображення службової інформації. Далі запускається інтерфейс UART для взаємодії з GPS-модулем, а також шина SPI, через яку здійснюється керування LoRa-модулем SX1278. Після успішної ініціалізації радіомодуля встановлюються його робочі параметри, зокрема частота передачі, потужність передавача, ширина смуги пропускання та коефіцієнт розширення спектра.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наступним кроком виконується запуск Bluetooth Low Energy-сервера, створення необхідних сервісів і характеристик для обміну даними з планшетом або смартфоном. Після завершення всіх процедур налаштування на OLED-дисплей виводиться повідомлення про готовність системи до роботи, після чого програма переходить до основного циклу виконання.

У процесі роботи програма безперервно виконує декілька взаємопов'язаних завдань. Насамперед здійснюється перевірка наявності вхідних LoRa-пакетів. Якщо радіомодуль SX1278 прийняв нове повідомлення, воно зчитується з буфера приймача та передається на обробку. Під час обробки виконується аналіз структури пакета, перевірка його унікального ідентифікатора та визначення того, чи не був цей пакет отриманий раніше. Якщо пакет уже міститься в локальному кеші повідомлень, він вважається дублем і відкидається. Якщо пакет є новим, програма виділяє з нього службову інформацію та корисні дані, після чого оновлює інформацію на OLED-дисплеї та, за наявності активного Bluetooth-з'єднання, передає повідомлення на підключений планшет або смартфон.

Після обробки нового пакета система перевіряє значення лічильника переходів між вузлами мережі. Якщо кількість дозволених ретрансляцій ще не вичерпана, значення лічильника зменшується на одиницю, після чого пакет повторно передається через LoRa-модуль іншим вузлам мережі. Для зменшення ймовірності одночасної передачі однакових повідомлень різними вузлами перед ретрансляцією використовується невелика випадкова затримка. Завдяки такому механізму реалізується принцип роботи mesh-мережі, коли кожен вузол може виконувати функції ретранслятора та збільшувати зону покриття системи.

Паралельно з обробкою LoRa-повідомлень програма здійснює моніторинг даних GPS-модуля. Через інтерфейс UART постійно приймаються навігаційні повідомлення, які обробляються бібліотекою TinyGPSPlus. Після отримання коректних координат система оновлює значення широти та довготи, які зберігаються у внутрішній пам'яті мікроконтролера.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

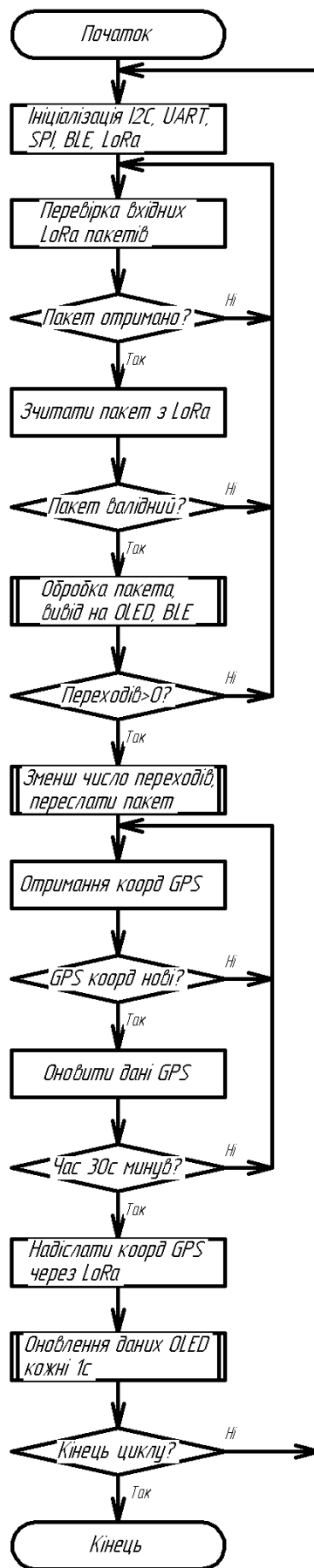


Рисунок 2.8 – Блок схема алгоритму роботи комп’ютерної системи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Через встановлений проміжок часу, який у даному алгоритмі становить тридцять секунд, координати автоматично передаються до мережі у вигляді спеціального GPS-повідомлення. Це дозволяє іншим вузлам або диспетчерському центру відстежувати місцезнаходження працівників складу, транспортних засобів або обладнання.

Окремою складовою алгоритму є взаємодія з планшетом або смартфоном через Bluetooth Low Energy. Після встановлення з'єднання користувач може надсилати текстові повідомлення через мобільний додаток. Отримані через Bluetooth дані надходять до ESP32, після чого автоматично формуються у LoRa-пакет і передаються в mesh-мережу.

Таким чином планшет виконує функцію інтерфейсу введення інформації, а мікроконтролер забезпечує її доставку іншим вузлам системи. Якщо Bluetooth-клієнт залишається підключеним, усі нові повідомлення, отримані з мережі LoRa, автоматично пересилаються на мобільний пристрій користувача.

Після виконання операцій прийому повідомлень, обробки GPS-даних та обміну інформацією через Bluetooth здійснюється оновлення OLED-дисплея. На екран виводиться службова інформація про стан вузла, його ідентифікатор, поточні координати GPS, частота роботи LoRa-модуля та останнє отримане або передане повідомлення. Після завершення всіх зазначених операцій програма повертається на початок основного циклу та повторює його безперервно протягом усього часу роботи пристрою.

2.5 UML-діаграма станів

UML-діаграма (див. рис.2.9) станів відображає послідовність зміни станів вузла комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів, побудованої на базі мікроконтролера ESP32, радіомодуля LoRa SX1278, GPS-приймача, OLED-дисплея SSD1306 та Bluetooth-з'єднання. Діаграма демонструє логіку функціонування програмного забезпечення пристрою від

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моменту його ввімкнення до виконання основних робочих функцій під час експлуатації.

Робота системи починається зі стану «Початок роботи», який відповідає моменту подачі живлення на пристрій. Після цього виконується перехід до стану «Ініціалізація системи», у якому послідовно запускаються всі апаратні та програмні модулі вузла. На цьому етапі здійснюється ініціалізація мікроконтролера ESP32, OLED-дисплея SSD1306 через інтерфейс I²C, GPS-модуля через інтерфейс UART, радіомодуля LoRa SX1278 через інтерфейс SPI, а також Bluetooth Low Energy для зв'язку з планшетом або смартфоном. Після успішного запуску всіх компонентів система переходить до стану «Готовність системи», що означає повну готовність вузла до виконання своїх функцій.

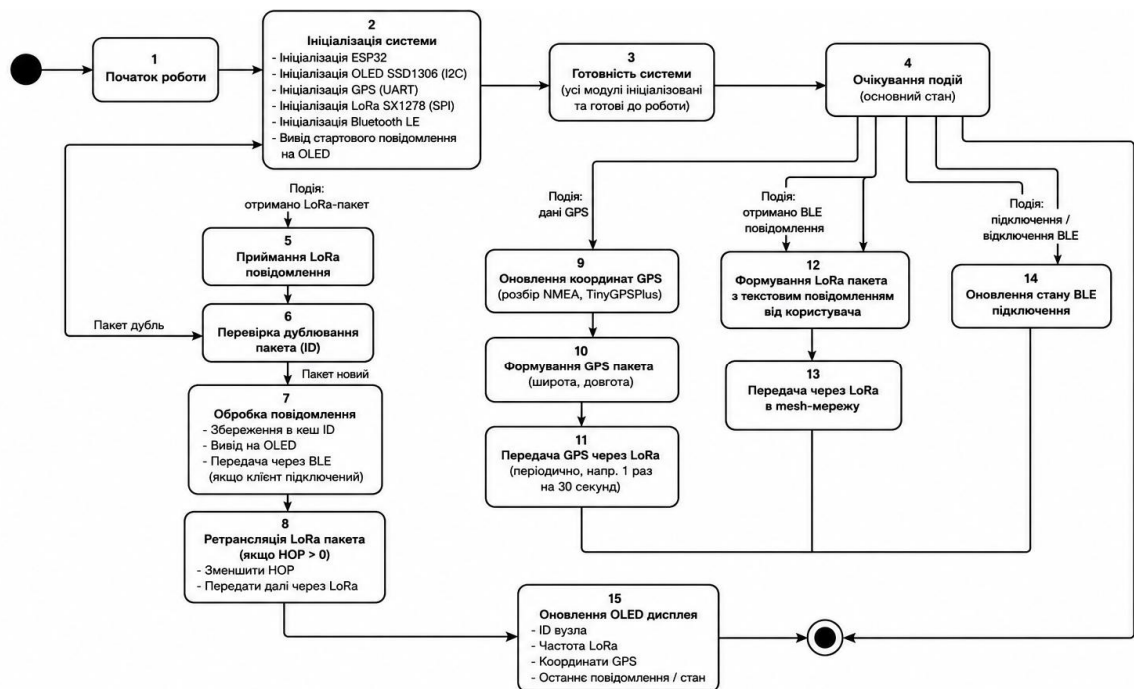


Рисунок 2.9 – UML-діаграма станів

Наступним основним станом є «Очікування подій», у якому пристрій перебуває більшу частину часу. У цьому режимі система безперервно контролює надходження даних від усіх підключених модулів та очікує на

виникнення подій. З цього стану можливі декілька напрямків переходів залежно від джерела отриманої інформації.

Якщо через радіомодуль SX1278 надходить LoRa-повідомлення, система переходить до стану «Приймання LoRa-повідомлення». Після отримання пакета виконується стан «Перевірка дублювання пакета», під час якого аналізується унікальний ідентифікатор повідомлення. Якщо пакет уже був отриманий раніше, він вважається дублем і не обробляється повторно. Якщо пакет є новим, система переходить до стану «Обробка повідомлення», де здійснюється його збереження у кеші пакетів, виведення інформації на OLED-дисплей та передача повідомлення через Bluetooth на планшет користувача, якщо встановлено активне з'єднання. Після цього виконується стан «Ретрансляція LoRa-пакета», під час якого повідомлення може бути передане далі іншим вузлам мережі за умови, що значення лічильника переходів ще не досягло нуля. Такий механізм забезпечує функціонування mesh-мережі та дозволяє збільшувати радіус дії системи.

Якщо в основному стані очікування надходять нові дані від GPS-модуля, система переходить до стану «Оновлення координат GPS». На цьому етапі відбувається аналіз NMEA-повідомлень, що надходять від навігаційного приймача, та визначення поточних координат місцезнаходження пристрою. Після успішного визначення координат виконується стан «Формування GPS-пакета», у якому створюється повідомлення, що містить інформацію про широту та довготу. Далі система переходить до стану «Передача GPS через LoRa», де сформований пакет координат надсилається через бездротову мережу іншим вузлам або диспетчерському пристрою.

Ще одним напрямком роботи системи є обмін повідомленнями через Bluetooth. Якщо від планшета або смартфона надходить текстове повідомлення, система переходить до стану «Формування LoRa-пакета з текстовим повідомленням від користувача». На цьому етапі виконується створення пакета для передачі через LoRa-мережу. Після завершення формування повідомлення

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

система переходить до стану «Передача через LoRa в mesh-мережу», де здійснюється його передавання іншим вузлам.

Окремо на діаграмі показано стан «Оновлення стану BLE-підключення». Перехід до цього стану відбувається при підключенні або відключенні планшета чи смартфона через Bluetooth. У цьому режимі система оновлює інформацію про наявність активного клієнта та визначає можливість передачі повідомлень через BLE.

Після завершення будь-якої із зазначених операцій система переходить до стану «Оновлення OLED-дисплея». У цьому стані на екран виводяться поточні службові дані вузла, зокрема його ідентифікатор, частота роботи LoRa-модуля, координати GPS, стан Bluetooth-з'єднання та останнє отримане або передане повідомлення. Після завершення оновлення дисплея виконується повернення до основного стану «Очікування подій», де цикл роботи повторюється.

2.7 UML-діаграма компонентів

UML-діаграма компонентів (див. рис.2.10) відображає архітектуру комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic та демонструє взаємозв'язки між апаратними й програмними компонентами системи. Центральним елементом діаграми є мікроконтролер ESP32, який виконує функції керування всіма периферійними пристроями, обробки даних, реалізації алгоритмів mesh-мережі, взаємодії з користувачем та організації бездротового обміну повідомленнями. Саме через ESP32 здійснюється координація роботи всіх модулів, що входять до складу системи.

До мікроконтролера через інтерфейс SPI підключений LoRa-модуль SX1278, який забезпечує бездротовий обмін даними між вузлами мережі. Через цей модуль передаються текстові повідомлення, координати GPS та службова інформація. SX1278 реалізує фізичний рівень зв'язку та забезпечує роботу

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

mesh-мережі на частоті 433 МГц. Взаємодія між ESP32 та SX1278 здійснюється через спеціалізований програмний компонент LoRa Manager, який відповідає за формування пакетів, їх передачу, приймання та ретрансляцію.

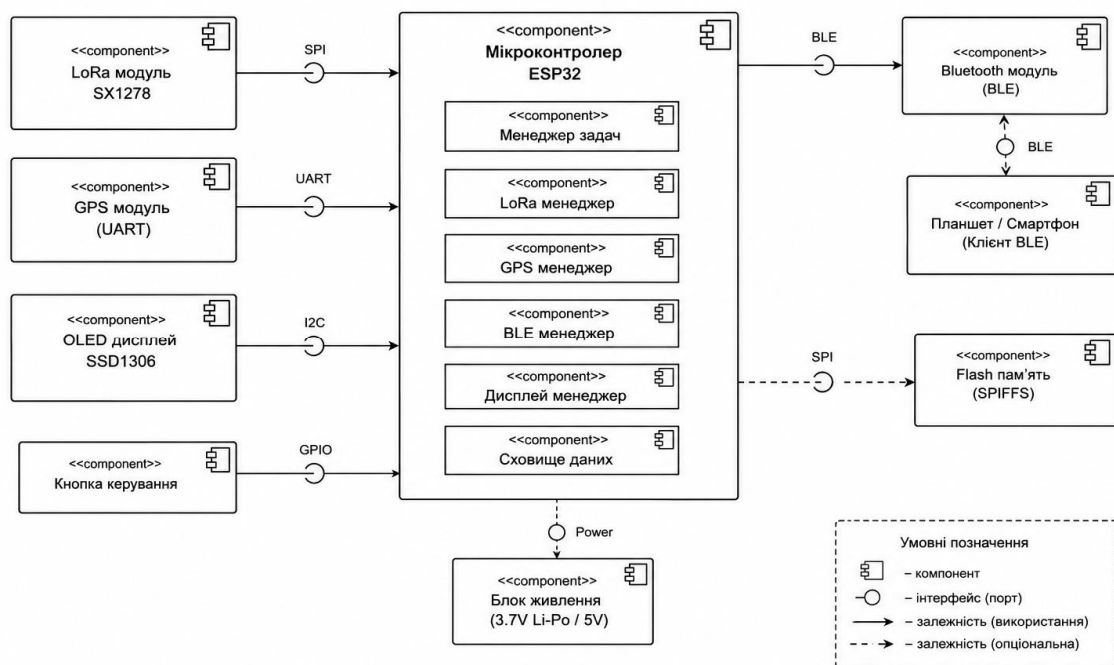


Рисунок 2.10 – UML-діаграма компонентів

GPS-модуль підключений до ESP32 через інтерфейс UART і використовується для визначення поточного місцезнаходження пристрою. Отримані навігаційні дані обробляються програмним компонентом GPS Manager, який аналізує інформацію, що надходить від супутникового приймача, виділяє координати та передає їх іншим програмним модулям системи. Надалі координати можуть відображатися на екрані або передаватися через LoRa-мережу іншим вузлам.

Для відображення службової інформації використовується OLED-дисплей SSD1306, який підключений до ESP32 через інтерфейс I²C. Роботу дисплея забезпечує програмний компонент Display Manager. Він відповідає за формування екранних сторінок, виведення координат GPS, повідомлень користувача, стану LoRa-з'єднання, інформації про Bluetooth та інших

параметрів роботи системи. Завдяки цьому користувач може безпосередньо контролювати стан вузла без використання додаткових пристроїв.

Окремим компонентом системи є Bluetooth Low Energy-модуль, який реалізується апаратними можливостями самого ESP32. Для його роботи використовується програмний компонент BLE Manager. Він забезпечує зв'язок між вузлом та планшетом або смартфоном користувача. Через Bluetooth здійснюється введення повідомлень, налаштування параметрів вузла та отримання інформації про роботу системи. Планшет або смартфон у даній архітектурі виступає зовнішнім клієнтом BLE та використовується як інтерфейс взаємодії користувача з мережею.

У середині мікроконтролера виділено компонент Task Manager, який виконує функції координатора всієї системи. Він керує послідовністю виконання завдань, розподіляє ресурси між окремими підсистемами та забезпечує коректну взаємодію між програмними компонентами. Саме цей модуль відповідає за циклічне виконання основного алгоритму роботи пристрою.

Для зберігання службової інформації, налаштувань мережі, ідентифікаторів пакетів та інших даних використовується компонент Data Storage. Він взаємодіє із зовнішньою або внутрішньою Flash-пам'яттю через відповідний інтерфейс доступу до даних. Завдяки цьому після перезавантаження пристрою можуть зберігатися необхідні параметри конфігурації та службова інформація.

У нижній частині діаграми розташований блок живлення, який забезпечує енергопостачання всіх компонентів системи. Як джерело живлення може використовуватися літій-полімерний акумулятор напругою 3,7 В або зовнішнє джерело живлення 5 В. Через цей компонент електрична енергія подається на ESP32 та всі підключені периферійні модулі.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Опис коду програми роботи системи

Детальне пояснення коду по основних частинах що реалізують роботу комп'ютерної системи контролю якості зберігання зерна в елеваторі наведено нижче.

На початку програми підключаються бібліотеки, необхідні для роботи всіх апаратних модулів системи.

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <TinyGPSPlus.h>

#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLE2902.h>
```

Рисунок 3.1 – Лістинг команд підключення бібліотек

Бібліотека SPI використовується для організації обміну даними між мікроконтролером ESP32 та радіомодулем SX1278. Бібліотека LoRa забезпечує високорівневі функції для передачі та приймання пакетів через LoRa. Бібліотеки Wire, Adafruit_GFX та Adafruit_SSD1306 використовуються для керування OLED-дисплеєм SSD1306 через інтерфейс I²C. Бібліотека TinyGPSPlus відповідає за обробку координат, які надходять від GPS-модуля. Комплект бібліотек BLE реалізує Bluetooth Low Energy-з'єднання з планшетом або смартфоном.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Борох М. В.			Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Пояснююча записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Лецишин Ю.З.								45	64
Н. Контр.		Луцик Н.С.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41			
Затверд.		Осухівська Г.М.									

Для підключення радіомодема визначаються піни інтерфейсу SPI та робоча частота.

```
#define LORA_SCK      5
#define LORA_MISO     19
#define LORA_MOSI     27
#define LORA_SS       18
#define LORA_RST       14
#define LORA_DIO0      26

#define LORA_FREQ     433E6
```

Рисунок 3.2 – Лістинг команд підключення радіомодема

Тут визначаються контакти шини SPI, через яку ESP32 взаємодіє з SX1278. Частота 433 МГц відповідає робочому діапазону обраного радіомодуля. Пін DIO0 використовується для сигналізації про завершення приймання або передачі пакета.

Для роботи дисплея задаються параметри інтерфейсу I²C та роздільна здатність екрана.

```
#define OLED_SDA      21
#define OLED_SCL      22

#define SCREEN_WIDTH  128
#define SCREEN_HEIGHT 64
```

OLED SSD1306 працює через двопровідний інтерфейс I²C. Роздільна здатність 128×64 пікселі дозволяє виводити текстову інформацію про стан вузла, GPS-координати та отримані повідомлення.

Для приймання навігаційних даних використовується окремий UART-порт.

```
#define GPS_RX        16
#define GPS_TX        17
#define GPS_BAUD      9600
```

GPS-модуль передає інформацію у форматі NMEA зі швидкістю 9600 бод. Через інтерфейс UART координати надходять до ESP32 для подальшої обробки.

Після оголошення параметрів створюються об'єкти для обладнання.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
Adafruit_SSD1306 display(
    SCREEN_WIDTH,
    SCREEN_HEIGHT,
    &Wire,
    -1
);

TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial GPSserial(1);
```

Рисунок 3.3 – Лістинг команд створення об'єктів для обладнання

Об'єкт `display` відповідає за керування OLED-дисплеєм. Об'єкт `gps` виконує розбір GPS-повідомлень. Об'єкт `GPSserial` створює додатковий UART-порт для GPS-модуля.

Для кожного пристрою задається унікальний ідентифікатор.

```
String nodeID = "NODE_01";
```

Ідентифікатор використовується для визначення джерела повідомлення в мережі. У реальній системі кожен працівник або транспортний засіб повинен мати власний ID.

Перед передаванням формується пакет спеціального формату.

```
String createPacket(String type, String payload)
{
    String packetID =
        String(random(100000, 999999));

    return packetID + "|" +
        nodeID + "|" +
        String(HOP_LIMIT) + "|" +
        type + "|" +
        payload;
}
```

Рисунок 3.4 – Лістинг команд пакету спеціального формату

Функція створює унікальний номер пакета, додає ID вузла, лічильник переходів, тип повідомлення та корисні дані. Така структура дозволяє легко обробляти пакет на приймальній стороні.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передавання здійснюється за допомогою функції sendLoRaPacket().

```
LoRa.beginPacket();  
LoRa.print(packet);  
LoRa.endPacket();
```

Після формування пакета він записується у буфер SX1278 та передається через радіоканал. Передавання може виконуватись як для текстових повідомлень, так і для координат GPS.

Для mesh-мережі важливо уникати багаторазової обробки одного пакета.

```
String packetCache[CACHE_SIZE];  
  
bool isDuplicate(String packetID)  
{  
    for(int i=0;i<CACHE_SIZE;i++)  
    {  
        if(packetCache[i]==packetID)  
            return true;  
    }  
  
    packetCache[cacheIndex]=packetID;  
    cacheIndex=(cacheIndex+1)%CACHE_SIZE;  
  
    return false;  
}
```

Рисунок 3.5 – Лістинг команд уникнення багаторазової обробки одного пакета

Функція перевіряє, чи був пакет уже отриманий раніше. Якщо пакет присутній у кеші, він відкидається. Це запобігає нескінченному поширенню повідомлень мережею. Основою mesh-мережі є ретрансляція повідомлень.

```
if(hops > 0)  
{  
    hops--;  
  
    LoRa.beginPacket();  
    LoRa.print(newPacket);  
    LoRa.endPacket();  
}
```

Рисунок 3.6 – Лістинг команд ретрансляції повідомлень

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після отримання нового пакета вузол зменшує значення лічильника переходів і передає повідомлення далі. Завдяки цьому повідомлення можуть проходити через декілька вузлів і досягати віддалених користувачів.

Перевірка наявності нових пакетів виконується постійно.

```
int packetSize = LoRa.parsePacket();

if(packetSize)
{
    String packet="";

    while(LoRa.available())
    {
        packet += (char)LoRa.read();
    }

    processReceivedPacket(packet);
}
```

Рисунок 3.7 – Лістинг команд перевірки наявності нових пакетів

Функція аналізує буфер SX1278. Якщо пакет отримано, його вміст зчитується та передається на подальшу обробку.

Координати постійно зчитуються з GPS-модуля.

```
while(GPSserial.available())
{
    gps.encode(GPSserial.read());
}
```

Бібліотека TinyGPSPlus аналізує потік NMEA-повідомлень і виділяє широту та довготу.

```
if(gps.location.isValid())
{
    lastGps =
        String(gps.location.lat(), 6)
        + ", " +
        String(gps.location.lng(), 6);
}
```

Рисунок 3.8 – Лістинг команд аналізує потоку NMEA-повідомлень

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані координати зберігаються у змінній lastGps і можуть бути передані через LoRa або відображені на дисплеї.

Один раз на 30 секунд координати надсилаються в мережу.

```
if(millis() - lastGpsSend > 30000)
{
    sendLoRaPacket(
        "GPS",
        lastGps
    );
}
```

Таким чином інші вузли мережі можуть відстежувати місцезнаходження працівників або техніки.

Інформація про роботу вузла постійно відображається на екрані.

```
display.setCursor(0,0);
display.println("Warehouse Mesh Node");

display.setCursor(0,12);
display.print("ID: ");
display.println(nodeID);
```

Рисунок 3.9 – Лістинг команд відображення даних на екрані

На дисплей виводяться назва пристрою та його ідентифікатор.

```
display.setCursor(0,36);
display.print("GPS: ");
display.println(lastGps);
```

Також користувач бачить поточні GPS-координати.

```
display.setCursor(0,48);
display.println(
    lastMessage.substring(0,21)
);
```

Рисунок 3.10 – Лістинг команд відстеження GPS-координати

Нижній рядок використовується для відображення останнього прийнятого або переданого повідомлення.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У функції setup() запускаються всі апаратні модулі.

```
Wire.begin(  
    OLED_SDA,  
    OLED_SCL  
);
```

Запускається інтерфейс I²C для OLED-дисплея.

```
GPSserial.begin(  
    GPS_BAUD,  
    SERIAL_8N1,  
    GPS_RX,  
    GPS_TX  
);
```

Запускається UART для GPS-модуля.

```
SPI.begin(  
    LORA_SCK,  
    LORA_MISO,  
    LORA_MOSI,  
    LORA_SS  
);
```

Ініціалізується шина SPI для SX1278.

```
LoRa.begin(LORA_FREQ);
```

Запускається радіомодем на частоті 433 МГц.

Основна логіка системи реалізована у функції loop().

```
void loop()  
{  
    checkLoRaReceive();  
  
    updateGPS();  
  
    updateDisplay();  
}
```

Рисунок 3.11 – Лістинг команд основного циклу

У кожному циклі програма перевіряє наявність нових LoRa-повідомлень, оновлює GPS-координати та оновлює інформацію на OLED-дисплеї. Завдяки цьому вузол постійно підтримує зв'язок з іншими пристроями мережі,

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображає свій стан та передає інформацію про місцезнаходження користувача.

3.2 Налаштування мережі Meshtastic

Першим етапом налаштування системи є підготовка апаратної частини. До плати ESP32 підключається модуль LoRa та антена до модуля, яка повинна бути встановлена до першого ввімкнення пристрою для запобігання пошкодженню радіомодуля. За необхідності також підключається Li-Po акумулятор через штатний роз'єм живлення. Після цього плата з'єднується з персональним комп'ютером за допомогою USB-кабелю Type-C. Після підключення операційна система автоматично визначає USB-UART перетворювач плати та створює відповідний COM-порт.

Наступним кроком є завантаження прошивки Meshtastic (див. рис.3.12). Для цього відкривається вебінструмент Meshtastic Web Flasher. У програмі вибирається тип пристрою ESP32 LoRa32, після чого користувач обирає режим встановлення прошивки (див. рис.3.13). Рекомендується виконати повне очищення пам'яті мікроконтролера перед інсталяцією нової версії програмного забезпечення. Далі вибирається COM-порт, до якого підключена плата, та запускається процес запису прошивки у Flash-пам'ять мікроконтролера ESP32. Після завершення запису пристрій автоматично перезавантажується та запускає встановлену систему Meshtastic.

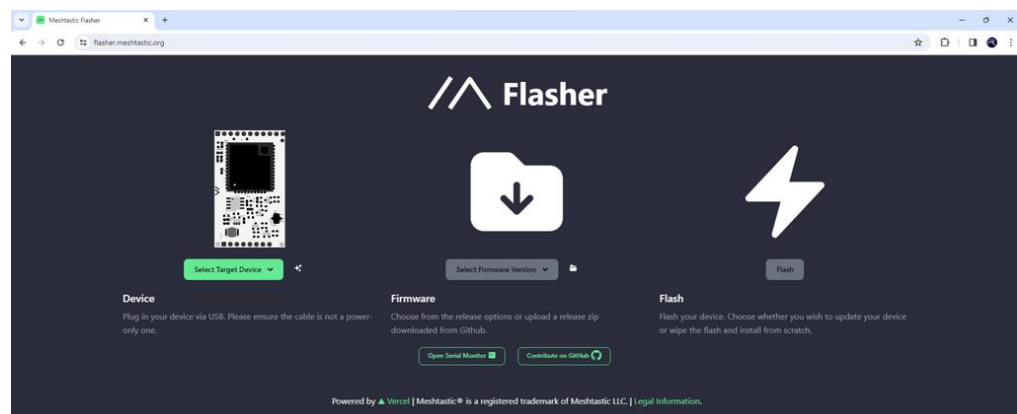


Рисунок 3.12 – Завантаження прошивки Meshtastic

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після першого запуску відбувається автоматична ініціалізація всіх апаратних модулів плати. Meshtastic визначає мікроконтролер ESP32, OLED-дисплей SSD1306, радіомодем SX1278 або SX1276 залежно від модифікації плати, а також Bluetooth-модуль. Після завершення ініціалізації на OLED-дисплеї відображається назва вузла, рівень сигналу, стан батареї та інша службова інформація.

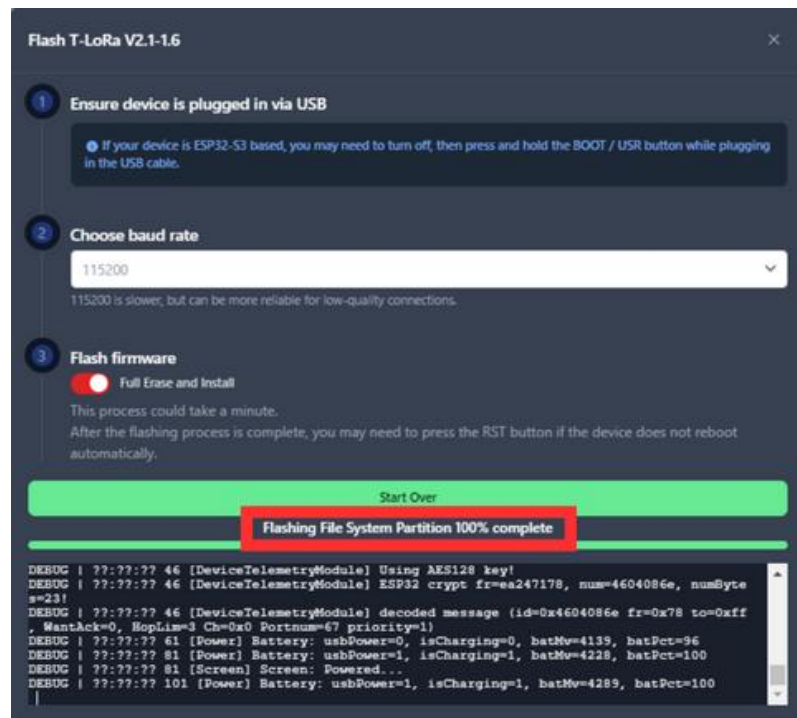


Рисунок 3.13 – Прошивка модуля

Далі виконується підключення до мобільного застосунку Meshtastic(див. рис.3.14). На планшет або смартфон встановлюється офіційний мобільний застосунок Meshtastic. Після запуску застосунку активується Bluetooth, виконується пошук доступних вузлів та вибирається новостворений пристрій. Після успішного сполучення мобільний застосунок отримує доступ до налаштувань вузла та дозволяє керувати його параметрами.

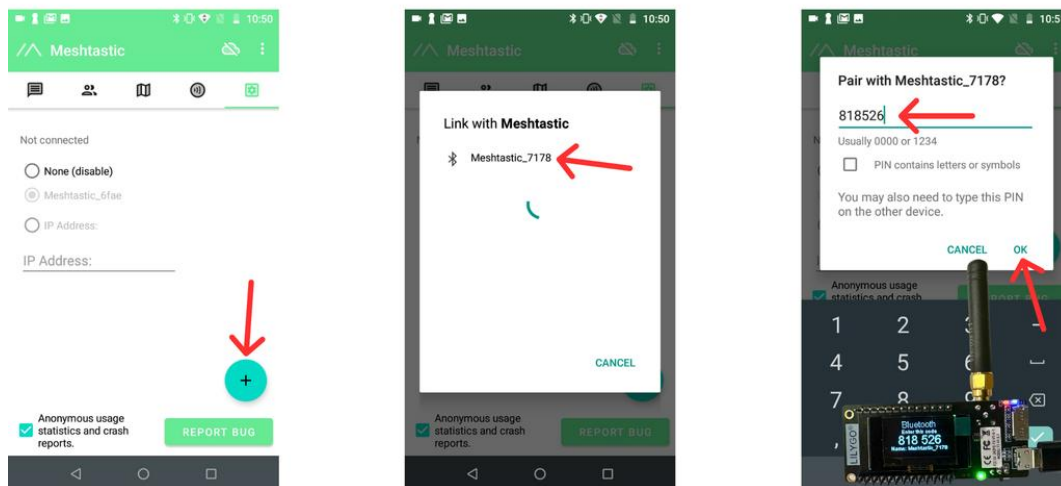


Рисунок 3.14 – Підключення до мобільного застосунку Meshtastic

Наступним етапом є конфігурування радіомережі (див. рис.3.15). У налаштуваннях задається регіон роботи пристрою та параметри LoRa-зв'язку. Для версії плати із SX1278 використовується діапазон 433 МГц. Після вибору регіону автоматично встановлюються допустимі параметри радіоканалу, потужність передавача та інші характеристики зв'язку. Також задається ім'я вузла, яке буде відображатися іншим користувачам мережі.

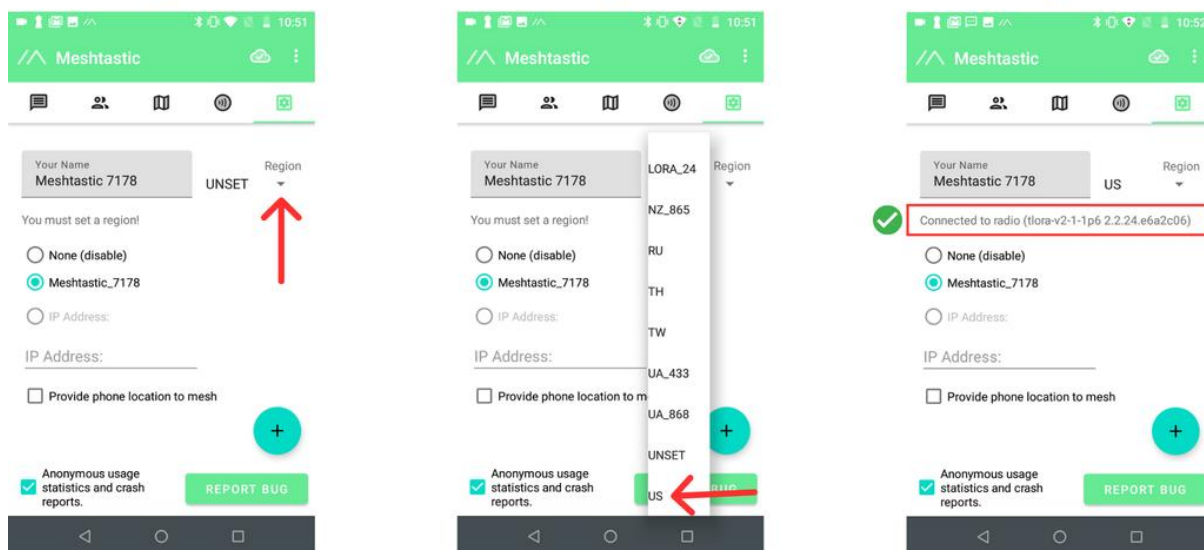


Рисунок 3.15 – Конфігурування радіомережі Meshtastic

Після налаштування радіоканалу виконується створення або вибір каналу зв'язку. Meshtastic автоматично генерує ключ шифрування та параметри

каналу. Усі вузли, які повинні працювати в одній мережі, мають використовувати однаковий канал і спільний ключ шифрування. Це забезпечує можливість обміну повідомленнями лише між авторизованими пристроями мережі.

Після завершення конфігурування вузол починає прослуховувати ефір та передавати службові повідомлення про свою присутність (див. рис.3.16). Інші вузли Meshtastic, які працюють на тому самому каналі та в тому самому частотному діапазоні, автоматично виявляють новий пристрій. У результаті формується mesh-мережа, у якій кожен вузол може передавати повідомлення безпосередньо або через проміжні ретранслятори.

```
from: 2125894122
to: 4294967295
channel: 8
id: 3034765096
hop_limit: 2
hop_start: 3
priority: DEFAULT
relay_node: 121
rx_time: 1772514955
rx_snr: -1.5
rx_rssi: -105
```

Рисунок 3.16 – Дешифрування повного пакету Meshtastic з параметрами передачі даних для перевірки працездатності мережі.

На завершальному етапі виконується перевірка працездатності системи. Через мобільний застосунок надсилається тестове повідомлення, яке передається через LoRa-модуль SX1278 до інших вузлів мережі. Після успішного приймання повідомлення перевіряється коректність роботи дисплея, Bluetooth-з'єднання та радіоканалу. Якщо до системи підключено GPS-модуль, додатково контролюється передавання координат місцезнаходження. Після

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

успішного проходження всіх перевірок вузол вважається готовим до експлуатації у складі комп'ютерної системи обміну даними для працівників складу.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Долікарська допомога при укусах змій, комах, тварин

Укуси змій, комах і тварин належать до поширених небезпечних ситуацій, які можуть становити серйозну загрозу для здоров'я і навіть життя людини. Небезпека таких ушкоджень полягає не лише в механічному пошкодженні тканин, а й у можливішому потраплянні до організму отруйних речовин, інфекційних збудників або розвитку важких алергічних реакцій. Тому своєчасне та правильне надання долікарської допомоги має велике значення для запобігання ускладненням і збереження життя потерпілого.

У разі укусу змії необхідно насамперед забезпечити потерпілому повний спокій, оскільки будь-яка фізична активність прискорює поширення отрути по організму через кровоносну та лімфатичну системи. Потерпілого слід укласти або посадити таким чином, щоб уражена кінцівка перебувала в нерухомому положенні та була розташована нижче рівня серця. З місця укусу потрібно зняти кільця, браслети, годинники та інші предмети, які можуть стискати тканини при розвитку набряку. Рану необхідно обробити антисептиком і накрити стерильною пов'язкою. Для зменшення поширення отрути кінцівку можна зафіксувати шиною або іншими підручними засобами. Потерпілому рекомендується давати достатню кількість води для пиття, якщо він перебуває при свідомості. Категорично забороняється розрізати місце укусу, припікати його, накладати джгут, висмоктувати отруту ротом або вживати алкоголь. Після надання першої допомоги необхідно якомога швидше доставити потерпілого до медичного закладу або викликати швидку медичну допомогу, оскільки лише спеціалізоване лікування може забезпечити ефективну боротьбу з наслідками отруєння.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Борох М. В.			Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Пояснююча записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Лецишин Ю.З.								57	64
Н. Контр.		Луцук Н.С.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41			
Затверд.		Осухівська Г.М.									

Укуси комах, таких як бджоли, оси, джмелі, шершні, комарі або кліщі, також можуть бути небезпечними. Найчастіше вони викликають місцеві реакції у вигляді болю, почервоніння, свербіжу та набряку. У разі укусу бджоли необхідно обережно видалити жало, не стискаючи його пальцями, щоб не видавити залишки отрути в тканини. Після цього місце укусу слід промити водою, обробити антисептиком і прикласти холодний компрес для зменшення набряку та болю. Особливу небезпеку становлять алергічні реакції на укуси комах, які можуть проявлятися генералізованим набряком, утрудненим диханням, різким зниженням артеріального тиску та втратою свідомості. Такий стан називається анафілактичним шоком і потребує негайного виклику швидкої медичної допомоги. До прибуття лікарів потерпілого необхідно покласти в горизонтальне положення, забезпечити доступ свіжого повітря та контролювати його стан.

Особливу увагу слід приділяти укусам кліщів, оскільки вони можуть бути переносниками небезпечних захворювань, зокрема кліщового енцефаліту та бореліозу. Виявленого кліща потрібно обережно видалити за допомогою пінцета або спеціального пристрою, захопивши його якомога ближче до поверхні шкіри та плавно витягуючи без різких рухів. Після видалення місце укусу обробляють антисептиком, а самого кліща за можливості зберігають для лабораторного дослідження. Після укусу необхідно звернутися до лікаря та протягом певного часу спостерігати за станом здоров'я.

Укуси домашніх або диких тварин небезпечні насамперед можливістю інфікування рани та зараження сказом. При укусі тварини необхідно негайно промити рану великою кількістю проточної води з милом протягом не менше 10–15 хвилин. Така процедура дозволяє значно зменшити кількість мікроорганізмів, які потрапили до тканин. Після промивання рану обробляють антисептичними засобами та накладають стерильну пов'язку. Якщо кровотеча незначна, її не рекомендується одразу повністю зупиняти, оскільки разом із кров'ю частково видаляються мікроорганізми. При сильній кровотечі

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовують стандартні методи її зупинки. Після укусу будь-якої невідомої або підозрілої тварини необхідно обов'язково звернутися до медичного закладу для проведення профілактики сказу та інших можливих інфекційних захворювань.

У всіх випадках укусів змій, комах або тварин важливо уважно спостерігати за станом потерпілого, контролювати його свідомість, дихання та пульс. При появі ознак погіршення стану, втрати свідомості або зупинки дихання необхідно негайно розпочати реанімаційні заходи та викликати екстрену медичну допомогу. Таким чином, долікарська допомога при укусах змій, комах і тварин полягає у швидкому усуненні небезпечних наслідків укусу, запобіганні поширенню отрути чи інфекції, зменшенні болю та набряку, а також у своєчасному зверненні за професійною медичною допомогою. Правильні та своєчасні дії дозволяють значно знизити ризик тяжких ускладнень і сприяють швидшому одужанню потерпілого.

4.2 Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання

Експлуатація виробничого, лабораторного, електротехнічного та іншого обладнання пов'язана з впливом різноманітних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть призвести до травмування працівників, виникнення аварійних ситуацій, пожеж, ураження електричним струмом або пошкодження матеріальних цінностей. Саме тому дотримання заходів з техніки безпеки під час експлуатації обладнання є важливою складовою системи охорони праці на будь-якому підприємстві. Основною метою цих заходів є створення безпечних умов праці, збереження здоров'я працівників і забезпечення безперебійної роботи виробництва.

До роботи з обладнанням допускаються лише особи, які пройшли відповідне навчання, інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами експлуатації конкретного обладнання та мають необхідну кваліфікацію.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Працівник повинен знати будову обладнання, принцип його роботи, можливі небезпеки під час експлуатації та порядок дій у разі виникнення несправностей або аварійних ситуацій. Особи, які не мають відповідного допуску або не пройшли інструктаж, не повинні працювати з виробничим обладнанням.

Перед початком роботи необхідно ретельно оглянути обладнання та переконатися в його справності. Особливу увагу слід звернути на стан електропроводки, захисних кожухів, огорожень рухомих частин, блокувальних пристроїв, заземлення та органів керування. Необхідно переконатися, що всі механізми працюють нормально, відсутні сторонні шуми, вібрації, пошкодження корпусу або витіки мастильних матеріалів. У разі виявлення несправностей роботу розпочинати забороняється до повного усунення недоліків.

Під час роботи обладнання необхідно суворо дотримуватися вимог інструкції з експлуатації та встановленого технологічного процесу. Забороняється перевищувати допустимі режими роботи, використовувати обладнання не за призначенням або самовільно змінювати його конструкцію. Працівник повинен постійно контролювати роботу механізмів та своєчасно реагувати на появу ознак несправності. Особливу небезпеку становлять рухомі частини машин і механізмів, тому забороняється торкатися їх під час роботи, проводити очищення, регулювання або ремонт до повної зупинки обладнання та відключення його від джерел живлення.

Важливим заходом безпеки є використання засобів індивідуального захисту. Залежно від характеру виконуваних робіт працівники повинні використовувати захисний одяг, рукавиці, окуляри, щитки, каски, респіратори або навушники. Спецодяг має бути справним, застібнутим і не мати звисаючих частин, які можуть потрапити в рухомі механізми. Довге волосся необхідно прибирати під головний убір, а прикраси та інші сторонні предмети знімати перед початком роботи.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливу увагу необхідно приділяти електробезпеці. Електрообладнання повинно мати справне заземлення або занулення, а всі електричні з'єднання мають відповідати встановленим нормам. Забороняється працювати з пошкодженими кабелями, торкатися струмопровідних частин мокрими руками або використовувати несправні електроприлади. У разі виявлення запаху горілої ізоляції, іскріння, перегріву чи інших ознак несправності необхідно негайно відключити обладнання від мережі та повідомити відповідальну особу.

Не менш важливим є дотримання правил пожежної безпеки. У виробничих приміщеннях повинні бути справні засоби пожежогасіння, вільні евакуаційні виходи та відповідні інформаційні знаки. Забороняється зберігати легкозаймисті речовини поблизу джерел тепла або працюючого обладнання. Працівники повинні знати місце розташування вогнегасників та порядок дій у разі виникнення пожежі.

Під час проведення технічного обслуговування або ремонту обладнання необхідно повністю відключити його від джерел живлення, вивісити попереджувальні таблички та вжити заходів щодо запобігання випадковому ввімкненню. Роботи з ремонту повинні виконувати лише спеціально підготовлені працівники з дотриманням усіх вимог охорони праці.

Після закінчення роботи обладнання необхідно вимкнути згідно з установленим порядком, очистити від пилу, відходів виробництва та забруднень, перевірити його стан і привести робоче місце до належного порядку. Про всі виявлені несправності або порушення в роботі слід повідомити керівника або відповідального за експлуатацію обладнання.

Таким чином, заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання включають правильну організацію робочого місця, перевірку справності технічних засобів, дотримання технологічної дисципліни, використання засобів індивідуального захисту, забезпечення електричної та пожежної безпеки, а також своєчасне технічне обслуговування обладнання. Виконання цих вимог

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє мінімізувати ризик нещасних випадків, забезпечити безпечні умови праці та підвищити ефективність виробничої діяльності.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час виконання роботи було розглянуто принципи функціонування платформи Meshtastic, особливості використання mesh-мереж та технології LoRa, а також проаналізовано можливості їх застосування для забезпечення оперативного обміну інформацією між працівниками складських комплексів. За результатами проведеного аналізу обрано апаратну платформу системи, до складу якої входять мікроконтролер ESP32-S3, радіомодуль LoRa SX1278, GPS-модуль Foxeer M10Q-180 V1 та OLED-дисплей SSD1306. Вибрані компоненти забезпечують необхідну продуктивність, автономність, функціональність та можливість подальшого розширення системи.

У роботі було розроблено структурну схему пристрою, описано принцип роботи системи, алгоритм функціонування програмного забезпечення, а також створено UML-діаграми станів і компонентів, які відображають архітектуру та логіку роботи програмно-апаратного комплексу. Особливу увагу приділено організації взаємодії між окремими модулями системи, реалізації передачі повідомлень через LoRa-мережу, використанню Bluetooth для зв'язку з мобільним пристроєм та інтеграції GPS-модуля для визначення координат користувачів.

На основі проведеного проектування було розроблено програмне забезпечення вузла системи, яке забезпечує приймання та передавання повідомлень, ретрансляцію пакетів у mesh-мережі, обробку координат місцезнаходження, відображення службової інформації на OLED-дисплеї та взаємодію з планшетом або смартфоном через Bluetooth Low Energy. Запропонована структура програмного забезпечення дозволяє реалізувати основні функції платформи Meshtastic та забезпечити автономний обмін даними між користувачами.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. . Meshtastic overview. URL: <https://meshtastic.org/docs/overview/> (дата звернення: 08.06.2026).
2. LILYGO TTGO LoRa32 V2.1_1.6 Q211 - User Guide. URL: https://store.rokland.com/pages/lilygo-ttgo-lora32-v2-1_1-6-q211-user-guide?srsId=AfmBOoqdngJzHK2HewuSIl7hTzwuHUwdYBM0HmXyQL9hv2d2gBTb-fyW (дата звернення: 08.06.2026).
3. ESP32-S3-DevKitC-1 v1.1. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s3/esp32-s3-devkitc-1/user_guide_v1.1.html#hardware-reference (дата звернення: 08.06.2026).
4. Meshtastic Documentation. Official Documentation URL: Режим доступу: <https://meshtastic.org/>. (дата звернення: 08.06.2026).
5. Supported Hardware Overview – Meshtastic Documentation URL:Режим доступу: <https://meshtastic.org/docs/hardware/devices/>. (дата звернення: 08.03.2026).
6. Getting Started – Meshtastic Documentation URL: Режим доступу: <https://meshtastic.org/docs/getting-started/>. (дата звернення: 08.06.2026).
7. LoRa Configuration – Meshtastic Documentation URL:Режим доступу: <https://meshtastic.org/docs/configuration/radio/lora/>. (дата звернення: 08.06.2026).
8. LilyGO LoRa32 V2.1_1.6 User Guide URL: Режим доступу: https://store.rokland.com/pages/lilygo-ttgo-lora32-v2-1_1-6-q211-user-guide. (дата звернення: 08.03.2026).
9. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.
10. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

12. Лецишин Ю.З., Романишин Н.Р., Наконечний В.В., Паламарчук А.О. Розробка системи зв'язку як інтегрованого елементу роботизованих систем. Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції. Збірник тез доповідей XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Житомир, 2016. С. 102.

13. Лецишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.

14. Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point. IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.

15. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal. IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P.1-5.

16. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion. 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.

17. Геврик Є.О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

					КС КРБ 123.148.00.00 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А.
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

«Затверджую»

завідувач кафедри КС

_____ **Осухівська Г.М.**

" ____ " _____ 2026 р.

Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі
платформи Meshtastic

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на __5__ листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-41

_____ **к.т.н., доц. Лещишин Ю.З.**

_____ **Борох М. В.**

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р

Тернопіль 2026

1. Назва та підстава для виконання роботи.

1.1. Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic.

1.2. Підставою для виконання кваліфікаційної роботи бакалавра (КРБ) є Наказ по Університету (№ 4/9-188 від 24.04.2026р.).

2. Виконавець.

2.1. Студент групи СІ-41 кафедри КС

Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя
Борох Микола Володимирович.

3. Мета роботи.

3.1. Метою роботи є розробити структуру та програмне забезпечення комп'ютерної системи обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic.

4. Склад виробу.

4.1. До складу вимірювача повинні входити:

- 1) мікроконтролер ESP32;
- 2) OLED-дисплей;
- 3) радіомодем SX1278 або SX1276;
- 4) GPS-приймач;
- 5) джерело живлення;
- 6) комплект документації.

5. Технічні вимоги.

5.1. Вимоги по призначенню.

5.1.1. Комп'ютеризована система повинна мати наступні параметри:

1) Діапазон зв'язку, °МГц	433
2) Алгоритм шифрування,	AES-256
3) Точність визначення координат, не гірше, м	5
4) Дальність зв'язку, не менше, м	2000

5.1.2. Система повинна підтримувати зв'язок з планшетом

5.1.3. Система повинна живитись напругою, В

	3,7±2
--	-------

5.2. Вимоги до умов експлуатації:

5.2.1. Кліматичні умови експлуатації мають відповідати класу ЗКЗ (або ЗК5) згідно з ДСТУ EN 60721-3-3

5.2.2. Температура експлуатації від 0 до +40°C

5.2.3. Відносна вологість до 100% при t=25°C

5.3. Конструктивні вимоги.

5.3.1. Конструювання корпусу приладу в КРБ не передбачено.

5.3.2. Для побудови системи мають бути використані сучасні компоненти з можливістю поверхневого монтажу друкованого вузла.

5.3.3. При побудові системи необхідно передбачити розміщення роз'ємів живлення і обміну даними.

5.3.4. Габаритні розміри при макетуванні, мм, не більше:

довжина	200
ширина	100
висота	100

5.3.5. Маса макету, кг, не більше

	0,3
--	-----

5.3.6. Конструкція макету повинна забезпечувати доступ до всіх комплектуючих виробів при тестуванні.

5.4. Вимоги до надійності.

5.4.1. Система повинна відповідати вимогам ДСТУ 2862-94.

5.4.2. Наробка на відмову, не менше 10000 год.

5.5. Вимоги метрології.

5.5.1. Вимірювання параметрів системи при моделюванні повинно виконуватись на універсальних вимірювальних приладах.

6. Економічні показники.

6.1. Собівартість системи повинна бути не більше 8000 грн.

7. Вимоги до документації.

7.1. Конструкторська документація повинна відповідати вимогам ЄСКД, ДСТУ та ГОСТ.

7.2. До складу документації повинно входити:

- 1) ПЗ
- 2) Структурна схема Е1
- 3) Електрична схема ЕЗ
- 4) UML-діаграми, що пояснюють роботу системи
- 5) Блок схема алгоритму роботи

8. Стадії та етапи розробки КРБ

8.1 Стадії та етапи виконання КРБ наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання	26.01 – 02.02
2	Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»	03.02 – 15.02
3	Робота над другим розділом «ПРОЄКТНА ЧАСТИНА»	20.04 – 25.04
4	Робота над третім розділом «ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА»	26.04 – 05.05
5	Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	07.05 – 25.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	26.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	22.06.26

9. В дане ТЗ можуть вноситись зміни по узгодженню сторін.

Додаток Б

Перелік елементів

Позн.	Найменування	К-сть	Примітка
	<u>Конденсатори</u>		
C1-C2,C4	GRM21BR61C106KE15L	3	
C3	GRM216R71H102KA01D	1	
D1-D2	Діод LED LTST-C191KGKT	2	
BAT1	Батарея Sony 18650 3.6V	1	
J1	Роз'єм 25630301RP2	1	
L1	Індуктивність LQH43CN151K03L	1	
LCD1	Екран SSD1306, 0.96"	1	
R1-R4	Резистор RC0603FR-0710KL	4	
		КС КРБ 123.148.00.00 ПЕ Комп'ютерна система обміну даними для працівників складів на базі платформи Meshtastic Перелік елементів	
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис
Розробив	Борох М.		
Перевірів	Лецишин Ю.		
Рецензент			
Н. контр.	Луцик Н.С.		
Зав. каф.	Осухівська Г.М.		
		Літ	Аркуш
		н	1
		Аркушів	2
		ТНТУ СІ-41 м. Тернопіль	

[illegible]

Додаток В.

Код програми

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <TinyGPSPlus.h>

#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLE2902.h>

// ----- LoRa SX1278 -----
#define LORA_SCK    5
#define LORA_MISO   19
#define LORA_MOSI   27
#define LORA_SS     18
#define LORA_RST    14
#define LORA_DIO0    26
#define LORA_FREQ   433E6

// ----- OLED SSD1306 -----
#define OLED_SDA    21
#define OLED_SCL    22
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64

// ----- GPS -----
#define GPS_RX      16
#define GPS_TX      17
#define GPS_BAUD    9600

// ----- BLE -----
#define BLE_DEVICE_NAME "Warehouse_Mesh_Node"
#define SERVICE_UUID    "6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_RX "6E400002-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"
#define CHARACTERISTIC_TX "6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
-1);
TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial GPSserial(1);

BLECharacteristic *txCharacteristic;
bool bleConnected = false;

String nodeID = "NODE_01";
```

```

String lastMessage = "No messages";
String lastGps = "No GPS";

unsigned long lastGpsSend = 0;
unsigned long lastScreenUpdate = 0;

const int HOP_LIMIT = 3;
const int CACHE_SIZE = 10;
String packetCache[CACHE_SIZE];
int cacheIndex = 0;

class ServerCallbacks : public BLEServerCallbacks {
    void onConnect(BLEServer* server) {
        bleConnected = true;
    }

    void onDisconnect(BLEServer* server) {
        bleConnected = false;
        server->startAdvertising();
    }
};

bool isDuplicate(String packetID) {
    for (int i = 0; i < CACHE_SIZE; i++) {
        if (packetCache[i] == packetID) return true;
    }

    packetCache[cacheIndex] = packetID;
    cacheIndex = (cacheIndex + 1) % CACHE_SIZE;
    return false;
}

String createPacket(String type, String payload) {
    String packetID = String(random(100000, 999999));
    return packetID + "|" + nodeID + "|" + String(HOP_LIMIT) +
    "|" + type + "|" + payload;
}

void sendLoRaPacket(String type, String payload) {
    String packet = createPacket(type, payload);

    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print(packet);
    LoRa.endPacket();

    lastMessage = "TX: " + payload;

    if (bleConnected) {
        txCharacteristic->setValue(("Sent: " + payload).c_str());
        txCharacteristic->notify();
    }
}

void forwardPacket(String packet) {

```

```

int first = packet.indexOf('|');
int second = packet.indexOf('|', first + 1);
int third = packet.indexOf('|', second + 1);

if (first < 0 || second < 0 || third < 0) return;

String packetID = packet.substring(0, first);
String sender = packet.substring(first + 1, second);
int hops = packet.substring(second + 1, third).toInt();

if (sender == nodeID) return;
if (isDuplicate(packetID)) return;

if (hops > 0) {
    hops--;

    String newPacket = packetID + "|" + sender + "|" +
String(hops) + packet.substring(third);

    delay(random(200, 1000));

    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print(newPacket);
    LoRa.endPacket();
}
}

void processReceivedPacket(String packet) {
    int p1 = packet.indexOf('|');
    int p2 = packet.indexOf('|', p1 + 1);
    int p3 = packet.indexOf('|', p2 + 1);
    int p4 = packet.indexOf('|', p3 + 1);

    if (p1 < 0 || p2 < 0 || p3 < 0 || p4 < 0) return;

    String packetID = packet.substring(0, p1);
    String sender = packet.substring(p1 + 1, p2);
    String type = packet.substring(p3 + 1, p4);
    String payload = packet.substring(p4 + 1);

    if (sender == nodeID) return;
    if (isDuplicate(packetID)) return;

    lastMessage = "RX: " + payload;

    if (bleConnected) {
        txCharacteristic->setValue(("From " + sender + ": " +
payload).c_str());
        txCharacteristic->notify();
    }

    forwardPacket(packet);
}

```

```

void checkLoRaReceive() {
    int packetSize = LoRa.parsePacket();

    if (packetSize) {
        String packet = "";

        while (LoRa.available()) {
            packet += (char)LoRa.read();
        }

        processReceivedPacket(packet);
    }
}

class RxCallbacks : public BLECharacteristicCallbacks {
    void onWrite(BLECharacteristic *characteristic) {
        String text = characteristic->getValue().c_str();

        if (text.length() > 0) {
            sendLoRaPacket("MSG", text);
        }
    }
};

void setupBLE() {
    BLEDevice::init(BLE_DEVICE_NAME);

    BLEServer *server = BLEDevice::createServer();
    server->setCallbacks(new ServerCallbacks());

    BLEService *service = server->createService(SERVICE_UUID);

    txCharacteristic = service->createCharacteristic(
        CHARACTERISTIC_TX,
        BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY
    );

    txCharacteristic->addDescriptor(new BLE2902());

    BLECharacteristic *rxCharacteristic = service-
>createCharacteristic(
        CHARACTERISTIC_RX,
        BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE
    );

    rxCharacteristic->setCallbacks(new RxCallbacks());

    service->start();
    server->getAdvertising()->start();
}

void updateGPS() {
    while (GPSSerial.available()) {
        gps.encode(GPSSerial.read());
    }
}

```

```

    }

    if (gps.location.isValid()) {
        lastGps = String(gps.location.lat(), 6) + "," +
String(gps.location.lng(), 6);
    }

    if (millis() - lastGpsSend > 30000 &&
gps.location.isValid()) {
        lastGpsSend = millis();
        sendLoRaPacket("GPS", lastGps);
    }
}

void updateDisplay() {
    if (millis() - lastScreenUpdate < 1000) return;
    lastScreenUpdate = millis();

    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

    display.setCursor(0, 0);
    display.println("Warehouse Mesh Node");

    display.setCursor(0, 12);
    display.print("ID: ");
    display.println(nodeID);

    display.setCursor(0, 24);
    display.print("LoRa: ");
    display.println("433 MHz");

    display.setCursor(0, 36);
    display.print("GPS: ");
    display.println(lastGps);

    display.setCursor(0, 48);
    display.println(lastMessage.substring(0, 21));

    display.display();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    randomSeed(analogRead(0));

    Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);

    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        while (true);
    }

    display.clearDisplay();

```

```

display.setTextSize(1);
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setCursor(0, 0);
display.println("System starting...");
display.display();

GPSserial.begin(GPS_BAUD, SERIAL_8N1, GPS_RX, GPS_TX);

SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_SS);
LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

if (!LoRa.begin(LORA_FREQ)) {
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    display.println("LoRa init failed!");
    display.display();
    while (true);
}

LoRa.setSpreadingFactor(7);
LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
LoRa.setCodingRate4(5);
LoRa.setTxPower(17);

setupBLE();

display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.println("System ready");
display.display();
}

void loop() {
    checkLoRaReceive();
    updateGPS();
    updateDisplay();
}

```