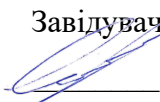


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 16 » 06 _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РІ-п31

Іщенко Євгеній Вячеславович



Керівник:

доцент, к.т.н.

Василенко Дмитро Олексійович



Рецензент:

проф., к.т.н.

Мовчанюк А.В.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _Євгеній Іщенко

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 20 » 04 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Іщенко Євгеній Вячеславович

1. Тема проєкту «Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa», керівник роботи Василенко Дмитро Олексійович, затверджені наказом по університету від «20» Квітня 2026 р. № -

2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: робочий частотний діапазон — 433 МГц; технологія радіозв'язку — LoRa; програмне забезпечення — Meshtastic; мікроконтролерний модуль — XIAO ESP32-C6; LoRa-модуль — RA-02 на базі SX1278; RF-підсилювач — AB-IOT-433; антена — Ground Plane 433 МГц; основне живлення — 5 В; резервне живлення — акумуляторний блок на базі двох Li-Ion елементів 18650; модуль заряджання — TP4056; DC-DC перетворювач — TPS61088; контрольовані параметри — RSSI, SNR, S11, VSWR.

4. Зміст роботи: аналіз призначення автономних радіомережевих вузлів та сценаріїв застосування mesh-мереж; розгляд принципу роботи технології LoRa та особливостей побудови mesh-мереж на її основі; аналіз готових апаратних рішень для Meshtastic; формування вимог до стаціонарного

радіомережевого вузла; обґрунтування вибору частотного діапазону, мікроконтролера, радіомодуля, RF-підсилювача та антени; розроблення структурної та електричної принципової схем; розрахунок параметрів антени, енергоспоживання, автономності та бюджету радіолінії; моделювання і виготовлення Ground Plane антени; експериментальна перевірка працездатності вузла в мережі Meshtastic; розгляд питань охорони праці та техніко-економічна оцінка пристрою.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: структурна схема автономного радіомережевого вузла; схема електрична принципова; перелік елементів; результати моделювання Ground Plane антени; результати вимірювання параметрів антени; фото зібраного пристрою; презентація.

6. Дата видачі завдання 20.04.2026р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та призначення автономних радіомережевих вузлів	20.04.26 – 27.04.26	Виконано
2	Розгляд технології LoRa, mesh-мереж та готових рішень для Meshtastic	27.04.26 – 04.05.26	Виконано
3	Формування вимог до стаціонарного радіомережевого вузла	04.05.26 – 08.05.26	Виконано
4	Вибір мікроконтролера, LoRa-модуля, підсилювача, антени та системи живлення	08.05.26 – 15.05.26	Виконано
5	Розроблення структурної та електричної принципової схем пристрою	15.05.26 – 24.05.26	Виконано
6	Розрахунок параметрів антени, енергоспоживання, автономності та бюджету радіолінії	24.05.26 – 31.05.26	Виконано
7	Моделювання, виготовлення та перевірка Ground Plane антени	31.05.26 – 07.06.26	Виконано
8	Складання пристрою та експериментальна перевірка роботи в мережі Meshtastic	07.06.26 – 11.06.26	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки, графічних матеріалів і презентації	11.06.26 – 15.06.26	Виконано

Студент



Євгеній ШЧЕНКО

Керівник



Дмитро ВАСИЛЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт складається з пояснювальної записки обсягом 82 сторінки, що включає 14 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел із 22 найменувань та додатки А, Б.

У дипломному проєкті розроблено стаціонарний автономний радіомережевий вузол на базі технології LoRa для роботи в mesh-мережі Meshtastic. Пристрій призначений для підтримання локального радіозв'язку, передавання та ретрансляції коротких повідомлень у діапазоні 433 МГц.

У проєкті виконано аналіз автономних радіомережевих вузлів, принципу роботи технології LoRa, особливостей побудови mesh-мереж та готових апаратних рішень для Meshtastic. Обґрунтовано вибір мікроконтролерного модуля XIAO ESP32-C6, LoRa-модуля RA-02 на базі SX1278, RF-підсилювача AB-IOT-433, DC-DC перетворювача TPS61088, модуля заряджання TP4056, акумуляторного блока 2× Li-Ion 18650 та зовнішньої Ground Plane антени 433 МГц.

Виконано розрахунок параметрів Ground Plane антени, енергоспоживання, часу автономної роботи та бюджету радіолінії. Антену було змодельовано в CST, виготовлено фізично та перевірено за параметрами S11 і VSWR. За результатами перевірки на частоті 433,125 МГц отримано значення VSWR близько 1,06, що підтверджує узгодження антени з радіочастотним трактом.

Працездатність вузла перевірено в мережі Meshtastic у лабораторних умовах. Під час передавання тестових повідомлень були отримані значення RSSI від -48 до -42 дБм та SNR від 9 до 14 дБ. Також виконано техніко-економічну оцінку пристрою, за результатами якої орієнтовна вартість розробленого вузла становить 1802 грн.

Ключові слова: LoRa, Meshtastic, mesh-мережа, радіомережевий вузол, Ground Plane антена, RSSI, SNR, VSWR.

ANNOTATION

The diploma project consists of an explanatory note of 82 pages, including 14 figures, 13 tables, a list of references with 22 sources, and Appendices A and B.

The diploma project presents the development of a stationary autonomous radio network node based on LoRa technology for operation in a Meshtastic mesh network. The device is intended to support local radio communication, transmit and retransmit short messages in the 433 MHz frequency band.

The project includes an analysis of autonomous radio network nodes, the operating principle of LoRa technology, the features of LoRa-based mesh networks, and ready-made hardware solutions for Meshtastic. The selection of the XIAO ESP32-C6 microcontroller module, RA-02 LoRa module based on SX1278, AB-IOT-433 RF amplifier, TPS61088 DC-DC converter, TP4056 charging module, 2× Li-Ion 18650 battery pack, and external 433 MHz Ground Plane antenna is substantiated.

The parameters of the Ground Plane antenna, power consumption, autonomous operating time, and radio link budget were calculated. The antenna was modeled in CST, physically manufactured, and verified using S11 and VSWR parameters. According to the verification results, the VSWR value at 433.125 MHz was about 1.06, which confirms the matching of the antenna with the radio frequency path.

The node performance was verified in the Meshtastic network under laboratory conditions. During the transmission of test messages, RSSI values from -48 to -42 dBm and SNR values from 9 to 14 dB were obtained. A technical and economic evaluation of the device was also performed, according to which the estimated cost of the developed node is 1802 UAH.

Keywords: LoRa, Meshtastic, mesh network, radio network node, Ground Plane antenna, RSSI, SNR, VSWR.

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

на тему: «Автономний мережевий вузол на базі технології
LoRa»

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ВИХІДНИХ ВИМОГ ДО АВТОНОМНОГО РАДІОМЕРЕЖЕВОГО ВУЗЛА	12
1.1 Призначення автономних радіомережєвих вузлів.....	12
1.2 Сценарії застосування автономної mesh-мережі	13
1.3 Принцип роботи технології LoRa	14
1.4 Особливості побудови mesh-мереж на базі LoRa.....	16
1.5 Аналіз готових апаратних рішень для роботи з Meshtastic	18
1.6 Порівняння радіомодулів, мікроконтролерів та антенних рішень.....	19
1.7 Формування вимог до стаціонарного радіомережєвого вузла	20
1.8 Висновки до розділу 1	22
2 ПРОЄКТУВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО РАДІОМЕРЕЖЕВОГО ВУЗЛА НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA.....	24
2.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою	24
2.2 Вибір частотного діапазону та параметрів радіоканалу	26
2.3 Вибір мікроконтролера та радіомодуля.....	28
2.4 Вибір антени та оцінка її конструктивних параметрів	29
2.5 Розроблення системи живлення з резервуванням від акумулятора.....	36
2.6 Розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи.....	38
2.7 Розрахунок бюджету радіолінії.....	40
2.8 Оцінка впливу антени, висоти встановлення та параметрів передавання на дальність зв'язку	42
2.9 Розроблення електричної принципової схеми	44
2.10 Обґрунтування конструктивного виконання пристрою	46
2.11 Висновки до розділу 2	49

						PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ		
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	Автономний мережєвий вузол на базі технології LoRa	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Іщенко Є.В.						7	82
Перевірів	П.І.Б.							
Н. Контр.	П.І.Б.					PI-п31, РТФ НТУУ КПІ		
Затвер-	П.І.Б.							

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РАДІОМЕРЕЖЕВОГО ВУЗЛА	51
3.1 Мета, умови та засоби експериментальної перевірки	51
3.2 Перевірка параметрів Ground Plane антени	52
3.3 Перевірка роботи вузла в мережі MeshTastic	53
3.4 Узагальнення результатів експериментальної перевірки	56
3.5 Висновки до розділу 3	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ	58
4.1 Аналіз умов безпечного виконання робіт	58
4.2 Електробезпека та безпечне використання акумуляторів.....	59
4.3 Техніко-економічна оцінка пристрою	61
4.4 Порівняння розробленого пристрою з готовими апаратними рішеннями	63
4.5 Висновки до розділу 4	65
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	74
ДОДАТОК Б. КОМПЛЕКТ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКБ — акумуляторна батарея

ПЗ — програмне забезпечення

BW — Bandwidth, ширина смуги частот

CR — Coding Rate, коефіцієнт кодування

CSS — Chirp Spread Spectrum, широкосмугова модуляція з лінійною зміною частоти

CST — Computer Simulation Technology, програмне середовище для електромагнітного моделювання

dBi — децибел відносно ізотропного випромінювача

dBm — децибел відносно потужності 1 мВт

ISM — Industrial, Scientific and Medical, неліцензований частотний діапазон

LoRa — Long Range, технологія далекого радіозв'язку

RSSI — Received Signal Strength Indicator, індикатор рівня прийнятого сигналу

SF — Spreading Factor, коефіцієнт розширення спектра

SNR — Signal-to-Noise Ratio, відношення сигнал/шум

SPI — Serial Peripheral Interface, послідовний периферійний інтерфейс

USB — Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина

VNA — Vector Network Analyzer, векторний аналізатор кіл

VSWR — Voltage Standing Wave Ratio, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		9

ВСТУП

Сучасні системи зв'язку значною мірою залежать від наявності телекомунікаційної інфраструктури: базових станцій мобільного зв'язку, провайдерських мереж доступу до Інтернету, кабельних ліній і стабільного електроживлення. У разі аварій, перевантаження мережі, пошкодження інфраструктури або роботи у віддаленій місцевості виникає потреба в автономних засобах передавання коротких повідомлень.

Одним із можливих рішень є використання технології LoRa, яка забезпечує передавання невеликих обсягів даних на значні відстані за малого енергоспоживання. На її основі можуть будуватися автономні mesh-мережі, у яких окремі вузли не лише передають власні повідомлення, а й можуть ретранслювати пакети інших учасників мережі. Це підвищує стійкість зв'язку та дозволяє розширити зону покриття без використання централізованої базової станції.

У межах дипломного проєкту розглянуто стаціонарний радіомережевий вузол для роботи в мережі Meshtastic. На відміну від переносних вузлів, стаціонарний пристрій може бути встановлений у точці з кращими умовами поширення радіосигналу, оснащений зовнішньою антеною, основним джерелом живлення та резервним акумуляторним блоком. Такий вузол може виконувати роль опорної точки mesh-мережі, підтримувати локальне радіопокриття та забезпечувати передавання коротких повідомлень у випадках, коли традиційні канали зв'язку недоступні або нестабільні.

Метою дипломного проєкту є розроблення та перевірка працездатності стаціонарного автономного радіомережевого вузла на базі технології LoRa для роботи в mesh-мережі Meshtastic у діапазоні 433 МГц.

Об'єктом дипломного проєкту є автономна mesh-мережа на базі технології LoRa. Предметом дипломного проєкту є апаратна реалізація стаціонарного радіомережевого вузла з LoRa-модулем, зовнішньою антеною, RF-підсилювачем і резервним живленням.

Для досягнення поставленої мети було проаналізовано призначення автономних радіомережевих вузлів, принцип роботи технології LoRa, особливості

					<i>PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		10

побудови mesh-мереж і готові апаратні рішення для Meshtastic. Також було сформовано вимоги до пристрою, обґрунтовано вибір компонентів, розроблено структурну та електричну принципову схеми, виконано розрахунок антени, живлення, автономності й бюджету радіолінії, а також проведено експериментальну перевірку працездатності вузла.

У пристрої використано мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6, LoRa-модуль RA-02 на базі SX1278, RF-підсилювач AB-IOT-433, DC-DC перетворювач TPS61088, модуль заряджання TP4056, акумуляторний блок 2× Li-Ion 18650 та зовнішню Ground Plane антену 433 МГц. Практичне значення дипломного проєкту полягає у створенні доступного стаціонарного вузла, який може використовуватися як опорна точка автономної mesh-мережі для підтримання локального радіозв'язку.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ВИХІДНИХ ВИМОГ ДО АВТОНОМНОГО РАДІОМЕРЕЖЕВОГО ВУЗЛА

1.1 Призначення автономних радіомережевих вузлів

Автономні радіомережеві вузли призначені для забезпечення бездротового обміну даними без обов'язкової залежності від централізованої телекомунікаційної інфраструктури. До такої інфраструктури належать базові станції стільникового зв'язку, провайдерські мережі доступу до Інтернету, кабельні лінії зв'язку, маршрутизатори загального користування та інші елементи, працездатність яких залежить від зовнішнього електроживлення й технічного обслуговування.

Основним призначенням автономного радіомережевого вузла є підтримання зв'язку в умовах, коли традиційні засоби передавання інформації відсутні, перевантажені або пошкоджені. Такий вузол може виконувати функції кінцевого пристрою, ретранслятора або проміжної ланки mesh-мережі. У mesh-топології окремі пристрої не лише передають власні повідомлення, а й беруть участь у пересиланні даних інших учасників мережі. Завдяки цьому збільшується зона покриття та зменшується залежність системи від одного центрального елемента.

Типовий автономний радіомережевий вузол містить радіомодуль, мікроконтролер, антену, систему живлення та програмне забезпечення, яке визначає режими роботи пристрою. У стаціонарному виконанні вузол розміщується в точці з кращими умовами поширення радіосигналу. Для підвищення ефективності можуть застосовуватися зовнішня антена, захищений корпус, мережеве живлення та резервне живлення від акумуляторної батареї.

Автономні радіомережеві вузли доцільні для передавання коротких текстових повідомлень, координат, телеметричних даних, службових повідомлень стану та сигналів тривоги. Вони не призначені для передавання великих файлів або потокового відео, оскільки пріоритетом таких систем є дальність зв'язку, автономність, стійкість і простота розгортання.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		12

У межах дипломного проєкту автономний радіомережевий вузол розглядається як стаціонарний пристрій для підтримання локального бездротового зв'язку на базі технології LoRa. Основна увага приділяється вибору апаратної платформи, організації живлення з резервуванням, вибору антени, оцінці радіоканалу та перевірці працездатності пристрою у складі mesh-мережі.

1.2 Сценарії застосування автономної mesh-мережі

Автономна mesh-мережа застосовується для організації локального бездротового зв'язку між групою вузлів без обов'язкового використання стільникової мережі, провайдерського доступу до Інтернету або централізованого маршрутизатора. У такій мережі кожен вузол може бути кінцевим пристроєм або проміжним ретранслятором, тому повідомлення може передаватися як пряму, так і через інші вузли.

Одним із важливих сценаріїв застосування є забезпечення резервного зв'язку під час аварійних або надзвичайних ситуацій. У разі пошкодження електромереж, базових станцій мобільного зв'язку або кабельної інфраструктури виникає потреба в незалежному каналі обміну короткими повідомленнями. Автономна мережа на базі малопотужних радіовузлів може використовуватися для передавання службових повідомлень, координат, запитів про допомогу та коротких команд.

Іншим напрямом застосування є організація зв'язку у віддалених районах, де традиційні телекомунікаційні послуги відсутні або мають нестабільну якість. До таких районів належать лісові масиви, гірська місцевість, сільськогосподарські території, польові табори та малонаселені території. У таких умовах стаціонарні вузли, розміщені на підвищених точках, можуть виконувати роль опорних елементів мережі.

Автономна mesh-мережа також може застосовуватися туристичними, експедиційними та пошуково-рятувальними групами. Якщо прямий радіозв'язок між двома пристроями неможливий, повідомлення може бути передане через проміжний вузол. Додатковою перевагою є можливість передавання координат місцезнаходження, що спрощує контроль переміщення учасників.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		13

Окремим сценарієм є локальний моніторинг об'єктів та інженерної інфраструктури. Радіовузли можуть передавати телеметричні дані від датчиків температури, вологості, напруги живлення, стану акумуляторної батареї або інших параметрів. Такий підхід доцільний у випадках, коли об'єкт розташований на значній відстані від основної мережевої інфраструктури, а передавання великих обсягів даних не потрібне.

У межах дипломного проекту найбільш доцільним є сценарій стаціонарного вузла, який виконує функцію опорного елемента автономної mesh-мережі. Такий вузол може бути встановлений у точці з кращими умовами поширення радіосигналу, оснащений зовнішньою антеною, мережевим блоком живлення та акумуляторною батареєю для резервування. Його основне призначення полягає в підвищенні зони покриття, ретрансляції повідомлень і підтриманні працездатності мережі за відсутності традиційних каналів зв'язку.

1.3 Принцип роботи технології LoRa

LoRa є технологією бездротового передавання даних, призначеною для організації зв'язку на значних відстанях за малого енергоспоживання та невеликої швидкості передавання інформації. Назва LoRa походить від Long Range, що відображає основне призначення цієї технології — забезпечення далекого радіозв'язку для пристроїв, які передають невеликі обсяги даних.

Основою роботи LoRa є модуляція Chirp Spread Spectrum, яка базується на використанні широкосмугових сигналів зі змінною частотою. Частота такого сигналу змінюється в межах заданої смуги пропускання протягом певного часу. Інформація передається шляхом зміщення chirp-сигналів, а приймач виконує зворотну обробку та визначає передане значення символу.

У LoRa енергія сигналу розподіляється по ширшій смузі частот, ніж у вузькосмугових способах передавання. Завдяки цьому приймач може виділяти корисний сигнал навіть за низького рівня приймання. Підвищення завадостійкості досягається ціною зменшення швидкості передавання даних і збільшення часу перебування сигналу в ефірі.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		14

Одним із головних параметрів LoRa є коефіцієнт розширення спектра SF. У більшості практичних застосувань використовуються значення SF від 7 до 12. Менше значення SF забезпечує вищу швидкість передавання та менший час зайняття радіоканалу. Більше значення SF підвищує чутливість приймача та потенційну дальність зв'язку, але зменшує швидкість передавання.

Тривалість одного символу LoRa визначається співвідношенням

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Де T_{sym} — тривалість символу;

SF — коефіцієнт розширення спектра;

BW — ширина смуги частот.

З наведеної залежності видно, що збільшення SF на одиницю призводить до приблизного подвоєння тривалості символу за сталої ширини смуги. Для автономного вузла це важливо, оскільки більший час передавання підвищує енергоспоживання радіомодуля та збільшує зайнятість каналу.

Іншими важливими параметрами LoRa є ширина смуги BW та коефіцієнт кодування CR. Збільшення BW підвищує швидкість передавання даних, але зменшує енергетичний запас радіолінії. Коефіцієнт CR визначає кількість надлишкової інформації, яка додається до корисних даних для підвищення стійкості до помилок. Збільшення надлишковості підвищує надійність передавання, але знижує ефективну швидкість обміну.

Пакет LoRa зазвичай містить преамбулу, заголовок, корисне навантаження та контрольну суму CRC. Преамбула використовується для синхронізації приймача з передавачем, заголовок містить службову інформацію, корисне навантаження містить передані дані, а CRC використовується для перевірки цілісності пакета.

LoRa може працювати в неліцензованих діапазонах ISM, які відрізняються залежно від регіону. Для європейських застосувань поширеними є діапазони 433 МГц та 868 МГц. Вибір частотного діапазону впливає на розміри

антени, умови поширення радіохвиль, допустиму потужність передавача та нормативні обмеження.

Важливо розрізнити LoRa та LoRaWAN. LoRa описує фізичний рівень радіозв'язку, тобто спосіб модуляції та передавання сигналу. LoRaWAN є мережевим протоколом, який визначає архітектуру мережі та взаємодію кінцевих пристроїв із шлюзами. У випадку Meshtastic використовується LoRa як радіотехнологія, а мережеву логіку формує програмне забезпечення Meshtastic.

1.4 Особливості побудови mesh-мереж на базі LoRa

Побудова mesh-мережі на базі LoRa відрізняється від класичних мереж із централізованою інфраструктурою. У традиційних мережах зв'язок часто організовується через базову станцію, шлюз або маршрутизатор. У mesh-мережі кожен вузол може бути не лише джерелом або приймачем повідомлення, а й проміжним ретранслятором. За рахунок цього повідомлення може досягати віддаленого вузла через послідовність інших вузлів.

Для LoRa така топологія має практичне значення, оскільки фізичний рівень цієї технології забезпечує значну дальність зв'язку, але має обмежену швидкість передавання даних. Через це побудова mesh-мережі повинна враховувати не лише радіус покриття окремого вузла, а й загальне навантаження на радіоканал, кількість ретрансляцій, тривалість перебування пакета в ефірі та ймовірність колізій.

Основною перевагою mesh-підходу є можливість збільшення зони покриття без використання потужної базової станції. Якщо два вузли не можуть обмінятися повідомленням напряму через значну відстань, рельєф місцевості, забудову або перешкоди, проміжний вузол може прийняти пакет і передати його далі.

Водночас mesh-мережа на базі LoRa не може масштабуватися без обмежень. Кожна ретрансляція займає радіоканал, а LoRa-передавання має відносно велику тривалість пакета. Якщо велика кількість вузлів часто передає або повторює повідомлення, зростає ймовірність колізій, затримок і втрати даних.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		16

У програмному забезпеченні Meshtastic для передавання широкомовних повідомлень застосовується кероване поширення пакетів. Вузол, який приймає пакет із ненульовим значенням HopLimit, може зменшити це значення та виконати повторне передавання. Якщо HopLimit дорівнює нулю, подальше поширення пакета припиняється. Такий механізм обмежує кількість ретрансляцій і не дозволяє одному пакету нескінченно поширюватися мережею.

Перед ретрансляцією вузол очікує короткий проміжок часу та перевіряє, чи не було це повідомлення вже повторене іншим вузлом. Якщо пакет уже було ретрансльовано, повторне передавання може бути скасоване. Це зменшує дублювання пакетів і знижує навантаження на спільний радіоканал.

Під час побудови mesh-мережі на базі LoRa важливим є вибір параметрів радіоканалу. Вузли однієї мережі повинні працювати в однаковому регіональному профілі та з однаковими параметрами модему. До таких параметрів належать ширина смуги, коефіцієнт розширення спектра, коефіцієнт кодування, частотний канал і допустима потужність передавання.

Стаціонарний вузол у mesh-мережі може виконувати роль опорної точки покриття. На відміну від переносного пристрою, він може бути встановлений у місці з кращими умовами радіопоширення, підключений до зовнішньої антени та забезпечений стабільним живленням. Для такого вузла важливими є висота встановлення антени, якість антенно-фідерного тракту, захист від атмосферних впливів, резервування живлення та стабільність програмних налаштувань.

До обмежень mesh-мережі на базі LoRa належать низька пропускна здатність, обмежений розмір пакета, затримки під час багатохопового передавання, зростання навантаження на канал за великої кількості вузлів і залежність якості зв'язку від рельєфу, забудови та розміщення антени. У межах дипломного проєкту mesh-мережа на базі LoRa розглядається як децентралізована система зв'язку, у якій стаціонарний вузол підвищує стабільність покриття та підтримує передавання повідомлень між віддаленими пристроями.

					<i>PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.5 Аналіз готових апаратних рішень для роботи з Meshtastic

Для роботи з Meshtastic застосовуються різні готові апаратні рішення: портативні вузли, плати розробника, трекери, модульні платформи та захищені стаціонарні пристрої. Такі рішення зазвичай поєднують мікроконтролер, LoRa-трансивер, антенний роз'єм, акумуляторне живлення та програмну підтримку Meshtastic. Їх перевагою є швидке розгортання мережі без самостійного розроблення апаратної частини.



Рисунок 1.1 — Приклади готових апаратних рішень для Meshtastic

Поширені готові Meshtastic-пристрої можна умовно поділити на переносні та стаціонарні. Переносні вузли орієнтовані на індивідуальне

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис
18

використання, мають компактний корпус, вбудований акумулятор, дисплей або GNSS-модуль. До таких рішень належать трекери та портативні плати, які зручно використовувати як абонентські пристрої. Проте вони не завжди пристосовані до тривалої роботи як опорна точка мережі, оскільки мають обмеження за ємністю акумулятора, розміром антени та конструкцією корпусу.

Стаціонарні або захищені готові вузли краще підходять для зовнішнього встановлення, однак значна частина таких рішень орієнтована на регіональні діапазони 868/915 МГц. Для задачі побудови вузла на 433 МГц вибір готових стаціонарних пристроїв є більш обмеженим. Крім того, готові вузли переважно використовують потужність штатного LoRa-трансивера та не передбачають окремого радіочастотного тракту з підсилювачем.

Проектований пристрій має інше призначення. Він розроблений як стаціонарний опорний вузол автономної mesh-мережі, який повинен тривалий час працювати в одній точці, приймати й ретранслювати короткі повідомлення, підтримувати локальне радіопокриття та зберігати працездатність під час зниження основного живлення. Його відмінність полягає у використанні модульної структури: XIAO ESP32-C6, LoRa-модуля RA-02 на базі SX1278, RF-підсилювача АВ-ІОТ-433, DC-DC перетворювача TPS61088, модуля заряджання TP4056, двох акумуляторів Li-Ion 18650 та зовнішньої Ground Plane антени 433 МГц.

Така побудова не дублює готовий переносний Meshtastic-вузол, а вирішує конкретні задачі стаціонарного встановлення: підключення зовнішньої антени, підвищення стабільності радіопокриття, організацію резервного живлення, окреме компонування радіомодуля й підсилювача, а також зменшення очікуваної вартості за рахунок використання доступних модулів. Саме ці фактори обґрунтовують доцільність проектування власного стаціонарного радіомережевого вузла.

1.6 Порівняння радіомодулів, мікроконтролерів та антенних рішень

Під час вибору апаратної основи автономного радіомережевого вузла було враховано три основні групи компонентів: радіомодуль, мікроконтролерний

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		19

модуль та антенне рішення. Готові Meshtastic-плати поєднують ці елементи в одному пристрої, проте для стаціонарного вузла важливою є можливість окремого вибору й узгодження кожного функціонального блока.

Як радіомодулі для LoRa-зв'язку можуть застосовуватися рішення на базі SX127x, SX126x та новіших трансиверів. Модулі SX126x мають кращу енергоефективність і часто використовуються в сучасних готових Meshtastic-пристроях. Водночас модуль Ra-02 на базі SX1278 є доступним, поширеним і придатним для роботи в діапазоні 433 МГц. Його застосування дає змогу реалізувати базову LoRa-частину пристрою з підключенням до мікроконтролера через SPI.

Серед мікроконтролерних модулів поширеними є рішення на ESP32 та nRF52840. nRF52840 доцільний для пристроїв із мінімальним енергоспоживанням, однак ESP32-рішення мають ширші можливості взаємодії, зручніше налагодження та підтримку додаткових бездротових інтерфейсів. У проєкті використовується XIAO ESP32-C6, який має компактні розміри, USB-підключення та достатню кількість інтерфейсів для керування LoRa-модулем.

Антенне рішення істотно впливає на якість зв'язку. Вбудовані або короткі антени зручні для переносних вузлів, але для стаціонарного пристрою доцільнішою є зовнішня антена діапазону 433 МГц. Її можна встановити вище, вивести за межі корпусу та краще узгодити з радіочастотним трактом. Тому в межах дипломного проєкту обрано модульну структуру вузла: XIAO ESP32-C6, Ra-02 SX1278, зовнішня антена та двонаправлений підсилювач AB-IOT-433 як окремий блок для подальшої оцінки впливу радіочастотного тракту на якість зв'язку.

1.7 Формування вимог до стаціонарного радіомережевого вузла

На основі аналізу автономних mesh-мереж, технології LoRa та готових апаратних рішень було сформовано вимоги до стаціонарного радіомережевого вузла. Основне призначення пристрою полягає в роботі як опорної точки Meshtastic-мережі, що забезпечує приймання, передавання та ретрансляцію коротких повідомлень у діапазоні 433 МГц.

					<i>PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		20

На відміну від переносних Meshtastic-вузлів, проєктований пристрій повинен бути пристосований до тривалої роботи в одному місці. Через це до нього висуваються вимоги щодо стаціонарного монтажу, підключення зовнішньої антени, резервного живлення, розміщення модулів у корпусі та доступу до елементів налаштування. Вузол повинен працювати від основного джерела живлення з переходом на акумуляторний резерв у разі зникнення мережевого живлення.

Радіочастотна частина пристрою повинна забезпечувати роботу в діапазоні 433 МГц. Для цього використовується LoRa-модуль RA-02 на базі SX1278, зовнішня Ground Plane антена та RF-підсилювач AB-IOT-433. Застосування Ground Plane антени обґрунтовується простою конструкцією, зручністю виготовлення, зрозумілим розрахунком і придатністю для стаціонарного встановлення. Підсилювач AB-IOT-433 використовується як окремий блок радіотракту, який забезпечує більшу технічну потужність порівняно зі штатним виходом LoRa-модуля. При цьому режими передавання мають відповідати допустимим обмеженням для вибраного частотного діапазону.

Таблиця 1.1 — Основні вимоги до стаціонарного радіомережевого вузла

Група вимог	Зміст вимоги
Призначення	робота як стаціонарний опорний вузол mesh-мережі
Частотний діапазон	433 МГц
Радіомодуль	RA-02 на базі SX1278
Антена	зовнішня Ground Plane антена 433 МГц
Підсилення	RF-підсилювач AB-IOT-433
Живлення	основне живлення з резервом від 2× Li-Ion 18650
Перетворення на-пруги	DC-DC перетворювач TPS61088
Заряджання	модуль TP4056
Конструкція	корпус із можливістю підключення антени та обслуговування

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис

21

Вартість	застосування доступних модулів для зниження собівартості
----------	--

Сформовані вимоги визначають подальшу структуру пристрою та підтверджують доцільність власного проектування. Проектований вузол відрізняється від готових рішень не універсальністю, а спеціалізацією під стаціонарну роботу на 433 МГц, використанням зовнішньої антени, підсилювача, резервного живлення та модульної конструкції.

1.8 Висновки до розділу 1

У першому розділі було проаналізовано призначення автономних радіомережеских вузлів, основні сценарії застосування mesh-мереж, принцип роботи технології LoRa, особливості побудови децентралізованих мереж на її основі, а також готові апаратні рішення для роботи з Meshtastic.

Показано, що автономні радіомережескі вузли є доцільними для передавання коротких повідомлень, координат, телеметричних та службових даних у випадках, коли використання стільникового зв'язку або доступу до Інтернету є обмеженим, нестабільним чи неможливим. Особливе значення мають сценарії резервного зв'язку, роботи у віддалених районах, локального моніторингу об'єктів та підтримання зв'язку між учасниками невеликої групи.

Було встановлено, що технологія LoRa забезпечує поєднання значної дальності зв'язку, низького енергоспоживання та можливості роботи в неліцензованих діапазонах частот. Водночас її обмеженнями є невисока швидкість передавання даних, збільшений час перебування пакета в ефірі та залежність якості зв'язку від параметрів радіоканалу, антени, рельєфу місцевості й умов встановлення вузла.

Розглянуто готові апаратні рішення для Meshtastic і показано, що вони зручні для швидкого розгортання мережі, але не завжди повністю відповідають задачі створення стаціонарного вузла з окремим радіомодулем, зовнішньою антеною, підсилювачем і резервним живленням. Через це в межах дипломного проекту обґрунтовано доцільність використання модульної структури на базі XIAO ESP32-C6, Ra-02 SX1278 та двонаправленого підсилювача AB-IOT-433.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		22

Сформовані вимоги до стаціонарного радіомережевого вузла передбачають роботу в діапазоні 433 МГц, підтримку LoRa-зв'язку, можливість ретрансляції повідомлень у mesh-мережі, підключення зовнішньої антени, живлення від мережевого блоку з резервуванням від акумуляторної батареї та перевірку якості зв'язку за показниками RSSI і SNR. Отримані результати створюють основу для подальшого проектування структурної схеми, вибору компонентів і розроблення апаратної частини пристрою.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23

2 ПРОЄКТУВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО РАДІОМЕРЕЖЕВОВОГО ВУЗЛА НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

2.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою

Проектування стаціонарного радіомережевого вузла на базі технології LoRa було розпочато з формування структурної схеми пристрою. Структурна схема визначає склад основних функціональних блоків, взаємозв'язки між ними та загальну логіку роботи вузла у складі автономної mesh-мережі. На відміну від готових переносних Meshtastic-пристроїв, розроблений вузол має стаціонарне призначення та побудований із окремих функціональних модулів.

У складі пристрою використано мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6, LoRa-модуль RA-02 на базі трансивера SX1278, RF-підсилювач AB-IOT-433, DC-DC перетворювач TPS61088, модуль заряджання TP4056, акумуляторний блок на базі двох Li-Ion елементів 18650 та зовнішню Ground Plane антену на 433 МГц. Такий склад відповідає задачі створення стаціонарного опорного вузла, який забезпечує приймання, передавання та ретрансляцію коротких повідомлень у mesh-мережі.

Основним керуючим блоком пристрою є XIAO ESP32-C6. Він виконує обробку даних, керує радіомодулем, забезпечує роботу програмного забезпечення Meshtastic та взаємодіє з LoRa-модулем через інтерфейс SPI. До основних сигнальних ліній належать SCK, MISO, MOSI, NSS, RESET, DIO0 та DIO1.

Радіочастотна частина пристрою реалізована на базі модуля RA-02 SX1278, який працює в діапазоні 433 МГц. Вихід радіомодуля з'єднано з RF-підсилювачем AB-IOT-433, після якого сигнал надходить до зовнішньої Ground Plane антени. Така побудова радіотракту відрізняє розроблений пристрій від багатьох готових Meshtastic-вузлів, у яких використовується лише штатна вихідна потужність радіомодуля та компактна антена.

Система живлення пристрою складається з входу USB-C або зовнішнього джерела 5 В, модуля заряджання TP4056, акумуляторного блока резервного живлення та DC-DC перетворювача TPS61088. Основне живлення подається від зовнішнього джерела, а акумуляторний блок забезпечує резервну роботу

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		24

вузла в разі зникнення основного живлення. Перетворювач TPS61088 використовується для формування стабілізованої напруги, необхідної для живлення основних блоків пристрою.

Структурна схема автономного радіомережевого вузла LoRa / Meshtastic

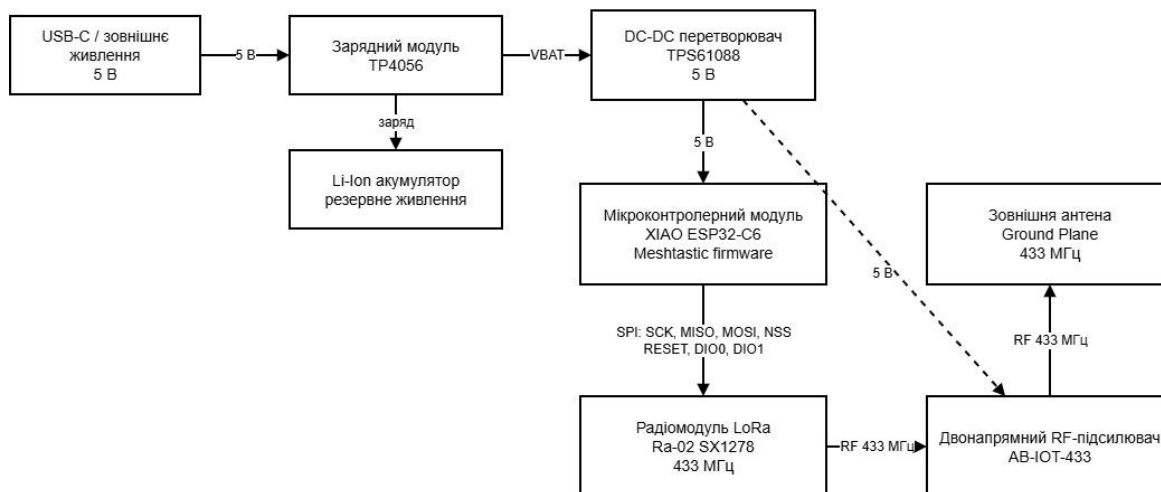


Рисунок 2.1 — Структурна схема автономного радіомережевого вузла LoRa / Meshtastic

На структурній схемі показано послідовність проходження сигналу від мікроконтролерного модуля до радіомодуля, RF-підсилювача та антени. Також наведено ланцюг живлення, який включає зовнішнє живлення 5 В, модуль заряджання TP4056, акумуляторний блок і DC-DC перетворювач TPS61088. Окреме виділення радіочастотного тракту та системи живлення є важливим для стаціонарного вузла, оскільки робота підсилювача, радіомодуля й антени безпосередньо впливає на стабільність зв'язку.

Розроблена структурна схема підтверджує модульний принцип побудови пристрою. Такий підхід забезпечує окреме розміщення мікроконтролера, радіомодуля, підсилювача, антени та вузла живлення в корпусі. Це спрощує монтаж, налагодження, технічне обслуговування та подальше підключення зовнішньої Ground Plane антени. Обрана структура відповідає призначенню пристрою як стаціонарного радіомережевого вузла, що працює в діапазоні 433 МГц і підтримує функції опорної точки автономної mesh-мережі.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

2.2 Вибір частотного діапазону та параметрів радіоканалу

Вибір частотного діапазону є важливим етапом проектування стаціонарного радіомережевого вузла, оскільки він визначає сумісність радіомодуля, параметри антени, умови поширення радіохвиль, допустиму потужність передавання та налаштування програмного забезпечення Meshtastic. Для розробленого пристрою обрано діапазон 433 МГц, що відповідає використаному LoRa-модулю RA-02 на базі SX1278 та виготовленій Ground Plane антені.

Модуль RA-02 SX1278 призначений для роботи в діапазоні частот, до якого входить 433 МГц. Це дозволяє реалізувати вузол без застосування додаткового перетворення частоти. Крім того, частота 433 МГц є зручною для виготовлення чвертьхвильової Ground Plane антени, оскільки її конструктивні розміри залишаються прийнятними для стаціонарного встановлення.

Для України в Meshtastic передбачено регіональний профіль UA_433, який охоплює діапазон 433,0–434,7 МГц. У межах цього діапазону для розрахунків прийнято робочу частоту

$$f_0 = 433,125 \text{ МГц}$$

Де (f_0) — прийнята робоча частота радіоканалу.

Довжина хвилі для вибраної частоти визначається за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

Де (λ) — довжина хвилі;

(c) — швидкість поширення електромагнітної хвилі, $(c = 3 \cdot 10^8)$ м/с;

(f_0) — робоча частота.

Для частоти $(f_0 = 433,125)$ МГц:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{433,125 \cdot 10^6} = 0,6926 \text{ м}$$

Попередній розмір чвертьхвильового елемента для антени визначається як

$$l_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4}$$

Де $(l_{\lambda/4})$ — теоретична довжина чвертьхвильового елемента;

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		26

(λ) — довжина хвилі.

$$l_{\lambda/4} = \frac{0,6926}{4} = 0,173 \text{ м}$$

Отримане значення 173 мм використовується як базовий розмір для подальшого розрахунку вертикального випромінювача та противаг Ground Plane антени.

Для початкового налаштування радіоканалу може використовуватися режим LongFast, який забезпечує компроміс між дальністю зв'язку та швидкістю передавання. Одним із параметрів LoRa є тривалість символу, яка залежить від коефіцієнта розширення спектра та ширини смуги:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Де (T_{sym}) — тривалість символу;

(SF) — коефіцієнт розширення спектра;

(BW) — ширина смуги частот.

Для режиму ($SF = 11$) та ($BW = 250$) кГц:

$$T_{sym} = \frac{2^{11}}{250000} = 0,00819 \text{ с} = 8,19 \text{ мс}$$

Збільшення (SF) підвищує чутливість приймання та потенційну дальність, але збільшує час перебування пакета в ефірі. Для стаціонарного вузла це важливо, оскільки пристрій повинен не лише передавати власні повідомлення, а й підтримувати ретрансляцію пакетів інших вузлів mesh-мережі.

У складі радіочастотного тракту використано RF-підсилювач АВ-ІОТ-433, технічна вихідна потужність якого становить до 2,3 Вт. Для переведення потужності у дБм використовується формула

$$P_{dBm} = 10 \lg(P_{mW})$$

Де (P_{dBm}) — потужність у дБм;

(P_{mW}) — потужність у мВт.

$$P_{mW} = 2,3 \cdot 1000 = 2300 \text{ мВт}$$

$$P_{dBm} = 10 \lg(2300) = 33,6 \text{ дБм}$$

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		27

Отримане значення показує технічну можливість підсилювача, однак фактичний режим передавання повинен враховувати допустимі обмеження для вибраного частотного діапазону. Через це під час подальшого розрахунку бюджету радіолінії доцільно розглядати два варіанти: режим із нормативно допустимою потужністю та технічний режим із використанням підсилювача.

Таблиця 2.1 — Основні параметри вибраного радіоканалу

Параметр	Значення
Частотний діапазон	433 МГц
Регіональний профіль	UA_433
Діапазон профілю UA_433	433,0–434,7 МГц
Прийнята робоча частота	433,125 МГц
Радіомодуль	RA-02 SX1278
Тип модуляції	LoRa
Початковий режим	LongFast
Орієнтовний SF	11
Орієнтовна BW	250 кГц
Антенa	Ground Plane 433 МГц
RF-підсилювач	AB-IOT-433

Обраний частотний діапазон відповідає апаратній частині пристрою та поставленим задачам стаціонарного вузла. Використання 433 МГц забезпечує сумісність із RA-02 SX1278, дає змогу застосувати зовнішню Ground Plane антену та створює основу для подальших розрахунків антени, енергоспоживання, радіолінії та дальності зв'язку.

2.3 Вибір мікроконтролера та радіомодуля

Для реалізації стаціонарного радіомережевого вузла використано мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6 та LoRa-модуль RA-02 на базі трансивера SX1278. Така комбінація забезпечує розділення функцій керування та радіопередавання, що відповідає модульній структурі пристрою.

XIAO ESP32-C6 виконує роль центрального керуючого блока. Він забезпечує роботу програмного забезпечення Meshtastic, обробку службових даних, взаємодію з LoRa-модулем та налаштування пристрою через USB-інтерфейс. Компактні розміри модуля спрощують його розміщення в корпусі, а наявність сучасного мікроконтролера ESP32-C6 створює запас для подальшого підключення периферійних вузлів.

LoRa-модуль RA-02 SX1278 є основним елементом радіочастотної частини пристрою. Він працює в діапазоні 433 МГц і підключається до XIAO ESP32-C6 через інтерфейс SPI. До основних ліній підключення належать SCK, MISO, MOSI, NSS, RESET, DIO0 та DIO1. Використання RA-02 є доцільним, оскільки цей модуль підтримує LoRa-модуляцію, має високу чутливість приймального тракту та сумісний із зовнішньою антеною 433 МГц.

Максимальна вихідна потужність SX1278 становить до (+20) дБм. Відповідна потужність у міліватах визначається за формулою

$$P_{mW} = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}}$$

Де (P_{mW}) — потужність у мВт;

(P_{dBm}) — потужність у дБм.

$$P_{mW} = 10^{\frac{20}{10}} = 100 \text{ мВт}$$

Отримане значення показує, що штатна потужність RA-02 є обмеженою. Через це в пристрої додатково використано RF-підсилювач АВ-ІОТ-433, який розміщено між радіомодулем та Ground Plane антеною. Обрана комбінація XIAO ESP32-C6 і RA-02 SX1278 забезпечує основу для роботи вузла в діапазоні 433 МГц та підтримки функцій стаціонарної точки mesh-мережі.

2.4 Вибір антени та оцінка її конструктивних параметрів

Антенa є одним із ключових елементів радіочастотного тракту стаціонарного вузла, оскільки від її конструкції, узгодження та місця встановлення залежить рівень прийнятого сигналу, стабільність передавання пакетів і ефективність роботи mesh-мережі. Для розробленого пристрою було обрано Ground Plane антену на 433 МГц. Такий тип антени є доцільним для дипломного

					PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		29

проекту, оскільки має просту конструкцію, зрозумілу методику розрахунку, не потребує складної системи узгодження та може бути виготовлений із доступних матеріалів.

На відміну від колінеарної або J-pole антени, Ground Plane антена не переускладнює конструкцію стаціонарного вузла. Вона складається з вертикального чвертьхвильового випромінювача та противаг, які формують штучну площину заземлення. Для вузла на базі RA-02 SX1278 така антена є практичним рішенням, оскільки забезпечує сумісність із 50-омним радіочастотним трактом і може бути винесена за межі корпусу.

Для розрахунку антени прийнято робочу частоту

$$f_0 = 433,125 \text{ МГц}$$

Довжина хвилі визначається за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

Де (λ) — довжина хвилі;

(c) — швидкість поширення електромагнітної хвилі, $(c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с})$;

(f_0) — робоча частота.

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{433,125 \cdot 10^6} = 0,6926 \text{ м}$$

Теоретична довжина чвертьхвильового випромінювача становить

$$l_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4}$$

$$l_{\lambda/4} = \frac{0,6926}{4} = 0,173 \text{ м} = 173 \text{ мм}$$

З урахуванням коефіцієнта укорочення практична довжина випромінювача визначається за формулою

$$l_{pr} = k \cdot l_{\lambda/4}$$

Де (l_{pr}) — практична довжина випромінювача;

(k) — коефіцієнт укорочення;

$(l_{\lambda/4})$ — теоретична довжина чвертьхвильового елемента.

Для $(k = 0,95)$:

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$l_{pr} = 0,95 \cdot 173 = 164,35 \text{ мм}$$

Довжину протываг прийнято дещо більшою за довжину випромінювача.

Орієнтовна довжина протываги визначається як

LaTeX-запис:

$$l_r = 1,12 \cdot l_{pr}$$

Де (l_r) — довжина протываги;

(l_{pr}) — практична довжина вертикального випромінювача.

$$l_r = 1,12 \cdot 164,35 = 184,07 \text{ мм}$$

Отже, для Ground Plane антени на 433 МГц прийнято вертикальний випромінювач довжиною приблизно 164–173 мм і протываги довжиною близько 184 мм. Остаточне налаштування антени виконувалося з урахуванням результатів моделювання та вимірювання.

					<i>РІ-п31.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		31



Рисунок 2.2 — 3D-модель Ground Plane антени на 433 МГц

Після розрахунку було виконано комп'ютерне моделювання антени в CST. Модель дозволила оцінити узгодження антени в діапазоні поблизу 433 МГц і перевірити, чи відповідає конструкція вибраному частотному діапазону. За результатами моделювання отримано мінімальне значення параметра (S_{11}) близько $(-31,63)$ дБ на частоті приблизно 0,43312 ГГц.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис

32

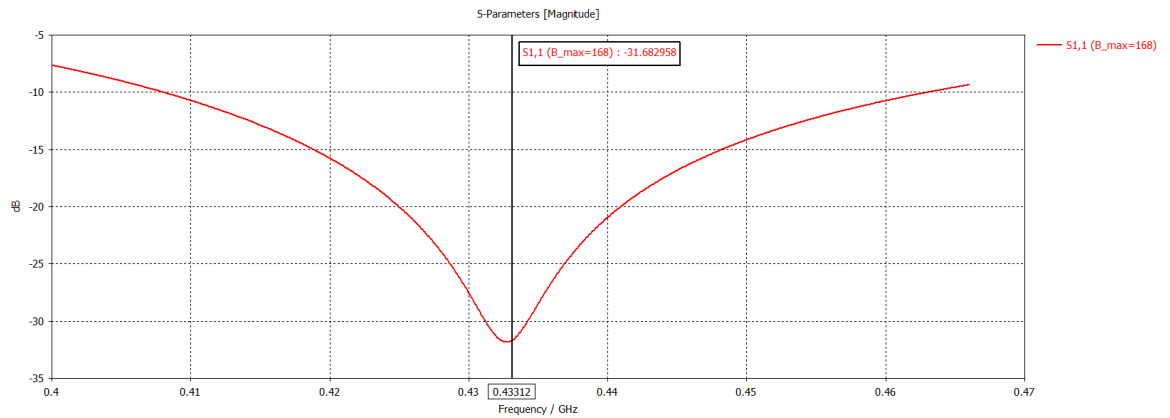


Рисунок 2.3 — Залежність S_{11} Ground Plane антени від частоти
Коефіцієнт відбиття за параметром (S_{11}) визначається за формулою

$$|\Gamma| = 10^{\frac{S_{11}}{20}}$$

Де ($|\Gamma|$) — модуль коефіцієнта відбиття;

(S_{11}) — коефіцієнт відбиття в дБ.

Для ($S_{11} = -31,63$) дБ:

$$|\Gamma| = 10^{\frac{-31,63}{20}} = 0,026$$

Відносна частка відбитої потужності визначається як

$$P_{ref} = |\Gamma|^2 \cdot 100\%$$

$$P_{ref} = 0,026^2 \cdot 100\% = 0,068\%$$

Отримане значення показує, що в точці налаштування лише незначна частина потужності відбивається назад у радіочастотний тракт. Це свідчить про добре узгодження антени з фідером.

Коефіцієнт стоячої хвилі визначається за формулою

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Де ($VSWR$) — коефіцієнт стоячої хвилі;

($|\Gamma|$) — модуль коефіцієнта відбиття.

$$VSWR = \frac{1 + 0,026}{1 - 0,026} = 1,053$$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

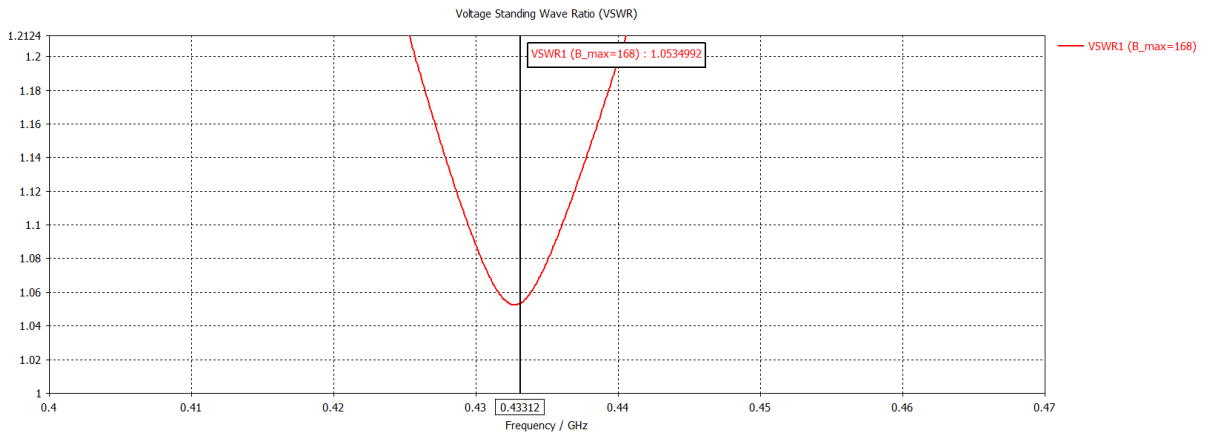


Рисунок 2.4 — Залежність VSWR Ground Plane антени від частоти

Після моделювання антени було виготовлено фізично. Конструкція складається з вертикального випромінювача та противаг, підключених до антенного роз'єму. Вертикальний елемент з'єднано з центральним провідником, а противаги — з екраном фідера. Така конструкція відповідає принципу роботи Ground Plane антени та забезпечує практичне узгодження з 50-омним радіочастотним трактом.

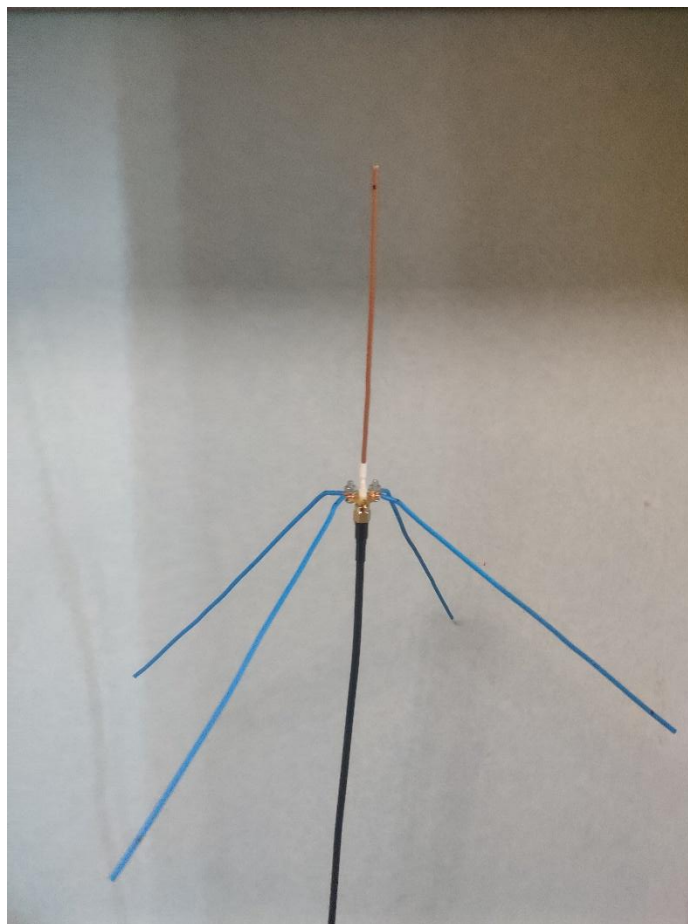


Рисунок 2.5 — Виготовлена Ground Plane антена на 433 МГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Для перевірки фактичного налаштування було виконано вимірювання параметрів антени на частотах 430,125 МГц, 433,125 МГц і 436,375 МГц. На центральній частоті 433,125 МГц отримано значення VSWR близько 1,06, що підтверджує добре узгодження антени в робочому діапазоні. На частотах 430,125 МГц і 436,375 МГц значення VSWR також залишалися меншим за 1,15, що свідчить про достатню смугу узгодження для роботи вузла в діапазоні 433 МГц.

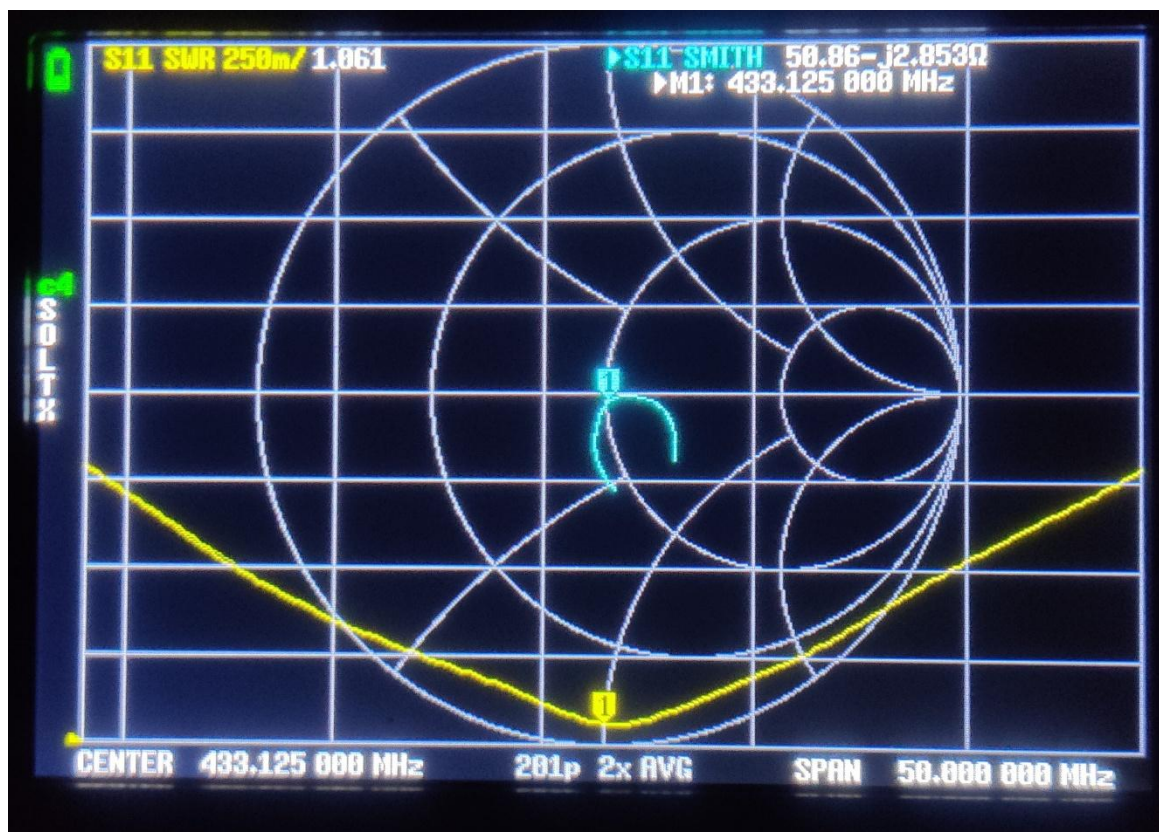


Рисунок 2.6 — Вимірювання параметрів Ground Plane антени на частоті 433,125 МГц

Таблиця 2.2 — Основні параметри Ground Plane антени 433 МГц

Параметр	Значення
Робоча частота	433,125 МГц
Довжина хвилі	0,6926 м
Теоретична довжина чвертьхвильового елемента	173 мм
Практична довжина випромінювача	164–173 мм
Орієнтовна довжина противаг	184 мм

Мінімальне S11 за моделюванням	-31,63 дБ
VSWR за моделюванням	1,053
VSWR за вимірюванням на 433,125 МГц	близько 1,06

Обрана Ground Plane антена відповідає вимогам стаціонарного радіомережевого вузла. Вона має просту конструкцію, добре узгоджується з радіочастотним трактом, може бути встановлена за межами корпусу та забезпечує роботу в діапазоні 433 МГц. Для пристрою на базі RA-02 SX1278 і підсилювача АВ-ІОТ-433 таке антенне рішення є одним із основних факторів стабільної роботи вузла в mesh-мережі.

2.5 Розроблення системи живлення з резервуванням від акумулятора

Система живлення стаціонарного радіомережевого вузла розроблена з урахуванням потреби в роботі від основного джерела живлення та резервного акумуляторного блока. Оскільки пристрій має виконувати функції стаціонарної точки mesh-мережі, його живлення повинно бути стабільним, мати запас за струмом і забезпечувати роботу радіомодуля та RF-підсилювача без просідання напруги.

У пристрої використано два Li-Ion акумулятори типорозміру 18650, модуль заряджання TP4056 та підвищувальний DC-DC перетворювач TPS61088. З урахуванням застосування TP4056 акумуляторний блок розглядається як однокомірковий блок 1S2P, у якому два елементи 18650 з'єднано паралельно. У такому випадку напруга блока відповідає напрузі одного Li-Ion елемента, а сумарна ємність дорівнює сумі ємностей окремих елементів.

Сумарна ємність акумуляторного блока визначається за формулою

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2$$

Де (C_{Σ}) — сумарна ємність акумуляторного блока;

(C_1) — ємність першого акумулятора;

(C_2) — ємність другого акумулятора.

Для двох однакових акумуляторів ємністю 3000 мА·год:

$$C_{\Sigma} = 3000 + 3000 = 6000 \text{ мА}\cdot\text{год}$$

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		36

Номинальна напруга одного Li-Ion елемента становить близько 3,7 В, а повністю зарядженого — близько 4,2 В. Для живлення вузла використовується DC-DC перетворювач TPS61088, який підвищує напругу акумуляторного блока до стабілізованого рівня 5 В. Від цієї лінії живиться мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6 та інші блоки пристрою. Для LoRa-модуля RA-02 SX1278 необхідна стабілізована напруга 3,3 В, тому його живлення повинно подаватися від відповідної стабілізованої лінії.

Коефіцієнт підвищення напруги DC-DC перетворювача визначається як

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

Де (K_U) — коефіцієнт підвищення напруги;

(U_{out}) — вихідна напруга перетворювача;

(U_{in}) — вхідна напруга від акумуляторного блока.

Для номінальної напруги акумуляторного блока ($U_{in} = 3,7$) В та вихідної напруги ($U_{out} = 5$) В:

$$K_U = \frac{5}{3,7} = 1,35$$

Потужність, споживана окремим блоком пристрою, визначається за формулою

$$P = U \cdot I$$

Де (P) — споживана потужність;

(U) — напруга живлення;

(I) — струм споживання.

Сумарна потужність вузла визначається як сума потужностей основних блоків:

$$P_{\Sigma} = P_{MCU} + P_{LoRa} + P_{PA} + P_{aux}$$

Де (P_{Σ}) — сумарна потужність вузла;

(P_{MCU}) — потужність мікроконтролерного модуля;

(P_{LoRa}) — потужність LoRa-модуля;

(P_{PA}) — потужність RF-підсилювача;

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

(P_{aux}) — потужність допоміжних елементів.

З урахуванням ККД перетворювача вхідна потужність від акумулятора визначається за формулою

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

Де (P_{in}) — потужність, що споживається від акумуляторного блока;

(P_{out}) — вихідна потужність перетворювача;

(η) — коефіцієнт корисної дії DC-DC перетворювача.

Структурна схема автономного радіомережевого вузла LoRa / Meshtastic

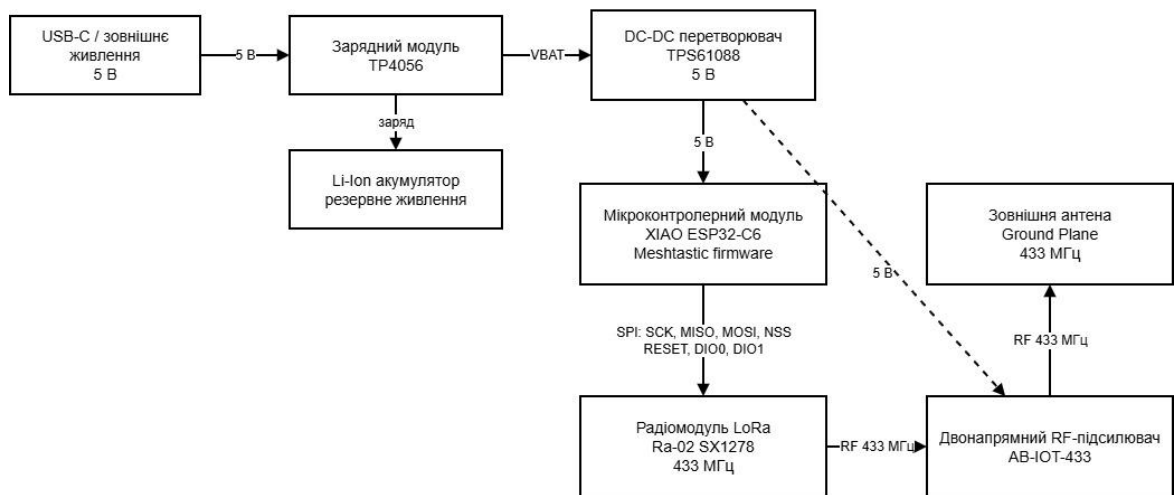


Рисунок 2.7 — Структурна схема системи живлення стаціонарного радіомережевого вузла

У схемі живлення потрібно виділити вхід 5 В, модуль заряджання TP4056, акумуляторний блок 2×18650, підвищувальний перетворювач TPS61088, лінію 5 В, стабілізовану лінію 3,3 В для RA-02 SX1278 та живлення RF-підсилювача АВ-ІОТ-433. Така структура забезпечує резервування живлення, розділення цифрової та радіочастотної частини, а також створює запас за струмом для режиму передавання.

2.6 Розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи

Для оцінки часу автономної роботи стаціонарного вузла враховано акумуляторний блок на базі двох Li-Ion елементів 18650. У розрахунку прийнято, що

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

ємність одного елемента становить 3000 мА·год, а елементи з'єднані паралельно. Тоді сумарна ємність акумуляторного блока дорівнює 6000 мА·год.

Енергія акумуляторного блока визначається за формулою

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{U_{\text{АКБ}} \cdot C_{\Sigma}}{1000}$$

Де ($E_{\text{АКБ}}$) — енергія акумуляторного блока, Вт·год;

($U_{\text{АКБ}}$) — номінальна напруга акумуляторного блока, В;

(C_{Σ}) — сумарна ємність акумуляторів, мА·год.

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{3,7 \cdot 6000}{1000} = 22,2 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням ККД DC-DC перетворювача корисна енергія становить

$$E_{\text{out}} = E_{\text{АКБ}} \cdot \eta$$

Де (E_{out}) — корисна енергія після перетворення;

(η) — ККД перетворювача.

Для ($\eta = 0,85$):

$$E_{\text{out}} = 22,2 \cdot 0,85 = 18,87 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Оскільки вузол не передає сигнал постійно, середня споживана потужність визначається з урахуванням частки часу передавання:

$$P_{\text{avg}} = P_{\text{st}} \cdot (1 - D) + P_{\text{tx}} \cdot D$$

Де (P_{avg}) — середня споживана потужність;

(P_{st}) — потужність у режимі очікування;

(P_{tx}) — потужність у режимі передавання;

(D) — частка часу передавання.

Для орієнтовного розрахунку прийнято ($P_{\text{st}} = 0,6$)Вт, ($P_{\text{tx}} = 3,5$) Вт, ($D = 0,1$):

$$P_{\text{avg}} = 0,6 \cdot (1 - 0,1) + 3,5 \cdot 0,1 = 0,89 \text{ Вт}$$

Час автономної роботи визначається за формулою

$$t = \frac{E_{\text{out}}}{P_{\text{avg}}}$$

$$t = \frac{18,87}{0,89} = 21,2 \text{ год}$$

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		39

Отже, за прийнятих параметрів акумуляторний блок 2×18650 може забезпечити приблизно 21 годину автономної роботи. Фактичний час залежить від ємності використаних акумуляторів, активності передавання, роботи RF-підсилювача, налаштувань Meshtastic та навантаження на мережу.

2.7 Розрахунок бюджету радіолінії

Бюджет радіолінії дозволяє оцінити, чи буде рівень сигналу на вході приймача достатнім для приймання LoRa-пакетів. У розрахунку враховано частоту 433,125 МГц, підсилення антени, втрати у фідері, втрати у вільному просторі та чутливість приймача. Для оцінки прийнято чутливість приймача ($S_{\{RX\}} = -130$) дБм, що відповідає консервативному значенню для LoRa-режиму з підвищеною дальністю.

Потужність RF-підсилювача АВ-ІОТ-433 становить до 2,3 Вт. Для переведення потужності у дБм використовується формула

$$P_{dBm} = 10 \lg(P_{mW})$$

Де (P_{dBm}) — потужність у дБм;

(P_{mW}) — потужність у мВт.

$$P_{mW} = 2,3 \cdot 1000 = 2300 \text{ мВт}$$

$$P_{dBm} = 10 \lg(2300) = 33,6 \text{ дБм}$$

Втрати у вільному просторі визначаються за формулою

$$L_{FS} = 32,44 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d)$$

Де (L_{FS}) — втрати у вільному просторі, дБ;

(f) — частота, МГц;

(d) — відстань, км.

Для частоти ($f = 433,125$) МГц та відстані ($d = 1$) км:

$$L_{FS} = 32,44 + 20 \lg(433,125) + 20 \lg(1) = 85,17 \text{ дБ}$$

Рівень сигналу на вході приймача визначається за формулою

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{\Sigma} - L_{FS}$$

Де (P_{RX}) — потужність сигналу на вході приймача, дБм;

(P_{TX}) — вихідна потужність передавача, дБм;

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		40

(G_{TX}) — підсилення передавальної антени, дБі;

(G_{RX}) — підсилення приймальної антени, дБі;

(L_{Σ}) — сумарні втрати у фідері, з'єднаннях та узгодженні, дБ;

(L_{FS}) — втрати у вільному просторі, дБ.

Для нормативного варіанта прийнято $(P_{TX} = 10)$ дБм, $(G_{TX} = 2)$ дБі, $(G_{RX} = 2)$ дБі, $(L_{\Sigma} = 2)$ дБ:

$$P_{RX} = 10 + 2 + 2 - 2 - 85,17 = -73,17 \text{ дБм}$$

Запас радіолінії визначається за формулою

$$M = P_{RX} - S_{RX}$$

Де (M) — запас радіолінії, дБ;

(P_{RX}) — рівень сигналу на вході приймача, дБм;

(S_{RX}) — чутливість приймача, дБм.

$$M = -73,17 - (-130) = 56,83 \text{ дБ}$$

Для технічного варіанта з RF-підсилювачем АВ-ІОТ-433 прийнято $(P_{TX} = 33,6)$ дБм:

$$P_{RX} = 33,6 + 2 + 2 - 2 - 85,17 = -49,57 \text{ дБм}$$

$$M = -49,57 - (-130) = 80,43 \text{ дБ}$$

Таблиця 2.3 — Оцінка бюджету радіолінії для різних відстаней

Відстань, км	(L_{FS}) , дБ	(P_{RX}) , дБм, нормативний режим	Запас, дБ	(P_{RX}) , дБм, з АВ-ІОТ-433	Запас, дБ
1	85,17	-73,17	56,83	-49,57	80,43
5	99,15	-87,15	42,85	-63,55	66,45
10	105,17	-93,17	36,83	-69,57	60,43

Результати розрахунку показують, що навіть у нормативному режимі радіолінія має значний запас за рівнем сигналу в умовах вільного простору. Технічний режим із підсилювачем АВ-ІОТ-433 створює більший запас, однак фактичне застосування такої потужності повинно враховувати допустимі обмеження для вибраного частотного діапазону. Практична дальність зв'язку буде меншою за розрахункову через рельєф місцевості, забудову, висоту встановлення антени, втрати в кабелі, завади та якість узгодження антени.

2.8 Оцінка впливу антени, висоти встановлення та параметрів передавання на дальність зв'язку

Розрахунок бюджету радіолінії показує енергетичний запас каналу, однак фактична дальність зв'язку залежить не лише від потужності передавання. Для стаціонарного LoRa-вузла важливими є висота встановлення антени, наявність прямої видимості, узгодження антени, втрати у фідері, рельєф місцевості, забудова та вибрані параметри LoRa.

Одним із головних чинників є висота встановлення Ground Plane антени. Орієнтовна відстань до радіогоризонту визначається за формулою

$$d = 3,57\sqrt{h}$$

Де (d) — відстань до радіогоризонту, км;

(h) — висота встановлення антени, м.

Якщо антена стаціонарного вузла встановлена на висоті (h=10) м, то

$$d = 3,57\sqrt{10} = 11,29 \text{ км}$$

Для двох вузлів із висотами антен (h_1) та (h_2) сумарна відстань прямої видимості визначається як

$$d_{\Sigma} = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

Де (d_{Σ}) — сумарна відстань прямої видимості між двома антенами;

(h_1) — висота антени першого вузла;

(h_2) — висота антени другого вузла.

Для стаціонарного вузла з антеною на висоті ($h_1 = 10$) м та другого вузла з антеною на висоті ($h_2 = 1,5$) м:

$$d_{\Sigma} = 3,57(\sqrt{10} + \sqrt{1,5}) = 15,66 \text{ км}$$

Таблиця 2.4 — Орієнтовна дальність прямої видимості залежно від висоти антени стаціонарного вузла

Висота антени стаціонарного вузла, м	Висота антени другого вузла, м	Орієнтовна відстань прямої видимості, км
5	1,5	12,36
10	1,5	15,66

15	1,5	17,48
----	-----	-------

Ще одним важливим чинником є зона Френеля. Навіть за наявності прямої видимості перешкоди в зоні між антенами можуть створювати додаткове загасання. Радіус першої зони Френеля в середині траси можна оцінити за формулою

$$r_1 = 17,32 \sqrt{\frac{d}{4f}}$$

Де (r_1) — радіус першої зони Френеля, м;

(d) — довжина траси, км;

(f) — частота, ГГц.

Для траси довжиною $(d = 10)$ км та частоти $(f = 0,433)$ ГГц:

$$r_1 = 17,32 \sqrt{\frac{10}{4 \cdot 0,433}} = 41,6 \text{ м}$$

Це означає, що на великих відстанях перешкоди поблизу траси можуть суттєво зменшити рівень сигналу навіть за достатнього бюджету радіолінії.

Додатково на дальність впливають параметри LoRa. Збільшення коефіцієнта розширення спектра (SF) підвищує чутливість приймання, але збільшує час передавання пакета. Зменшення ширини смуги (BW) також може покращити чутливість, однак зменшує швидкість передавання. Через це для стаціонарного вузла доцільно використовувати збалансований режим, наприклад LongFast, який забезпечує поєднання дальності та прийнятної швидкості обміну повідомленнями.

Втрати у вільному просторі зростають логарифмічно зі збільшенням відстані:

$$\Delta L = 20 \lg\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

Де (ΔL) — приріст втрат, дБ;

(d_1) — початкова відстань;

(d_2) — збільшена відстань.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		43

При збільшенні відстані у два рази:

$$\Delta L = 20 \lg(2) = 6,02 \text{ дБ}$$

Отримані оцінки показують, що для збільшення практичної дальності важливо не лише підвищувати потужність передавача, а й правильно встановлювати антену. Винесення Ground Plane антени за межі корпусу, її встановлення на більшій висоті та якісне узгодження з радіочастотним трактом мають безпосередній вплив на стабільність зв'язку. Саме тому в розробленому пристрої використано зовнішню Ground Plane антену 433 МГц, а не компактну вбудовану антену.

2.9 Розроблення електричної принципової схеми

На основі структурної схеми було розроблено електричну принципову схему стаціонарного радіомережевого вузла. Схема відображає електричні з'єднання між мікроконтролерним модулем, LoRa-модулем, RF-підсилювачем, системою живлення, акумуляторним блоком та антенною. Основна задача принципової схеми полягає в уточненні реальних підключень між функціональними блоками пристрою.

Центральним керуючим елементом схеми є модуль XIAO ESP32-C6. До нього підключено LoRa-модуль RA-02 SX1278, який забезпечує радіообмін у діапазоні 433 МГц. Зв'язок між мікроконтролером і LoRa-модулем реалізовано через інтерфейс SPI. Для цього використано сигнальні лінії SCK, MISO, MOSI, NSS, RESET, DIO0 та DIO1. Таке підключення відповідає типовій схемі взаємодії мікроконтролера з LoRa-трансивером SX1278.

Радіочастотний тракт пристрою побудовано за послідовністю: RA-02 SX1278 — RF-підсилювач AB-IOT-433 — зовнішня Ground Plane антена 433 МГц. Вихід LoRa-модуля підключено до входу підсилювача, а вихід підсилювача з'єднано з антенною через відповідний високочастотний роз'єм. Таке рішення забезпечує окреме виділення радіочастотної частини пристрою та спрощує підключення зовнішньої антени.

Система живлення на принциповій схемі складається з вхідного роз'єму живлення, модуля заряджання TP4056, акумуляторного блока та DC-DC

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		44

перетворювача TPS61088. Модуль TP4056 забезпечує заряджання акумуляторного блоку, а TPS61088 формує стабілізовану лінію живлення для основних вузлів пристрою. Для LoRa-модуля RA-02 необхідна стабільна напруга 3,3 В, тому живлення радіомодуля повинно бути відокремлене від силових імпульсних ділянок схеми.

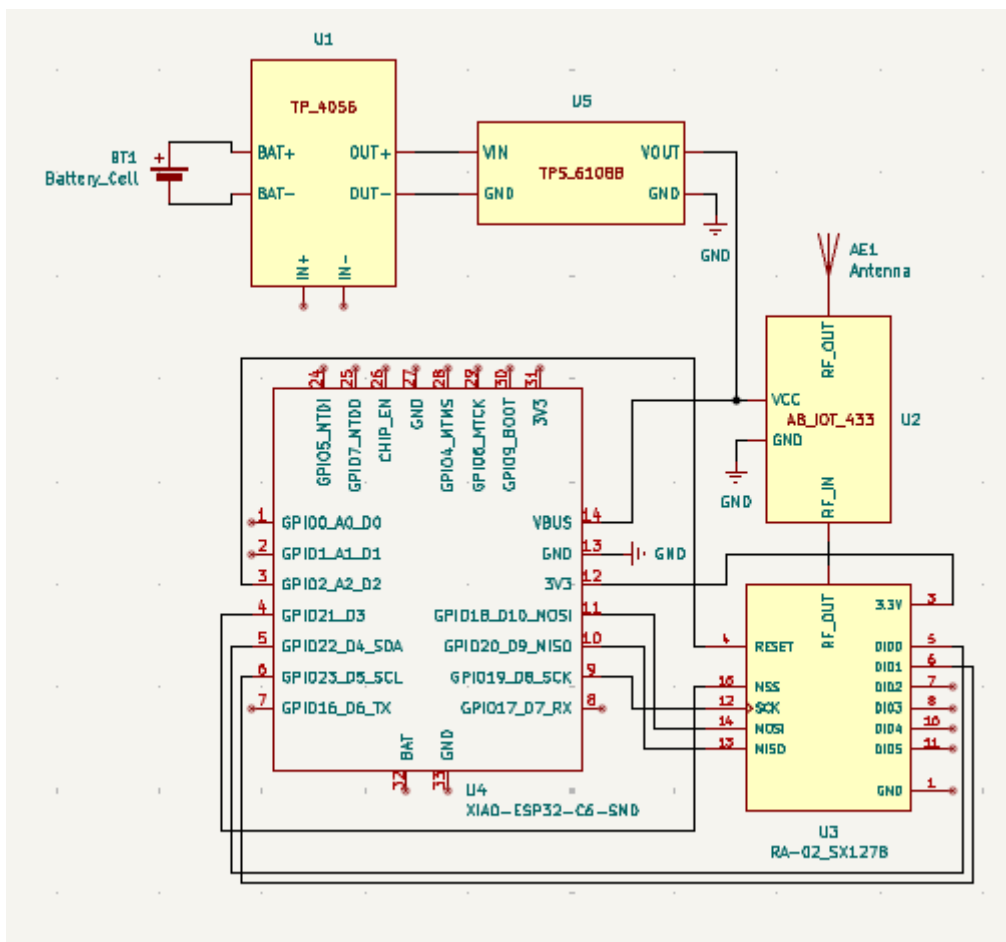


Рисунок 2.8 — Електрична принципова схема стаціонарного радіомережевого вузла

Для перевірки достатності живлення використовується умова струмового запасу джерела:

$$I_{max} \geq I_{\Sigma}$$

Де (I_{max}) — максимально допустимий вихідний струм джерела або перетворювача;

(I_{Σ}) — сумарний струм споживання всіх вузлів пристрою.

Сумарний струм споживання визначається за формулою

$$I_{\Sigma} = I_{MCU} + I_{LoRa} + I_{PA} + I_{aux}$$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

Де (I_{MCU}) — струм споживання мікроконтролерного модуля;
 (I_{LoRa}) — струм споживання LoRa-модуля;
 (I_{PA}) — струм споживання RF-підсилювача;
 (I_{aux}) — струм допоміжних елементів.

Коефіцієнт запасу за струмом визначається як

$$K_I = \frac{I_{max}}{I_{\Sigma}}$$

Де (K_I) — коефіцієнт запасу за струмом;
 (I_{max}) — максимально допустимий струм джерела;
 (I_{Σ}) — сумарний струм споживання.

Для надійної роботи пристрою значення (K_I) повинно бути більшим за одиницю. Це означає, що джерело живлення або DC-DC перетворювач має забезпечувати струм, більший за сумарне споживання мікроконтролера, LoRa-модуля, підсилювача та допоміжних елементів.

Під час розроблення принципової схеми враховано необхідність спільної землі для всіх модулів, розділення сигнальних і силових ланцюгів, скорочення довжини високочастотного тракту та забезпечення стабільного живлення LoRa-модуля. Особливу увагу приділено підключенню RF-підсилювача та антени, оскільки втрати й неякісне узгодження в цій частині можуть погіршити роботу всього вузла.

2.10 Обґрунтування конструктивного виконання пристрою

Конструктивне виконання стаціонарного радіомережевого вузла було обрано з урахуванням його призначення, складу електронних модулів, наявності зовнішньої антени та потреби в резервному живленні. На відміну від компактних переносних Meshtastic-пристроїв, розроблений вузол призначений для тривалої роботи в одному місці, тому основні модулі розміщено в окремому корпусі.

Усередині корпусу розташовано мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-S6, LoRa-модуль RA-02 SX1278, RF-підсилювач AB-IOT-433, модуль заряджання TP4056, DC-DC перетворювач TPS61088 та акумуляторний блок на

					PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		46

базі двох Li-Ion елементів 18650. Таке компонування дозволяє розділити керуючу, радіочастотну та силову частини пристрою. Радіочастотний тракт виконано за найкоротшим можливим шляхом від LoRa-модуля до підсилювача та антенного роз'єму.

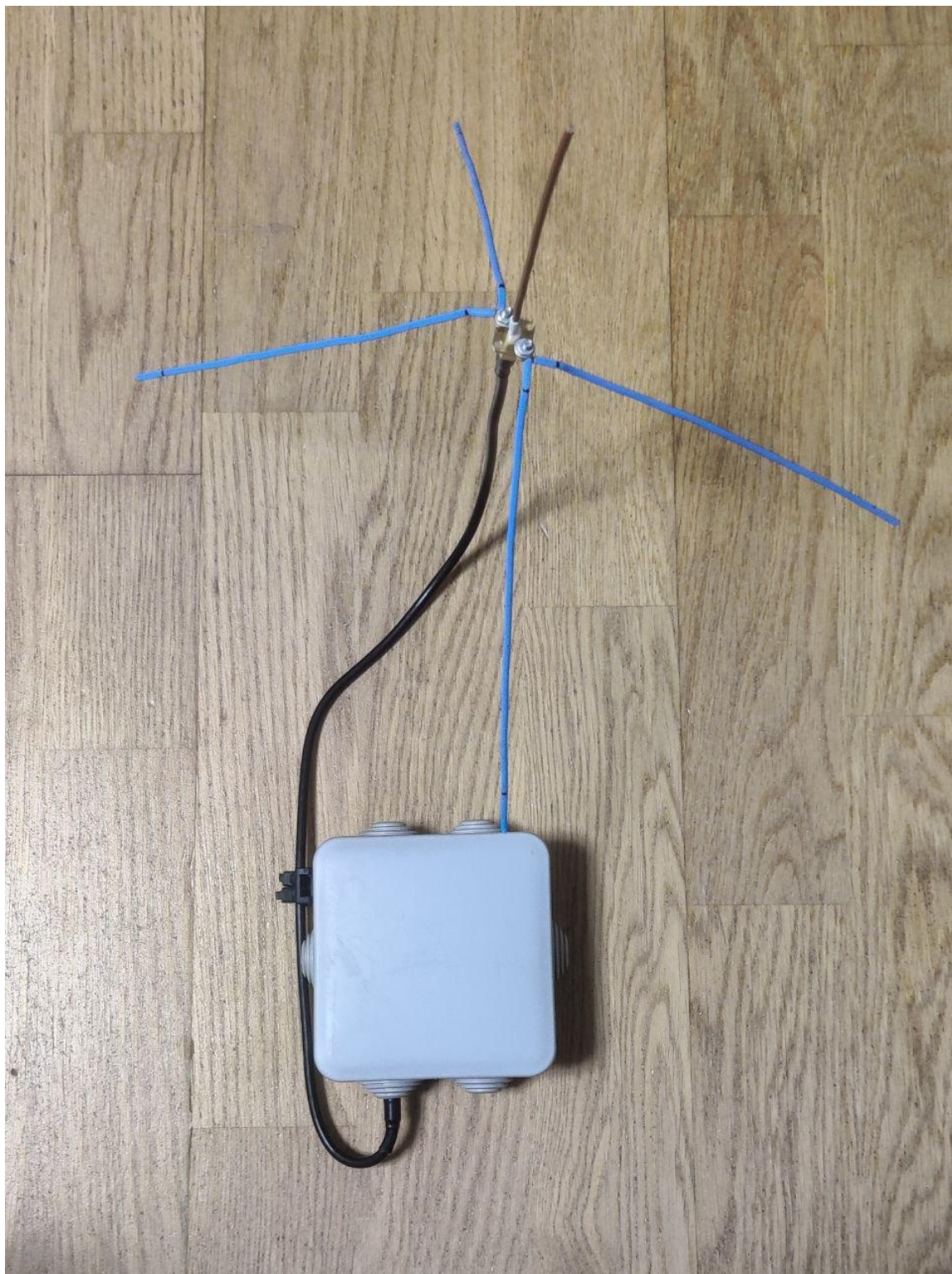


Рисунок 2.9 — Зовнішній вигляд зібраного стаціонарного радіомережевого вузла

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис
47

Зовнішня Ground Plane антена винесена за межі корпусу. Це зменшує вплив електронних модулів, акумуляторів і проводів на роботу антени та покращує умови випромінювання. Крім того, зовнішнє розміщення антени дає змогу встановлювати її вище від рівня корпусу, що позитивно впливає на дальність зв'язку та стабільність приймання пакетів.

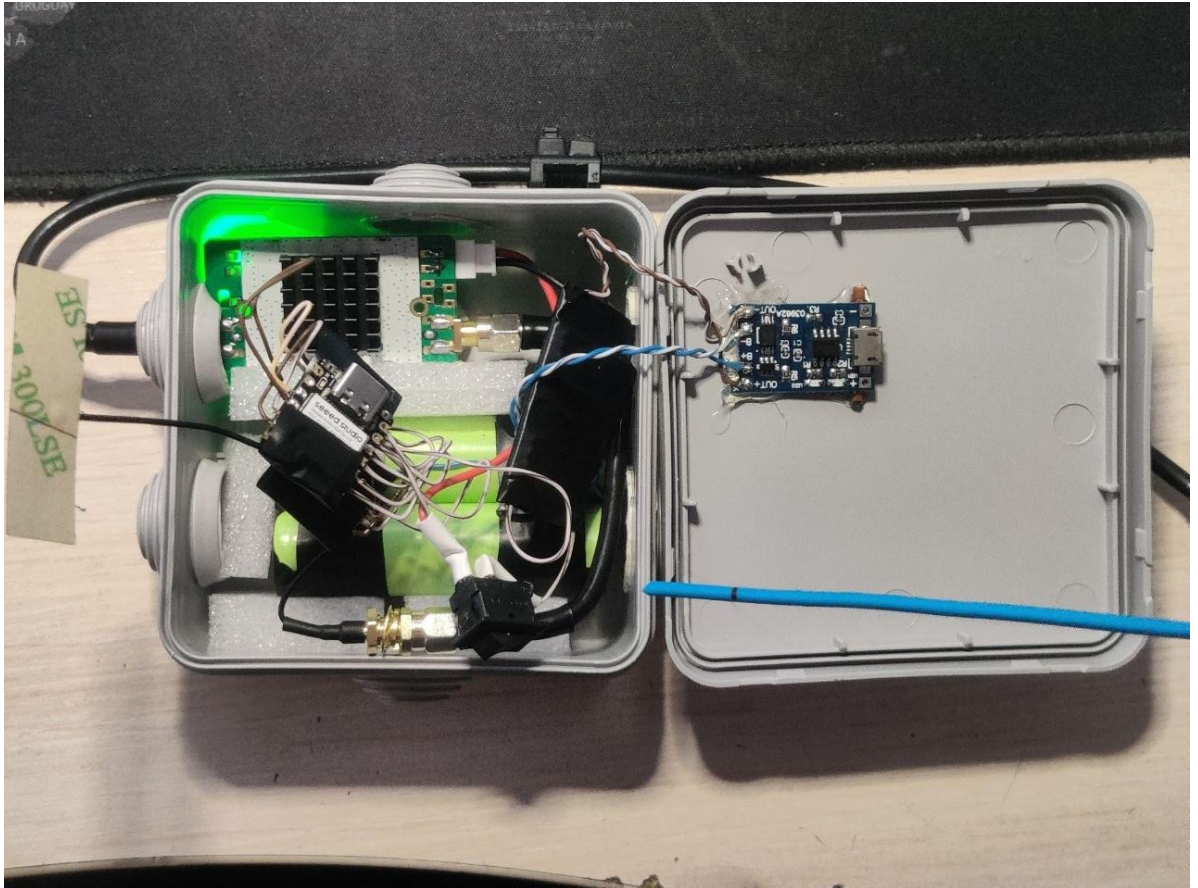


Рисунок 2.10 — Внутрішнє компонування стаціонарного радіомережевого вузла

Під час компонування пристрою було враховано необхідність доступу до роз'єму живлення, антенного підключення, акумуляторного блока та основних модулів. Це спрощує обслуговування пристрою, перевірку з'єднань, заміну акумуляторів і подальше налагодження програмного забезпечення.

Окрему увагу приділено тепловому режиму RF-підсилювача та DC-DC перетворювача, оскільки ці елементи можуть мати підвищені втрати потужності під час роботи. Потужність втрат у перетворювачі можна оцінити за формулою

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис

48

$$P_{loss} = P_{out} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

Де (P_{loss}) — потужність втрат, що переходить у тепло;

(P_{out}) — вихідна потужність перетворювача;

(η) — коефіцієнт корисної дії перетворювача.

Для прикладу, якщо вихідна потужність становить ($P_{out} = 3$) Вт, а ККД перетворювача ($\eta = 0,85$), то

$$P_{loss} = 3 \left(\frac{1}{0,85} - 1 \right) = 0,53 \text{ Вт}$$

Отримане значення показує, що частина енергії перетворюється в тепло, тому силові елементи не повинні бути щільно закриті іншими деталями. У конструкції пристрою модулі розміщено так, щоб забезпечити доступ повітря та зменшити взаємний тепловий вплив.

Для провідників живлення також враховується допустиме струмове навантаження. Мінімальний переріз провідника можна оцінити за формулою

$$S = \frac{I}{J}$$

Де (S) — мінімальний переріз провідника, мм²;

(I) — струм навантаження, А;

(J) — допустима густина струму, А/мм².

Для струму ($I = 1$) А та допустимої густини струму ($J = 5$) А/мм²:

$$S = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ мм}^2$$

Конструктивне виконання пристрою відповідає його функції стаціонарного вузла. Корпус забезпечує розміщення електронних модулів і акумуляторного блока, зовнішня антена покращує умови радіозв'язку, а модульна будова спрощує складання, перевірку та подальше обслуговування пристрою.

2.11 Висновки до розділу 2

У розділі було виконано проектування стаціонарного радіомережевого вузла на базі технології LoRa. Було обґрунтовано структурну схему пристрою,

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		49

визначено склад основних функціональних блоків і показано взаємозв'язок між мікроконтролерною, радіочастотною, антенною та силовою частинами.

Для реалізації вузла використано мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6, LoRa-модуль RA-02 на базі SX1278, RF-підсилювач АВ-ІОТ-433, модуль заряджання TP4056, DC-DC перетворювач TPS61088, акумуляторний блок на базі двох Li-Ion елементів 18650 та зовнішню Ground Plane антену 433 МГц. Така структура відповідає призначенню пристрою як стаціонарної точки mesh-мережі.

Було обґрунтовано вибір частотного діапазону 433 МГц і виконано розрахунок основних параметрів радіоканалу. Для антени було визначено довжину хвилі, розміри чвертьхвильового випромінювача та противаг. Ground Plane антену було змодельовано в CST, після чого виконано її виготовлення та перевірку параметрів. За результатами моделювання отримано значення (S_{11}) близько $-31,63$ дБ і VSWR близько 1,053 на частоті 433,12 МГц, що підтверджує добре узгодження антени.

Було розроблено систему живлення з резервуванням від акумуляторного блока, виконано розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи. За прийнятих параметрів акумуляторний блок 2×18650 може забезпечити приблизно 21 годину автономної роботи. Також було виконано розрахунок бюджету радіолінії для нормативного режиму та технічного режиму з використанням підсилювача АВ-ІОТ-433.

Розроблено електричну принципову схему та обґрунтовано конструктивне виконання пристрою. Основні модулі розміщено в окремому корпусі, а антену винесено за його межі. Обране конструктивне рішення забезпечує зручність монтажу, підключення зовнішньої антени, резервне живлення та можливість використання вузла як стаціонарної точки автономної mesh-мережі.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		50

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РАДІОМЕ- РЕЖЕВОГО ВУЗЛА

3.1 Мета, умови та засоби експериментальної перевірки

Метою експериментальної перевірки було підтвердження працездатності зібраного стаціонарного радіомережевого вузла на базі технології LoRa та програмного забезпечення Meshtastic. Під час перевірки оцінювалася правильність складання пристрою, працездатність антенного тракту, можливість виявлення вузла в мережі Meshtastic та передавання тестових повідомлень між вузлами.

Перевірка виконувалася в лабораторних умовах у межах однієї кімнати. Як базовий вузол використовувався зібраний пристрій із Ground Plane антеною на 433 МГц. Для перевірки обміну повідомленнями використовувався другий вузол Heltec V3 з ідентифікатором ede8 у мережі Meshtastic. Такий варіант перевірки дозволив підтвердити працездатність апаратної та програмної частини без визначення максимальної дальності зв'язку.

До основних засобів перевірки належали зібраний стаціонарний вузол, зовнішня Ground Plane антена 433 МГц, вузол Heltec V3, мобільний застосунок Meshtastic, результати моделювання антени в CST та вимірювання параметрів антени за допомогою векторного аналізатора кіл. Основними контрольованими параметрами були (S_{11}), VSWR, RSSI, SNR та факт успішного передавання повідомлень.

Таблиця 3.1 — Умови та засоби експериментальної перевірки

Параметр	Значення
Місце перевірки	приміщення, одна кімната
Перевірюваний пристрій	стаціонарний вузол LoRa / Meshtastic
Антена	Ground Plane 433 МГц
Другий вузол	Heltec V3, Meshtastic ede8
Програмне забезпечення	Meshtastic
Контрольовані параметри	(S_{11}), VSWR, RSSI, SNR
Мета перевірки зв'язку	підтвердження передавання повідомлень

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис

51

Проведена перевірка була спрямована на підтвердження базової працездатності пристрою. Оцінювання граничної дальності зв'язку не виконувалося, оскільки для цього потрібні окремі польові випробування з різними відстанями, висотою встановлення антени та умовами поширення радіохвиль.

3.2 Перевірка параметрів Ground Plane антени

Після виготовлення Ground Plane антени було виконано перевірку її параметрів у діапазоні поблизу робочої частоти 433 МГц. Метою перевірки було визначення якості узгодження антени з радіочастотним трактом та підтвердження можливості її використання у складі стаціонарного радіомережевого вузла.

Основними контрольованими параметрами були коефіцієнт стоячої хвилі VSWR, комплексний вхідний опір антени та положення точки найкращого узгодження. Перевірка проводилася на частотах 430,125 МГц, 433,125 МГц і 436,375 МГц. Робочою частотою для вузла було прийнято 433,125 МГц, оскільки вона знаходиться в межах діапазону 433 МГц і відповідає налаштуванню виготовленої антени.

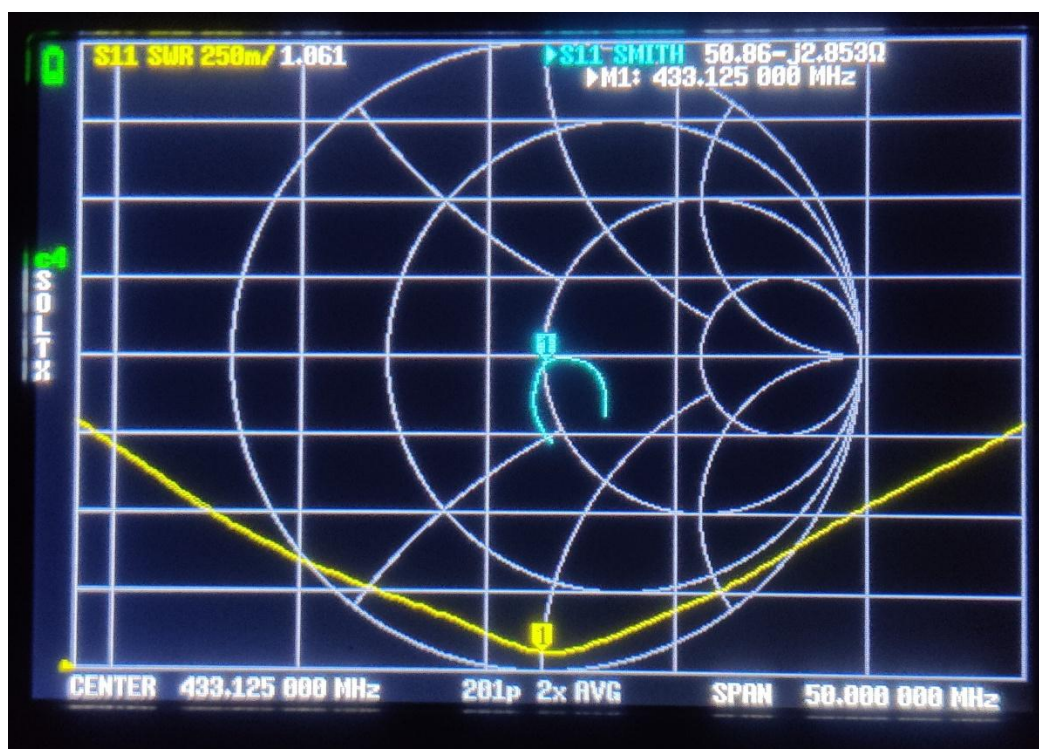


Рисунок 3.1 — Вимірювання параметрів Ground Plane антени на частоті 433,125 МГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

За результатами вимірювання на частоті 433,125 МГц отримано значення VSWR близько 1,06. Комплексний опір антени становив приблизно 50 Ом з невеликою реактивною складовою. Це свідчить про добре узгодження антени з 50-омним радіочастотним трактом.

Таблиця 3.2 — Результати перевірки параметрів Ground Plane антени

Частота, МГц	VSWR	Комплексний опір, Ом	Оцінка результату
430,125	1,110	$47,17 - j4,22$	прийнятне узгодження
433,125	1,059– 1,061	близько 50 – j3	найкраще узгодження
436,375	1,147	$57,26 - j1,20$	прийнятне узгодження

Отримані результати показують, що в межах перевіреного частотного діапазону значення VSWR не перевищує 1,15. Для практичного використання це є добрим результатом, оскільки більша частина потужності передавача надходить до антени, а відбита потужність залишається незначною.

Порівняння результатів вимірювання з попереднім моделюванням показує, що виготовлена антена має робочу точку поблизу 433 МГц. Це підтверджує правильність вибору конструкції Ground Plane антени, її розрахункових розмірів і можливість використання в радіомережевому вузлі на базі RA-02 SX1278 та RF-підсилювача АВ-ІОТ-433.

3.3 Перевірка роботи вузла в мережі Meshtastic

Після перевірки антени було виконано перевірку роботи радіомережевого вузла в середовищі Meshtastic. Метою цього етапу було підтвердження можливості виявлення вузла в мережі, обміну повідомленнями та отримання параметрів якості радіозв'язку.

Перевірка виконувалася в межах однієї кімнати. Як базовий вузол використовувався зібраний пристрій із зовнішньою Ground Plane антеною 433 МГц.

Другим вузлом був Heltec V3 з ідентифікатором ede8. Зв'язок між вузлами перевірявся за допомогою мобільного застосунку Meshtastic.

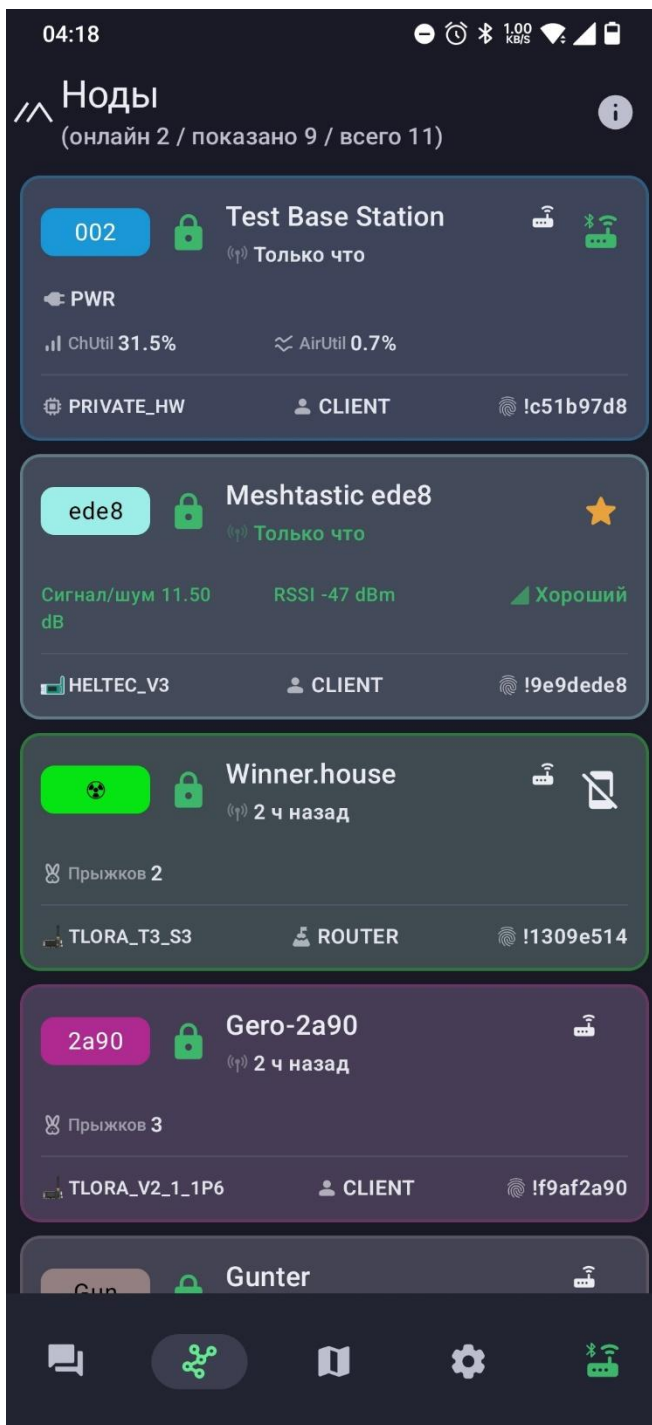


Рисунок 3.2 — Виявлення вузлів у мережі Meshtastic

На екрані застосунку Meshtastic було виявлено базову станцію Test Base Station та вузол Meshtastic ede8. Для вузла ede8 відображались параметри сигналу: RSSI близько -47 дБм і SNR $11,50$ дБ. Стан зв'язку в застосунку позначено як хороший, що підтверджує стабільний прийом сигналу в умовах перевірки.

Додатково було виконано передавання тестових повідомлень між вузлами. У чаті Meshtastic зафіксовано приймання кількох повідомлень із різними значеннями RSSI та SNR.

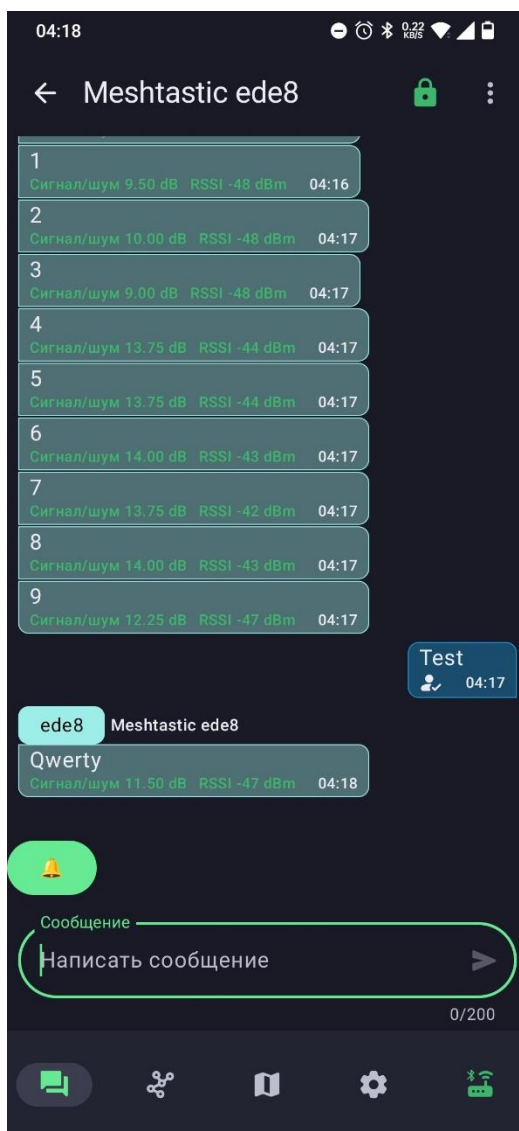


Рисунок 3.3 — Передавання тестових повідомлень у Meshtastic

Таблиця 3.3 — Результати перевірки роботи вузла в Meshtastic

Параметр	Значення
Умови перевірки	одна кімната
Базовий вузол	Test Base Station
Другий вузол	Heltec V3, Meshtastic ede8
Роль другого вузла	CLIENT
RSSI	від -48 до -42 дБм
SNR	від 9 до 14 дБ

Передавання повідомлень	виконано успішно
Оцінка якості зв'язку	хороший рівень сигналу

Отримані результати підтверджують працездатність програмної та радіочастотної частини вузла. Пристрій був виявлений у мережі Meshtastic, а тестові повідомлення були передані успішно. Значення RSSI та SNR відповідають стабільному зв'язку в межах приміщення. Перевірка підтвердила базову працездатність вузла, однак не визначала максимальну дальність роботи, оскільки для цього потрібні окремі польові випробування.

3.4 Узагальнення результатів експериментальної перевірки

За результатами виконаної експериментальної перевірки було підтверджено працездатність основних частин стаціонарного радіомережевого вузла. Перевірка охоплювала антену, апаратну частину пристрою та роботу в мережі Meshtastic. Основна увага приділялася підтвердженню того, що зібраний пристрій може працювати як вузол LoRa mesh-мережі, передавати повідомлення та використовувати зовнішню Ground Plane антену на 433 МГц.

У процесі перевірки було встановлено, що виготовлена Ground Plane антена має добре узгодження в робочому діапазоні. На частоті 433,125 МГц значення VSWR становило приблизно 1,06, що є прийнятним для практичного використання. Також було підтверджено, що вузол визначається в застосунку Meshtastic і забезпечує обмін тестовими повідомленнями з іншим вузлом Heltec V3.

Таблиця 3.4 — Узагальнені результати експериментальної перевірки

Етап перевірки	Отриманий результат	Оцінка
Перевірка конструкції	пристрій зібрано в корпусі	виконано
Перевірка антени	VSWR близько 1,06 на 433,125 МГц	позитивний результат
Перевірка Meshtastic	вузол виявлено в мережі	виконано

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

Лис

56

Передавання повідомлень	тестові повідомлення передано успішно	позитивний результат
RSSI	від -48 до -42 дБм	стабільний сигнал у кімнаті
SNR	від 9 до 14 дБ	прийнятна якість приймання

Отримані результати підтверджують, що апаратна та програмна частини пристрою працюють узгоджено. Вузол виконує основні функції: запускається, використовує зовнішню антену, виявляється в мережі Meshtastic і забезпечує передавання повідомлень. Перевірка виконувалася в умовах приміщення, тому отримані результати підтверджують базову працездатність пристрою, але не визначають максимальну дальність зв'язку.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі було виконано експериментальну перевірку працездатності стаціонарного радіомережевого вузла на базі технології LoRa. Перевірка охоплювала основні елементи пристрою: антенний тракт, зібрану апаратну частину та роботу в мережі Meshtastic.

За результатами перевірки Ground Plane антени встановлено, що на частоті 433,125 МГц значення VSWR становить близько 1,06. Це підтверджує добре узгодження антени з радіочастотним трактом і можливість її використання у складі пристрою.

Перевірка роботи в Meshtastic показала, що вузол визначається в мережі та забезпечує передавання тестових повідомлень. Під час обміну повідомленнями були отримані значення RSSI від -48 до -42 дБм та SNR від 9 до 14 дБ, що відповідає стабільному зв'язку в умовах приміщення.

Отримані результати підтверджують базову працездатність розробленого радіомережевого вузла. Пристрій може виконувати функції стаціонарної точки mesh-мережі, однак визначення максимальної дальності зв'язку потребує окремої перевірки в польових умовах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ

4.1 Аналіз умов безпечного виконання робіт

Під час виготовлення стаціонарного радіомережевого вузла виконувалися роботи, пов'язані з монтажем електронних модулів, паянням провідників, підключенням акумуляторного блока, перевіркою електричних з'єднань та складанням пристрою в корпус. Такі роботи належать до робіт із низьковольтним електронним обладнанням, однак вони все одно потребують дотримання правил безпеки.

Основними потенційно небезпечними чинниками під час складання пристрою є нагрів паяльника, можливість опіку, утворення диму під час паяння, ризик короткого замикання, неправильне підключення полярності живлення, пошкодження Li-Ion акумуляторів, нагрів DC-DC перетворювача та RF-підсилювача. Також необхідно враховувати можливість механічного пошкодження проводів або роз'ємів під час монтажу в корпусі.

Робоче місце для складання пристрою повинно бути сухим, добре освітленим і провітрюваним. На поверхні не повинно бути зайвих металевих предметів, які можуть спричинити коротке замикання. Під час паяння необхідно використовувати справний паяльник, стійку для нього, теплоізольовану ручку та засоби для відведення диму або провітрювання приміщення. Перевірка з'єднань повинна виконуватися до подавання живлення на пристрій.

Перед підключенням акумуляторного блока необхідно перевірити полярність живлення, цілісність ізоляції проводів і правильність підключення модуля заряджання TP4056. Під час складання не допускається замикання виводів акумуляторів, оскільки Li-Ion елементи можуть віддавати значний струм. Підключення RF-підсилювача АВ-ІОТ-433 повинно виконуватися з підключеною антеною або навантаженням, щоб уникнути роботи радіочастотного тракту в ненормальному режимі.

Таблиця 4.1 — Основні небезпечні чинники під час складання пристрою

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		58

Небезпечний чинник	Можливий наслідок	Захід безпеки
Нагрітий паяльник	опік, пошкодження проводів	використання стійки та обережне поводження
Дим під час паяння	подразнення органів дихання	провітрювання робочого місця
Коротке замикання	пошкодження модулів або акумуляторів	перевірка з'єднань до подавання живлення
Неправильна полярність	вихід модулів із ладу	контроль полярності перед підключенням
Li-Ion акумулятори	нагрів або пошкодження елементів	недопущення замикання та механічного пошкодження
RF-підсилювач	нагрів і перевантаження	робота з підключеною антеною або навантаженням

Дотримання цих заходів зменшує ризик пошкодження електронних компонентів і забезпечує безпечне виконання монтажних робіт під час складання стаціонарного радіомережевого вузла.

4.2 Електробезпека та безпечне використання акумуляторів

Розроблений радіомережевий вузол належить до низьковольтних електронних пристроїв. Основні напруги живлення в схемі становлять 3,3 В і 5 В, тому небезпека ураження електричним струмом є низькою. Водночас під час роботи з Li-Ion акумуляторами та імпульсними перетворювачами необхідно враховувати ризик короткого замикання, перегрівання, неправильного підключення полярності та пошкодження електронних модулів.

У пристрої використано акумуляторний блок на базі двох елементів 18650, модуль заряджання TP4056 та підвищувальний DC-DC перетворювач TPS61088. Li-Ion акумулятори мають значну енергоємність і здатні віддавати великий струм під час короткого замикання. Тому під час монтажу необхідно забезпечити надійну ізоляцію провідників, правильну полярність підключення та відсутність механічного пошкодження елементів.

					PI-p31.XXXXXXX.001 ПЗ	<i>Лис</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

Струм короткого замикання можна оцінити за законом Ома:

$$I_{SC} = \frac{U_{АКБ}}{R_{SC}}$$

Де (I_{SC}) — струм короткого замикання;

($U_{АКБ}$) — напруга акумуляторного блока;

(R_{SC}) — опір кола короткого замикання.

З формули видно, що за малого опору короткого замикання струм може бути значним навіть при напрузі 3,7–4,2 В. Через це контакти акумуляторів повинні бути ізольовані, а монтаж необхідно виконувати без випадкового торкання плюсової та мінусової ліній металевими предметами.

Під час заряджання акумуляторного блока модуль TP4056 повинен бути підключений відповідно до полярності. Не допускається заряджання пошкоджених, перегрітих або деформованих акумуляторів. При виявленні нагрівання, здуття або нестабільної роботи елементів живлення експлуатацію пристрою необхідно припинити.

Окрему увагу потрібно приділяти DC-DC перетворювачу TPS61088 та RF-підсилювачу АВ-ІОТ-433. Під час роботи ці елементи можуть нагріватися, оскільки частина електричної енергії переходить у тепло. Потужність, що споживається елементом, визначається за формулою

$$P = U \cdot I$$

Де (P) — електрична потужність;

(U) — напруга живлення;

(I) — струм споживання.

Для зменшення ризику перегрівання силові елементи не повинні бути щільно закриті іншими деталями. Також RF-підсилювач не повинен працювати без підключеної антени або узгодженого навантаження, оскільки це може призвести до підвищеного відбиття потужності та погіршення роботи радіочастотного тракту.

Таблиця 4.2 — Основні заходи електробезпеки під час експлуатації пристрою

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
						60
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Елемент при-строю	Можлива небезпека	Захід безпеки
Акумулятори 18650	коротке замикання, перегрів	ізоляція контактів, контроль полярності
TP4056	неправильне заряджання	підключення відповідно до схеми
TPS61088	нагрів під час роботи	розміщення з доступом повітря
AB-IOT-433	нагрів, робота без навантаження	підключення антени перед передаванням
Провідники живлення	пошкодження ізоляції	перевірка перед увімкненням
Роз'єми	поганий контакт	надійне механічне з'єднання

Дотримання наведених заходів забезпечує безпечну роботу з акумуляторним живленням, знижує ризик пошкодження електронних модулів і підвищує надійність експлуатації стаціонарного радіомережевого вузла.

4.3 Техніко-економічна оцінка пристрою

Техніко-економічна оцінка розробленого радіомережевого вузла виконана з метою визначення орієнтовної вартості його виготовлення та подальшого порівняння з готовими апаратними рішеннями для Meshtastic. Оскільки пристрій має модульну структуру, його загальна вартість формується з вартості окремих електронних модулів, корпусу, антенного вузла та допоміжних монтажних елементів.

Загальна вартість пристрою визначається за формулою

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i$$

Де (C_{Σ}) — загальна вартість пристрою;

(C_i) — вартість окремого компонента;

(n) — кількість компонентів.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		61

Таблиця 4.3 — Орієнтовна вартість компонентів радіомережевого вузла

Компонент	Вартість, грн	Частка у вартості, %
RF-підсилювач АВ-ІОТ-433	927	51,4
XIAO ESP32-C6	335	18,6
RA-02 SX1278	230	12,8
DC-DC перетворювач TPS61088	20	1,1
Антенний роз'єм	40	2,2
Корпус	50	2,8
Інші елементи	200	11,1
Разом	1802	100

Повна орієнтовна вартість пристрою становить

$$C_{\Sigma} = 927 + 335 + 230 + 20 + 40 + 50 + 200 = 1802 \text{ грн}$$

Частка окремого компонента в загальній вартості визначається за формулою

$$K_i = \frac{C_i}{C_{\Sigma}} \cdot 100\%$$

Де (K_i) — частка вартості окремого компонента;

(C_i) — вартість компонента;

(C_{Σ}) — загальна вартість пристрою.

Найбільшу частку у вартості пристрою має RF-підсилювач АВ-ІОТ-433. Його вартість становить 927 грн, що дорівнює

$$K_{AB-IOT} = \frac{927}{1802} \cdot 100\% = 51,4\%$$

Це пояснюється тим, що підсилювач є окремим радіочастотним модулем і забезпечує підвищення технічної потужності передавання. Другою за вартістю складовою є мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6, частка якого становить 18,6%. LoRa-модуль RA-02 SX1278 становить 12,8% від загальної вартості та є основним елементом радіоканалу в діапазоні 433 МГц.

До рядка «Інші елементи» віднесено допоміжні компоненти, які використовуються під час складання пристрою: модуль заряджання, акумуляторні

елементи, провідники, монтажні матеріали, кріплення та матеріали для виготовлення Ground Plane антени. Їхня сумарна вартість прийнята 200 грн, що становить 11,1% від загальної вартості пристрою.

Отримана орієнтовна вартість розробленого радіомережевого вузла становить 1802 грн. Це значення є нижчим за вартість більшості готових Meshtastic-пристроїв. Крім того, розроблений вузол має власні конструктивні особливості: роботу в діапазоні 433 МГц, зовнішню Ground Plane антену, RF-підсилювач АВ-ІОТ-433, резервне живлення та модульну будову.

4.4 Порівняння розробленого пристрою з готовими апаратними рішеннями

Для оцінки економічної доцільності розробленого радіомережевого вузла було виконано порівняння його орієнтовної вартості з готовими апаратними рішеннями, які можуть використовуватися з Meshtastic. Орієнтовна вартість розробленого пристрою за результатами попереднього розрахунку становить 1802 грн.

Порівняння виконувалося з урахуванням вартості готових пристроїв, їхнього призначення, частотного діапазону, наявності корпусу, антени, автономного живлення та можливості стаціонарного встановлення. Частина готових пристроїв є портативними вузлами, а частина — готовими repeater-рішеннями для зовнішнього або стаціонарного використання.

Різниця вартості між готовим пристроєм і розробленим вузлом визначається за формулою

$$\Delta C = C_g - C_r$$

Де (ΔC) — різниця вартості;

(C_g) — вартість готового пристрою;

(C_r) — вартість розробленого пристрою.

Відносна вартість розробленого пристрою порівняно з готовим рішенням визначається як

$$K = \frac{C_r}{C_g} \cdot 100\%$$

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		63

Де (К) — відносна вартість розробленого пристрою;

(C_r) — вартість розробленого пристрою;

(C_g) — вартість готового рішення.

Таблиця 4.4 — Порівняння вартості розробленого пристрою з готовими Meshtastic-рішеннями

Пристрій	Орієнтовна вартість, грн	Різниця з розробленим пристроєм, грн	Відносна вартість розробленого пристрою, %
Розроблений радіомережевий вузол	1802	—	100
SenseCAP T1000-E	2461	659	73,2
LILYGO T-Beam Meshtastic	2747	945	65,6
LILYGO T-Beam Supreme	3604	1802	50,0
RAK WisMesh Repeater Mini	4448	2646	40,5
RAK WisMesh Repeater з розширеною комплектацією	13433	11631	13,4

Для прикладу, різниця між RAK WisMesh Repeater Mini та розробленим пристроєм становить

$$\Delta C = 4448 - 1802 = 2646 \text{ грн}$$

Відносна вартість розробленого пристрою порівняно з RAK WisMesh Repeater Mini становить

$$K = \frac{1802}{4448} \cdot 100\% = 40,5\%$$

Це означає, що розроблений пристрій коштує приблизно 40,5% від вартості RAK WisMesh Repeater Mini. Економія становить близько 59,5%.

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		64

Порівняння показує, що розроблений вузол має нижчу вартість порівняно з більшістю готових Meshtastic-пристроїв. При цьому він орієнтований саме на стаціонарне використання, працює в діапазоні 433 МГц, має зовнішню Ground Plane антену та окремий RF-підсилювач АВ-ІОТ-433. На відміну від портативних пристроїв, розроблений вузол не орієнтований на компактність, а призначений для роботи як опорна точка mesh-мережі.

Готові рішення мають перевагу у вигляді заводського корпусу, готової прошивки, серійного складання та зручності використання. Однак їхня вартість є вищою, а частина пристроїв орієнтована на інші частотні діапазони, зокрема 868/915 МГц. Розроблений пристрій є дешевшим варіантом стаціонарного вузла, який можна адаптувати під 433 МГц, зовнішню антену, резервне живлення та підсиленій радіочастотний тракт.

4.5 Висновки до розділу 4

У розділі було розглянуто питання безпечного виконання робіт під час складання та експлуатації стаціонарного радіомережевого вузла. Основними небезпечними чинниками є нагрів паяльного обладнання, можливість короткого замикання, неправильне підключення полярності живлення, пошкодження Li-Ion акумуляторів, нагрів DC-DC перетворювача TPS61088 та RF-підсилювача АВ-ІОТ-433. Для зменшення ризиків необхідно дотримуватися правил електробезпеки, контролювати полярність підключення, ізолювати контакти акумуляторів і не допускати роботи підсилювача без підключеної антени або узгодженого навантаження.

Було виконано техніко-економічну оцінку розробленого пристрою. Орієнтовна вартість радіомережевого вузла становить 1802 грн. Найбільшу частку у вартості має RF-підсилювач АВ-ІОТ-433, який становить 51,4% від загальної вартості пристрою. Це пояснюється тим, що підсилювач є окремим радіочастотним модулем і забезпечує підвищення технічної потужності передавання.

Порівняння з готовими Meshtastic-рішеннями показало, що розроблений пристрій має нижчу вартість. Його ціна становить приблизно 40,5% від вартості RAK WisMesh Repeater Mini. Крім меншої вартості, пристрій має

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		65

спеціалізацію під стаціонарне використання, роботу в діапазоні 433 МГц, зовнішню Ground Plane антену, резервне живлення та RF-підсилювач АВ-ІОТ-433.

Отримані результати підтверджують економічну доцільність реалізації власного стаціонарного вузла на базі доступних модулів. Розроблений пристрій є дешевшим за більшість готових рішень і водночас краще відповідає поставленій задачі створення стаціонарної точки автономної mesh-мережі.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		66

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було виконано розроблення стаціонарного автономного радіомережевого вузла на базі технології LoRa для роботи в mesh-мережі Meshtastic. Метою роботи було створення пристрою, здатного працювати як опорна точка локальної радіомережі, забезпечувати приймання, передавання та ретрансляцію коротких повідомлень, а також зберігати працездатність за рахунок резервного живлення.

У першому розділі було проаналізовано призначення автономних радіомережевих вузлів, можливі сценарії застосування mesh-мереж, принцип роботи технології LoRa та особливості побудови децентралізованих мереж на її основі. Було показано, що такі мережі є доцільними для резервного зв'язку, передавання коротких повідомлень, координат і телеметричних даних у випадках, коли традиційна телекомунікаційна інфраструктура відсутня, перевантажена або пошкоджена.

Було розглянуто готові апаратні рішення для Meshtastic і встановлено, що значна частина з них орієнтована на переносне використання, компактні антени або інші частотні діапазони. Через це було обґрунтовано доцільність створення власного стаціонарного вузла, який працює в діапазоні 433 МГц, має зовнішню Ground Plane антену, окремий RF-підсилювач, резервне живлення та модульну структуру.

У другому розділі було виконано проектування пристрою. Було розроблено структурну схему, обґрунтовано вибір частотного діапазону 433 МГц, мікроконтролерного модуля XIAO ESP32-C6, LoRa-модуля RA-02 SX1278, RF-підсилювача АВ-ІОТ-433, DC-DC перетворювача TPS61088, модуля заряджання TP4056 та акумуляторного блока на базі двох Li-Ion елементів 18650.

Окрему увагу було приділено антенному рішенню. Для пристрою було обрано Ground Plane антену на 433 МГц. Виконано розрахунок довжини хвилі, чвертьхвильового випромінювача та противаг. Антену було змодельовано в CST, після чого виготовлено фізично. За результатами моделювання та вимірювання встановлено, що антена має добре узгодження в робочому діапазоні.

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		67

На частоті 433,125 МГц значення VSWR становило близько 1,06, що підтверджує можливість її використання в радіочастотному тракті пристрою.

Було розроблено систему живлення з резервуванням від акумуляторного блока. Для формування стабілізованої напруги використано DC-DC перетворювач TPS61088, а для заряджання акумуляторів — модуль TP4056. За прийнятих параметрів було виконано розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи. Отримано, що акумуляторний блок 2×18650 може забезпечити приблизно 21 годину автономної роботи за прийнятого режиму навантаження.

Також було виконано розрахунок бюджету радіолінії. Розрахунок показав, що навіть у нормативному режимі радіолінія має достатній енергетичний запас для роботи в умовах прямої видимості. Додатково було розглянуто технічний режим із використанням RF-підсилювача АВ-ІОТ-433. При цьому було зазначено, що фактична експлуатація пристрою повинна враховувати допустимі обмеження для вибраного частотного діапазону.

У третьому розділі було виконано експериментальну перевірку працездатності зібраного пристрою. Перевірка охоплювала антенний тракт, фактичне складання вузла та роботу в мережі Meshtastic. За результатами перевірки було підтверджено, що пристрій виявляється в застосунку Meshtastic і забезпечує передавання тестових повідомлень між базовою станцією та вузлом Heltec V3. Під час перевірки в умовах приміщення були отримані значення RSSI від -48 до -42 дБм і SNR від 9 до 14 дБ, що відповідає стабільному зв'язку в межах проведеної перевірки.

У четвертому розділі було розглянуто питання охорони праці, електробезпеки та безпечного використання Li-Ion акумуляторів. Було визначено основні небезпечні чинники під час складання та експлуатації пристрою: нагрів паяльного обладнання, коротке замикання, неправильне підключення полярності, пошкодження акумуляторів, нагрів DC-DC перетворювача та RF-підсилювача. Для зменшення ризиків було сформульовано відповідні заходи безпеки.

Було виконано техніко-економічну оцінку розробленого пристрою. Орієнтовна вартість радіомережевого вузла становить 1802 грн. Порівняння з

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		68

готовими Meshtastic-рішеннями показало, що розроблений пристрій має нижчу вартість і водночас краще відповідає поставленій задачі стаціонарного вузла на 433 МГц із зовнішньою антеною, резервним живленням і підсиленням радіочастотним трактом.

Отримані результати підтверджують виконання поставлених завдань дипломного проекту. Було обґрунтовано вибір апаратної платформи, розроблено структурну та електричну принципову схеми, виконано розрахунки антени, радіолінії, живлення та автономності, виготовлено Ground Plane антену, зібрано пристрій і підтверджено його працездатність у мережі Meshtastic. Розроблений вузол може використовуватися як стаціонарна точка автономної mesh-мережі для підтримання локального радіозв'язку та ретрансляції коротких повідомлень.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РІ-п31.XXXXXXX.001 ПЗ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.Meshtastic. Documentation: LoRa Configuration, Radio Settings, Supported Hardware, Device Configuration [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://meshtastic.org/docs/>

2.RAKwireless. RAK WisMesh Repeater Devices. Meshtastic documentation [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://meshtastic.org/docs/hardware/devices/rak-wireless/wismesh/repeater/>

3.Semtech. SX1276/77/78/79 — 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf

4.Semtech. AN1200.22 LoRa Modulation Basics. Application Note [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>

5.Seeed Studio. Getting Started with Seeed Studio XIAO ESP32C6 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32c6_getting_started/

6.Espressif Systems. ESP32-C6 Series Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://files.seeedstudio.com/wiki/SeeedStudio-XIAO-ESP32C6/res/esp32-c6_datasheet_en.pdf

7.LoRa Ra-02 SX1278 Breakout Module. Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://evelta.com/content/datasheets/004-7Semi-LoRa-ra-02.pdf>

8.Texas Instruments. TPS61088 10-A Fully-Integrated Synchronous Boost Converter. Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/gpn/TPS61088>

9.TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation. Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		70

10.M0UKD. 1/4 Wave Ground Plane Antenna Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://m0ukd.com/calculators/quarter-wave-ground-plane-antenna-calculator/>

11.Keysight Technologies. VSWR / Return Loss Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.keysight.com/used/kr/en/knowledge/calculators/vswr-return-loss-calculator>

12.Everything RF. Return Loss to VSWR Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/return-loss-to-vswr-calculator>

13.IB-Lenhardt AG. Line of Sight Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ib-lenhardt.com/kb/calculators/line-of-sight>

14.Hernandez Ortiz G. A., Quiroz Puentes E. S., Rugeles J. J. Resilience Analysis in Off-Grid LoRa Mesh Networks: Evaluation of Meshtastic Profiles in Long-Range Propagation Scenarios [Электронный ресурс]. — arXiv, 2026. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2605.17063>

15.Varathu H. R., Borkotoky S. S. The LoRa Modulation Over Rapidly-Varying Channels: Are the Higher Spreading Factors Necessarily More Robust? [Электронный ресурс]. — arXiv, 2020. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2009.01176>

16.SafeWork NSW. Lithium-ion batteries [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.safework.nsw.gov.au/hazards-a-z/lithium-ion-batteries>

17.National Bank of Ukraine. Official exchange rates [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bank.gov.ua/en/markets/exchangerates>

18.RAKwireless. WisMesh Repeater Mini. A Solar Repeater for Meshtastic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://store.rakwireless.com/products/wismesh-meshtastic-solar-repeater-mini>

19.RAKwireless. WisMesh Repeater. Reliable Meshtastic Range Extender [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://store.rakwireless.com/products/wismesh-meshtastic-solar-repeater>

					PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		71

20. Seeed Studio. SenseCAP T1000-E Card Tracker for Meshtastic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://iot-shop.de/en/shop/see-t1000-e-sensecap-t1000-e-card-tracker-for-meshtastic-7406>

21. OpenELAB. LILYGO T-Beam Meshtastic ESP32 LoRa GPS Board [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://openelab.io/products/lilygo-t-beam-lora-868mhz-module>

22. Passion Radio. LILYGO T-Beam Supreme SX1262 Meshtastic LoRa Board [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.passion-radio.com/wifi/sx-1262-433-2825.html>

					<i>PI-п31.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лис
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PI-п31 XXXX. 00.001 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PI-п31 XXXX. 00.001 ПЗ	Пояснювальна записка	71	
3	A4	PI-п31 XXXX. 00.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
4	A4	PI-п31 XXXX. 00.001 ПЕ	Перелік елементів	1	

				PI-п31.XXXX00.001		
	ПІБ	Підп	Дата			
Розробн.	Іщенко Є. В.			«Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa» Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Василенко Д. О.				1	85
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. PI Гр. PI-п31	
Н/контр.						
Зав.каф.						

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проекту
них доцент, к.т.н.,
Василенко Дмитро Олексійович

(дата)

(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри радіотехніч-
систем д.т.н., проф.
Сергій ЛІТВІНЦЕВ

(дата)

(підпис)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ

«Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa»

1 НАЗВА І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Назва дипломного проєкту: «Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa».

Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою радіоінженерії від 20.04.2026 р., а також затвердження теми дипломного проєкту наказом по університету.

2 ВИКОНАВЕЦЬ

Виконавець — студент групи РІ-п31 Іщенко Євгеній Вячеславович.

3 МЕТА ВИКОНАННЯ ДП І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

Метою дипломного проєкту є розроблення стаціонарного автономного радіомережевого вузла на базі технології LoRa для роботи в mesh-мережі Meshtastic у діапазоні 433 МГц.

Пристрій призначений для передавання, приймання та ретрансляції коротких повідомлень у складі автономної mesh-мережі. Вузол має виконувати функцію стаціонарної опорної точки, забезпечувати локальне радіопокриття та підтримувати роботу мережі в умовах відсутності або нестабільності традиційних каналів зв'язку.

Пристрій повинен працювати з використанням технології LoRa, підтримувати програмне забезпечення Meshtastic, мати зовнішню антену діапазону 433 МГц, систему основного живлення від джерела 5 В і резервне живлення від акумуляторного блока.

4 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1 Призначення

Пристрій повинен забезпечувати роботу в автономній mesh-мережі на базі технології LoRa та програмного забезпечення Meshtastic.

Основні вимоги до пристрою:

1. робочий частотний діапазон — 433 МГц;
2. тип радіозв'язку — LoRa;
3. програмне забезпечення — Meshtastic;

4. мікроконтролерний модуль — XIAO ESP32-C6;
5. LoRa-модуль — RA-02 на базі SX1278;
6. RF-підсилювач — AB-IOT-433;
7. антена — зовнішня Ground Plane антена на 433 МГц;
8. основне живлення — 5 В;
9. резервне живлення — акумуляторний блок 2× Li-Ion 18650;
10. модуль заряджання — TP4056;
11. DC-DC перетворювач — TPS61088;
12. контрольовані параметри роботи — RSSI, SNR, S11, VSWR.

Пристрій повинен забезпечувати можливість підключення зовнішньої антени, роботу як стаціонарний вузол автономної mesh-мережі та передавання коротких повідомлень між вузлами Meshtastic.

4.2 Конструкція

Конструкція пристрою повинна передбачати розміщення основних електронних модулів у корпусі. У складі пристрою мають бути передбачені мікроконтролерний модуль, LoRa-модуль, RF-підсилювач, модуль заряджання, DC-DC перетворювач, акумуляторний блок, антенний роз'єм і зовнішня антена.

Антена повинна бути винесена за межі корпусу для зменшення впливу електронних модулів, акумуляторів і провідників на її роботу. Конструкція повинна забезпечувати доступ до елементів живлення, роз'ємів і основних модулів для обслуговування, перевірки та налагодження пристрою.

Використана елементна база повинна бути доступною, уніфікованою та придатною для складання пристрою з окремих функціональних модулів.

4.3 Дизайну, ергономіки та технічної естетики

Зовнішнє виконання пристрою повинно відповідати вимогам стаціонарного встановлення. Корпус має забезпечувати розміщення електронних модулів, акумуляторного блока та провідників без механічного пошкодження з'єднань.

Розташування елементів повинно забезпечувати зручність підключення антени, зовнішнього живлення та доступу до пристрою під час налагодження. Конструкція повинна мати охайне компонування та забезпечувати можливість технічного обслуговування.

4.4 Експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту

Технічне обслуговування пристрою повинно передбачати можливість перевірки роз'ємів, провідників, антенного тракту, модуля живлення та акумуляторного блока.

Конструкція пристрою повинна забезпечувати можливість заміни окремих функціональних модулів без повного перероблення схеми. У разі несправності окремого блока має бути передбачена можливість його вузлової заміни.

Під час експлуатації повинна бути забезпечена можливість перевірки працездатності вузла через програмне забезпечення Meshtastic за показниками RSSI, SNR та фактом успішного передавання повідомлень.

4.5 Безпеки життя, здоров'я і майна громадян та охорони довкілля

Під час складання та експлуатації пристрою необхідно дотримуватися вимог електробезпеки та пожежної безпеки.

Особливу увагу потрібно приділити безпечному використанню Li-Ion акумуляторів, недопущенню короткого замикання, правильному підключенню полярності живлення, ізоляції провідників і контролю нагрівання DC-DC перетворювача та RF-підсилювача.

Робота RF-підсилювача повинна виконуватися з підключеною антеною або узгодженим навантаженням. Не допускається механічне пошкодження акумуляторів, перегрівання елементів живлення та експлуатація пристрою з пошкодженою ізоляцією провідників.

Утилізація акумуляторів та електронних компонентів повинна виконуватися відповідно до вимог поводження з електронними відходами.

4.6 Транспортування і зберігання

Транспортування пристрою повинно виконуватися в умовах, що виключають механічне пошкодження корпусу, антени, роз'ємів і акумуляторного блока.

Зберігання пристрою повинно здійснюватися в сухому приміщенні за нормальних кліматичних умов. Під час тривалого зберігання необхідно не допускати глибокого розряду Li-Ion акумуляторів. Антену та зовнішні роз'єми слід захищати від механічних пошкоджень.

4.7 Якості і технічного рівня

Розроблений пристрій повинен відповідати вимогам дипломного проєкту та забезпечувати виконання основних функцій стаціонарного радіо-мережевого вузла. Пристрій повинен мати модульну структуру, можливість роботи в діапазоні 433 МГц, зовнішню Ground Plane антену, резервне живлення та можливість роботи в мережі Meshtastic.

Технічний рівень пристрою визначається можливістю роботи як стаціонарної точки автономної mesh-мережі, застосуванням зовнішньої антени, резервного живлення та окремого радіочастотного підсилювача.

5 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Оформлення документації повинно виконуватися згідно з вимогами до оформлення дипломного проєкту.

Склад документації:

1. Пояснювальна записка.
2. Завдання на дипломний проєкт.
3. Схема структурна.
4. Схема електрична принципова.
5. Перелік елементів.
6. Результати моделювання та вимірювання Ground Plane антени.
7. Презентація.

5.1 Орієнтовний зміст дипломного проєкту:

Завдання на дипломний проєкт.

Перелік скорочень.

Вступ.

1. Аналіз предметної області та вихідних вимог до автономного радіомережевого вузла.
2. Проектування стаціонарного радіомережевого вузла на базі технології LoRa.
3. Експериментальна перевірка працездатності радіомережевого вузла.
4. Охорона праці та техніко-економічна оцінка розробленого пристрою.

Висновки.

Перелік джерел посилання.

Додаток А. Технічне завдання.

6 СТАДІЇ І ЕТАПИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Робота виконується в 7 етапів

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Терміни виконання етапів проекту	Примітка
1.	Аналіз предметної області та призначення автономних радіомережевих вузлів	до 27.04.2026 р.	Виконано
2.	Розгляд технології LoRa, mesh-мереж та готових рішень для Meshtastic	до 04.05.2026 р.	Виконано
3.	Формування вимог до стаціонарного радіомережевого вузла та вибір компонентів	до 15.05.2026 р.	Виконано
4.	Розроблення структурної та електричної принципової схем пристрою	до 24.05.2026 р.	Виконано
5.	Розрахунок параметрів антени, живлення, автономності та бюджету радіолінії	до 31.05.2026 р.	Виконано
6.	Складання пристрою та експериментальна перевірка роботи в мережі Meshtastic	до 11.06.2026 р.	Виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки, графічних матеріалів і презентації	до 15.06.2026 р.	Виконано

7 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

1. Представлення проміжних результатів дипломного проекту керівнику в зазначені терміни.
2. Представлення завершеного дипломного проекту керівнику.
3. Перевірка дипломного проекту на наявність плагіату.
4. Представлення кафедрі завершеного дипломного проекту в встановлені терміни до дати захисту.
5. Захист дипломного проекту перед екзаменаційною комісією.

Виконавець

Євгеній ІЩЕНКО

Керівник

Дмитро ВАСИЛЕНКО

ДОДАТОК Б. КОМПЛЕКТ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Перв. застосування	Позначення	Позначення	Кільк.	Примітка			
Довідк. №		<i>Акумулятори</i>					
	<i>BT</i>	Акумулятор Li-Ion 18650	2				
		<i>Антенни</i>					
	<i>AE1</i>	Ground Plane антенна 433 МГц	1				
		<i>Модулі</i>					
	<i>U1</i>	Модуль заряджання Li-Ion TP4056	1				
	<i>U2</i>	Двонаправлений RF-підсилювач AB-IOT-433	1				
	<i>U3</i>	LoRa-модуль RA-02 SX1278	1				
	<i>U4</i>	Мікроконтролерний модуль XIAO ESP32-C6	1				
	<i>U5</i>	DC-DC перетворювач TPS61088	1				
Підп. і дата		<i>Роз'єми</i>					
	<i>J1</i>	USB micro	1				
		<i>Провідники</i>					
	<i>W1</i>	Провід монтажний	1 компл.				
		<i>Корпусні деталі</i>					
	<i>X1</i>	Корпус пристрою	1				
	Інв. № орг.		PI-n31.123456.001 ПЕ				
			Автономний мережевий вузол на базі технології LoRa		Лім.	Маса	Масштаб
		<i>Зм. Арк.</i>			<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
		<i>Розроб.</i>	Перелік елементів		Аркуш 1	Аркушів 1	
<i>Перевір.</i>		НТУУ КПІ, РТФ, PI-n31					
<i>Реценз.</i>							
<i>Н. контр.</i>							
<i>Затв.</i>							

PI-n31.123456.001 E3

Перв. застосування

Довідк. №

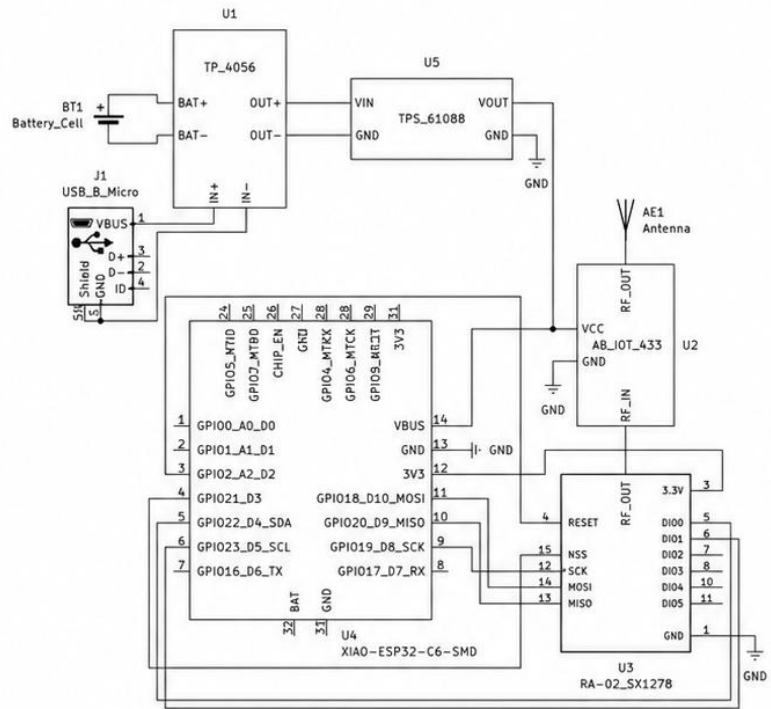
Підп. и дата

Інв. № ориг.

Зам. інв. №

Підп. и дата

Інв. № ориг.



U1 – модуль зарядки TP4056
 U2 – RF-підсилювач AB-IOT-433
 U3 – LoRa модуль RA-02 SX1278
 U4 – XIAO ESP32-C6
 U5 – DC-DC перетворювач
 TPS61088
 BT1 – Li-Ion акумулятор 18650
 AE1 – антена Ground Plane 433 МГц

PI-n31.123456.001 E3

Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Іщенко Є. В.		
Перевір.	Василенко Д. О.		
Реценз.			
Н. контр.			
Затв.	Василенко Д. О.		

Автономний мережевий вузол
 на базі технології LoRa

Лім.	Маса	Масштаб
		1:1
Аркуш 1	Аркушів 1	

Схема електрична принципова

НТУУ КПІ, РТФ, PI-n31