

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Система підрахунку кількості людей в укритті з
використанням телекомунікаційних технологій»**

Виконав :

Студент IV курсу, групи ТЗ-21

Добровольський Данило Віталійович

Керівник:

Старший викладач кафедри ТК НН ІТС

Роскошний Дмитро Васильович

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н.

Новогрудська Ріна Леонідівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Добровольському Данилу Віталійовичу

1. Тема роботи «Система підрахунку кількості людей в укритті з використанням телекомунікаційних технологій», керівник роботи Роскошний Дмитро Васильович, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення від мережі 230 В; напруга живлення автономних пристроїв 5 В; час автономної роботи ,годин, не менше 12; вивід інформації за допомогою безпроводових технологій; ємність укриття до 200 людей; кількість укриттів у системі – не менше 3.
4. Зміст роботи: провести огляд та аналіз сучасних технологій підрахунку людей; провести огляд та аналіз принципів роботи давачів у системах підрахунку людей; провести аналіз та вибір безпроводової технології передачі даних; розробити архітектуру системи та алгоритми її роботи; провести вибір елементної бази; розробити структурну схему системи, схему розміщення давачів, розробити програмне забезпечення ключових елементів системи.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

Слайд 1 Титульна сторінка	Слайд 9 Взаємодія компонентів та потік даних
Слайд 2 Актуальність дослідження	Слайд 10 Апаратна реалізація давачного вузла
Слайд 3 Мета та завдання дослідження	Слайд 11 Енергоспоживання та час автономної роботи
Слайд 4 Технічні вимоги до системи	Слайд 12 Алгоритм визначення подій та відправки даних
Слайд 5 Технології підрахунку людей	Слайд 13 Серверна обробка та архітектура бази даних
Слайд 6 Визначення напрямку руху ІЧ-давачами	Слайд 14 Лабораторні випробування програмного комплексу
Слайд 7 Обґрунтування вибору безпроводової технології	Слайд 15 Результати роботи системи під час повітряної тривоги
Слайд 8 Трирівнева архітектура IoT-системи	Слайд 16 Загальні висновки по роботі

6. Дата видачі завдання 22.02.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підготовка матеріалів першого розділу	01.03.26 – 14.03.26	Виконано
2	Підготовка матеріалів другого розділу	15.03.26 – 01.04.26	Виконано
3	Підготовка матеріалів третього розділу	02.04.26 – 29.04.26	Виконано
4	Підготовка матеріалів четвертого розділу Підготовка матеріалів п'ятого розділу	30.04.26 – 14.05.26	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки Оформлення ілюстративного матеріалу	15.05.26 – 22.05.26	Виконано
6	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	23.05.26 – 01.06.26	Виконано

Студент

Данило ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ

Керівник

Дмитро РОСКОШНИЙ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи: 80 с., 13 рис., 9 табл., 3 додатки, 27 джерел.

Об'єкт дослідження — процес автоматизованого обліку кількості людей, що перебувають у захисних спорудах цивільного захисту, та передавання цієї інформації каналами безпроводового зв'язку.

Предмет дослідження — методи та технічні засоби підрахунку людей і телекомунікаційні технології передавання телеметричних даних між укриттями та центральним сервером моніторингу.

Мета роботи — розробка системи підрахунку кількості людей в укритті з автономним живленням та передаванням інформації безпроводовими телекомунікаційними технологіями, що забезпечує одночасний моніторинг не менше трьох укриттів ємністю до 200 осіб кожне.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій підрахунку людей (інфрачервоних, ультразвукових, відеоаналітичних, на основі Wi-Fi/BLE), обгрунтовано вибір методу на основі парних інфрачервоних давачів із визначенням напрямку руху. Виконано порівняльний аналіз безпроводових технологій (Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa, NB-IoT) за критеріями дальності, енергоспоживання та пропускної здатності, за результатами якого для магістрального каналу обрано технологію LoRa.

Розроблено трирівневу архітектуру системи, алгоритми роботи давачного вузла та шлюзу, структурну, функціональну та електричну принципову схеми, а також програмне забезпечення давачного вузла й серверної частини. Проведено розрахунок енергоспоживання, що підтверджує забезпечення автономної роботи понад 12 годин.

Ключові слова: СИСТЕМА ПІДРАХУНКУ ЛЮДЕЙ, УКРИТТЯ, ІНФРАЧЕРВОНІЙ ДАВАЧ, LoRa, LoRaWAN, ESP32, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, MQTT, ТЕЛЕМЕТРИЯ, АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ.

ABSTRACT

Explanatory note of the bachelor thesis: 80 pages, 13 figures, 7 tables, 3 appendices, 27 references.

The object of research is the process of automated counting of people present in civil-defence protective shelters and the transmission of this information over wireless communication channels.

The subject of research comprises the methods and hardware for people counting and the telecommunication technologies for transmitting telemetry data between shelters and a central monitoring server.

The aim of the work is to design a people-counting system for shelters with autonomous power supply and wireless data transmission, capable of simultaneously monitoring at least three shelters with a capacity of up to 200 persons each.

The thesis analyses modern people-counting technologies (infrared, ultrasonic, video-analytics, Wi-Fi/BLE based) and justifies the choice of a method based on paired infrared sensors with movement-direction detection. A comparative analysis of wireless technologies (Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa, NB-IoT) is performed against the criteria of range, power consumption and throughput; LoRa technology is selected for the backbone channel.

A three-tier system architecture, the operating algorithms of the sensor node and gateway, the structural, functional and circuit diagrams, as well as the software of the sensor node and the server side were developed. A power-consumption calculation confirms autonomous operation exceeding 12 hours.

Keywords: PEOPLE COUNTING SYSTEM, SHELTER, INFRARED SENSOR, LoRa, LoRaWAN, ESP32, INTERNET OF THINGS, WIRELESS NETWORK, MQTT, TELEMETRY, AUTONOMOUS POWER SUPPLY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ	
ПІДРАХУНКУ ЛЮДЕЙ	12
1.1 Аналіз технічного завдання та формування вимог до системи	12
1.2 Огляд та аналіз сучасних технологій підрахунку людей.....	14
1.3 Аналіз принципів роботи давачів у системах підрахунку	16
1.4 Аналіз джерел похибок підрахунку	17
1.5 Обґрунтування вибору методу підрахунку	18
1.6 Огляд існуючих рішень та аналогів	18
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТА ВИБІР БЕЗПРОВОДОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	
ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ.....	21
2.1 Критерії вибору технології	21
2.2 Огляд технологій Wi-Fi та Bluetooth Low Energy.....	22
2.3 Огляд технології ZigBee.....	22
2.4 Огляд технології LoRa та LoRaWAN.....	22
2.5 Огляд технології NB-IoT	24
2.6 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору	25
2.7 Вибір топології мережі	26
2.8 Регуляторні обмеження діапазону 868 МГц	27
2.9 Розрахунок бюджету радіолінії та оцінювання дальності.....	27
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ТА АЛГОРИТМІВ ЇЇ	
РОБОТИ.....	30
3.1 Загальна архітектура системи	30
3.2 Структурна схема системи.....	31
3.3 Функціональна схема системи.....	32
3.4 Протокол обміну та формат даних	32
3.5 Алгоритм роботи давачного вузла	33
3.6 Алгоритм роботи шлюзу та серверної частини	34
3.7 Масштабування системи	35

3.8 Забезпечення надійності та обробка колізій	36
3.9 Забезпечення інформаційної безпеки	36
РОЗДІЛ 4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА СХЕМ СИСТЕМИ.....	38
4.1 Вибір мікроконтролера.....	38
4.2 Вибір давачів, радіомодуля та індикації.....	39
4.3 Структурна схема давачного вузла	40
4.4 Схема розміщення давачів	41
4.5 Електрична структурна схема.....	41
4.6 Розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи	42
4.7 Розрахунок параметрів інфрачервоних давачів	33
4.8 Вибір та розрахунок антени	44
4.9 Конструктивне виконання вузла	45
4.10 Орієнтовна оцінка вартості вузла.....	45
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	47
5.1 Програмне забезпечення давачного вузла.....	47
5.2 Програмне забезпечення шлюзу.....	52
5.3 Серверне програмне забезпечення	54
5.4 Структура бази даних	56
5.5 Відображення інформації для користувачів.....	58
5.6 Тестування та перевірка працездатності	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТОК А ЛІСТИНГ ПРОШИВКИ ДАВАЧНОГО ВУЗЛА	66
ДОДАТОК Б ЛІСТИНГ СЕРВЕРНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	70
ДОДАТОК В ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ADR	Adaptive Data Rate — адаптивна зміна швидкості передачі
BLE	Bluetooth Low Energy — Bluetooth з низьким енергоспоживанням
CSS	Chirp Spread Spectrum — розширення спектра лінійною частотною модуляцією
GPIO	General-Purpose Input/Output — універсальні входи/виходи
IoT	Internet of Things — Інтернет речей
ISM	Industrial, Scientific and Medical — неліцензований діапазон частот
I²C	Inter-Integrated Circuit — послідовна шина обміну даними
LoRa	Long Range — технологія дальнього радіозв'язку
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network — енергоефективна мережа далекої дії
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport — протокол телеметрії
NB-IoT	Narrowband IoT — вузькосмуговий стільниковий IoT
PIR	Passive Infrared — пасивний інфрачервоний давач
RSSI	Received Signal Strength Indicator — показник рівня сигналу
SF	Spreading Factor — коефіцієнт розширення спектра
SNR	Signal-to-Noise Ratio — відношення сигнал/шум
SPI	Serial Peripheral Interface — послідовний периферійний інтерфейс
ToF	Time-of-Flight — давач визначення відстані за часом прольоту
БД	База даних
МК	Мікроконтролер
ПЗ	Програмне забезпечення
ТЗ	Технічне завдання

ВСТУП

Повномасштабна збройна агресія проти України кардинально змінила підходи до організації цивільного захисту населення. Захисні споруди цивільного захисту — укриття, протирадіаційні укриття та найпростіші укриття — стали елементом повсякденної інфраструктури населених пунктів. Під час повітряних тривог, які можуть тривати від кількох десятків хвилин до багатьох годин, тисячі людей одночасно переміщуються до укриттів. У цих умовах оперативна інформація про фактичну заповненість кожного укриття стає критично важливою як для самих громадян, так і для служб цивільного захисту.

Відсутність даних про заповненість призводить до низки проблем. Людина, що прямує до укриття під час тривоги, не має змоги заздалегідь дізнатися, чи є в ньому вільні місця, і змушена витратити дорогоцінний час на пошук. Служби цивільного захисту не володіють оперативною картиною завантаженості мережі укриттів, що ускладнює планування евакуаційних заходів та оцінювання достатності захисних споруд у районі. Ручний облік, який подекуди ведуть чергові, є ненадійним, повільним і неможливим під час масового напливу людей.

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, захисні споруди цивільного захисту поділяють на сховища, протирадіаційні укриття та найпростіші укриття, що різняться ступенем захисту та облаштуванням. Незалежно від типу споруди, спільною є потреба в контролі фактичної заповненості, особливо за умови, що одна споруда може обслуговувати значну кількість людей. Автоматизація такого контролю набуває особливого значення в межах міста, де кількість укриттів вимірюється десятками й сотнями, а їх ручний моніторинг є неможливим.[1]

Автоматизована система підрахунку кількості людей в укритті дозволяє вирішити ці проблеми. Вона у режимі реального часу визначає кількість осіб у кожному укритті та передає ці дані до центрального сервера, звідки інформація може надаватися диспетчерським службам і населенню.

Особливістю задачі є те, що укриття часто розташовані в підвальних приміщеннях зі слабким покриттям стільникового зв'язку, не завжди мають стабільне електроживлення, а сама система має охоплювати територіально розподілену мережу об'єктів. Це висуває на перший план саме телекомунікаційну складову — вибір технології зв'язку, яка забезпечить далеку, енергоефективну та надійну передачу даних.[2]

Актуальність роботи зумовлена нагальною суспільною потребою в автоматизованому моніторингу заповненості захисних споруд та відсутністю доступних готових рішень, адаптованих до українських умов експлуатації — автономності, поганого радіопокриття та територіальної розподіленості об'єктів.

Метою роботи є розробка системи підрахунку кількості людей в укритті з автономним живленням та передаванням інформації безпроводовими телекомунікаційними технологіями, яка забезпечує одночасний моніторинг не менше трьох укриттів ємністю до 200 осіб кожне.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технічне завдання та сформулювати вимоги до системи;
- провести огляд і аналіз сучасних технологій та давачів підрахунку людей;
- виконати порівняльний аналіз безпроводових технологій передавання даних і обґрунтувати вибір;
- розробити архітектуру системи та алгоритми її роботи;
- обрати елементну базу та розробити схеми системи;
- розробити програмне забезпечення ключових елементів системи.

Об'єкт дослідження — процес автоматизованого обліку кількості людей у захисних спорудах та передавання цієї інформації каналами безпроводового зв'язку.

Предмет дослідження — методи й технічні засоби підрахунку людей і телекомунікаційні технології передавання телеметричних даних між укриттями та центральним сервером.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена система може бути використана для оснащення мережі захисних споруд цивільного захисту засобами автоматизованого моніторингу заповненості, що підвищує оперативність та безпеку їх використання населенням.

Пояснювальна записка складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі проаналізовано технічне завдання й розглянуто технології підрахунку людей. Другий розділ присвячено порівняльному аналізу та вибору безпроводової технології передавання даних. У третьому розділі розроблено архітектуру системи та алгоритми її роботи. Четвертий розділ містить вибір елементної бази й розробку схем. У п'ятому розділі наведено розробку програмного забезпечення ключових елементів системи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПІДРАХУНКУ ЛЮДЕЙ

1.1 Аналіз технічного завдання та формування вимог до системи

Технічне завдання визначає систему підрахунку кількості людей в укритті, що використовує телекомунікаційні технології для передавання інформації. Аналіз вихідних даних дозволяє виокремити ключові технічні обмеження та функціональні вимоги, які визначатимуть подальші проєктні рішення.

Згідно з вихідними даними, основне живлення системи здійснюється від мережі змінного струму напругою 230 В, тоді як автономні пристрої живляться напругою 5 В. Час автономної роботи має складати не менше 12 годин, що відповідає тривалості найдовших періодів відсутності зовнішнього електроживлення або повітряних тривог. Вивід інформації здійснюється безпроводовими технологіями. Ємність окремого укриття становить до 200 осіб, а кількість укриттів у системі — не менше трьох. Зведені вимоги наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні вимоги до системи

Параметр	Значення
Напруга основного живлення	230 В (мережа)
Напруга автономного живлення	5 В
Час автономної роботи	не менше 12 годин
Спосіб виводу інформації	безпроводові технології
Ємність одного укриття	до 200 осіб
Кількість укриттів у системі	не менше 3
Похибка підрахунку (проєктна вимога)	не більше 5 %

Розглянемо кожен з параметрів детальніше. Вимога живлення основного обладнання від мережі 230 В означає, що стаціонарна частина

системи (зокрема шлюз) у штатному режимі працює від електромережі. Проте під час надзвичайних ситуацій електропостачання може зникати, тому передбачено резервне живлення напругою 5 В, яке забезпечують автономні джерела. Саме для автономних пристроїв висувається вимога часу роботи не менше 12 годин — це орієнтовний максимальний інтервал, протягом якого система має зберігати працездатність без зовнішнього живлення.

Ємність укриття до 200 осіб визначає діапазон значень лічильника та вимоги до точності: за такої кількості людей навіть невелика відносна похибка може давати помітне абсолютне відхилення, тому метод підрахунку має забезпечувати достатню достовірність. Вимога обслуговування не менше трьох укриттів визначає розподілений характер системи й безпосередньо впливає на вибір телекомунікаційної технології, яка має покривати кілька територіально рознесених об'єктів.

На основі аналізу можна сформулювати такі функціональні вимоги до системи:

- автоматичне визначення кількості людей у кожному укритті з урахуванням напрямку руху (вхід/вихід);
- передавання даних про заповненість до центрального сервера безпроводовим каналом;
- одночасне обслуговування щонайменше трьох територіально рознесених укриттів;
- автономна робота давачних вузлів не менше 12 годин у разі зникнення мережевого живлення;
- відображення поточної заповненості як локально (на місці), так і дистанційно (для диспетчера та населення).

Окремо слід наголосити на нефункціональних вимогах, що впливають з умов експлуатації. Укриття часто розташовані в підвальних приміщеннях, де стільникове покриття є нестабільним, тому обрана телекомунікаційна технологія має забезпечувати впевнений зв'язок у складних радіоумовах. Енергоефективність вузлів є критичною з огляду на вимогу автономності.

Нарешті, система має бути недорогою у масштабуванні, оскільки потенційно охоплює велику кількість об'єктів.

Сукупність наведених вимог формує цілісний образ системи: автономні енергоефективні давачні вузли в кожному укритті, далекодіючий безпроводовий канал зв'язку, стійкий до складних радіумов, та централізована частина для збирання й відображення інформації. Кожна з наступних проектних задач — вибір методу підрахунку, вибір телекомунікаційної технології, розробка архітектури та елементної бази — розв'язується з урахуванням цих вимог.

1.2 Огляд та аналіз сучасних технологій підрахунку людей

Задача автоматичного підрахунку людей виникає в багатьох галузях: у системах безпеки, ритейлі, керуванні будівлями, транспорті. За фізичним принципом дії технології підрахунку можна поділити на кілька груп, узагальнена класифікація яких наведена на рисунку 1.1.[3]

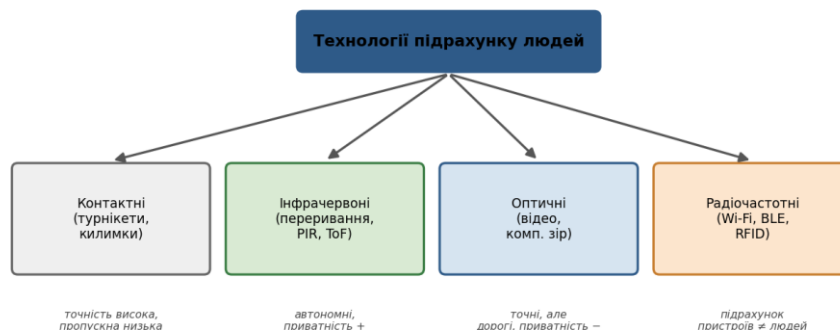


Рис. 1.1 — Класифікація технологій підрахунку людей

Контактні технології (турнікети, лічильні килимки, тензодавачі) забезпечують високу точність, оскільки людина фізично взаємодіє з пристроєм. Проте вони мають низьку пропускну здатність, потребують облаштування проходу й непридатні для масового напливу людей в укриття під час тривоги.

Інфрачервоні технології ґрунтуються на реєстрації теплового випромінювання людини (пасивні давачі PIR) або на перериванні інфрачервоного променя під час проходу (активні бар'єри). Окремий клас становлять давачі часу прольоту (ToF), що вимірюють відстань до об'єкта. Інфрачервоні рішення прості, дешеві, енергоефективні й не порушують приватність, що робить їх привабливими для автономних систем.[4]

Серед інфрачервоних рішень слід розрізняти кілька підходів. Пасивні давачі PIR реєструють зміну теплового потоку й добре виявляють наявність руху, проте погано підраховують окремих людей. Активні бар'єри з перериванням променя точно фіксують факт проходу через визначену лінію. Дачі ToF дозволяють не лише виявити прохід, а й оцінити кількість об'єктів та їх розміри, що корисно для розрізнення кількох людей, які проходять одночасно, проте вони складніші й дорожчі. Для автономної системи з помірними вимогами до точності найкращий баланс забезпечують активні інфрачервоні бар'єри.

Оптичні технології використовують відеокамеру та алгоритми комп'ютерного зору для виявлення й підрахунку людей у кадрі. Сучасні нейромереві методи забезпечують високу точність навіть за щільного потоку, проте потребують значних обчислювальних ресурсів, стабільного живлення та освітлення, є відносно дорогими й викликають питання захисту приватності, що особливо чутливо в умовах укриття.

Радіочастотні технології оцінюють кількість людей опосередковано — за кількістю активних бездротових пристроїв (Wi-Fi, Bluetooth) або міток RFID. Головний недолік полягає в тому, що підраховуються пристрої, а не люди: частина відвідувачів може мати кілька пристроїв або не мати їх узагалі, що дає значну похибку.

Слід зауважити, що в межах цієї роботи радіочастотні технології розглядаються у двох різних ролях, які важливо не плутати. З одного боку, вони можуть виступати як метод підрахунку (підрахунок Wi-Fi/BLE пристроїв), і саме в цій ролі вони мають низьку точність. З іншого боку,

радіочастотні технології є основою телекомунікаційної підсистеми передавання даних, вибір якої розглядається окремо в розділі 2. Таким чином, відхилення радіочастотного методу підрахунку жодним чином не суперечить використанню радіозв'язку як каналу передавання телеметрії.

Порівняння основних груп технологій за ключовими критеріями наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняння технологій підрахунку людей

Технологія	Точність	Енерго-споживання	Вартість	Приватність
Контактні	висока	низьке	середня	висока
Інфрачервоні	висока	низьке	низька	висока
Оптичні (відео)	дуже висока	високе	висока	низька
Радіочастотні	низька	середнє	середня	середня

1.3 Аналіз принципів роботи давачів у системах підрахунку

Серед розглянутих груп для автономної системи підрахунку людей в укритті найбільш доцільними є інфрачервоні давачі, тому їх принципи роботи розглянуто детальніше.

Пасивний інфрачервоний давач (PIR) реагує на зміну теплового випромінювання в полі зору. Він простий і дешевий, проте погано визначає напрямок руху та кількість людей за щільного потоку, оскільки фіксує лише факт руху, а не окремі об'єкти. Для точного підрахунку зі врахуванням напрямку застосовують парну схему активних інфрачервоних бар'єрів.

Активний інфрачервоний бар'єр складається з випромінювача та приймача, між якими формується вузький промінь. Прохід людини перериває промінь, що реєструється як подія. Розташувавши два промені А та В на невеликій відстані один від одного впоперек проходу, можна визначити напрямок руху за послідовністю їх спрацювання: послідовність А→В відповідає входу, а В→А — виходу. Принцип роботи такої схеми зображено на рисунку 1.2.

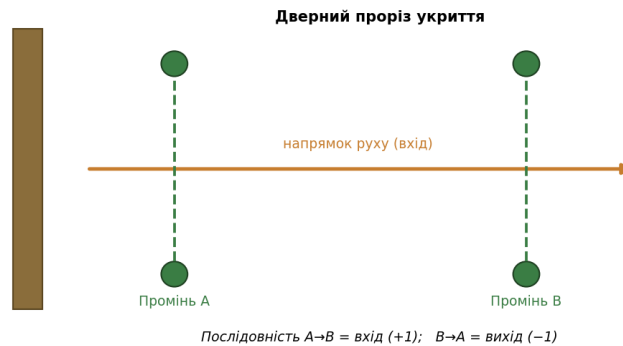


Рис. 1.2 — Принцип визначення напрямку руху парою інфрачервоних давачів

Кількість людей в укритті визначається як накопичена різниця між кількістю входів і виходів. Такий підхід забезпечує визначення не лише факту проходу, а й балансу, що відповідає фактичній заповненості. Для підвищення достовірності в умовах щільного потоку може застосовуватися давач відстані ToF, який дозволяє розрізняти кількість людей, що проходять одночасно, проте для базової реалізації достатньо парної схеми бар'єрів.

1.4 Аналіз джерел похибок підрахунку

Точність підрахунку є ключовою характеристикою системи. Для обраного методу парних інфрачервоних бар'єрів можна виокремити кілька основних джерел похибок. Перше — одночасний прохід кількох людей упритул, коли давачі не встигають розрізнити окремі перетинання променя. Друге — затримка або зупинка людини в зоні давачів, що може спричинити хибне спрацювання. Третє — проходження сторонніх об'єктів (наприклад, перенесення речей), що теж перетинають промінь. Четверте — хибні спрацювання через зовнішні чинники: коливання освітлення, комах, забруднення оптики.

Для зменшення похибок застосовують програмні та апаратні засоби. Аналіз тривалості переривання променя дозволяє відсіювати дуже короткі (завадові) та дуже довгі (зупинка) спрацювання. Часове вікно очікування другого променя обмежує реєстрацію лише послідовних узгоджених перетинань. Правильне розташування давачів на оптимальній висоті та відстані зменшує вплив сторонніх об'єктів. Для критичних застосувань із

щільним потоком може застосовуватися давач ToF, здатний розрізняти кількість одночасних проходів. Згідно з проектною вимогою, сумарна похибка підрахунку не повинна перевищувати 5 %, що є досяжним для обраного методу за правильного налаштування й розташування давачів у типових умовах експлуатації укриття.

1.5 Обґрунтування вибору методу підрахунку

З урахуванням умов експлуатації (автономність, розташування в підвальних приміщеннях, вимога захисту приватності, необхідність невисокої вартості при масштабуванні) для розроблюваної системи обрано метод підрахунку на основі парних активних інфрачервоних бар'єрів із визначенням напрямку руху. Цей метод поєднує високу точність, низьке енергоспоживання, низьку вартість та повне дотримання приватності, оскільки не фіксує жодних персональних даних. Відеоаналітичні методи відхилено через високе енергоспоживання та проблеми приватності, а радіочастотні — через принципово низьку точність обліку людей.

1.6 Огляд існуючих рішень та аналогів

На ринку представлено низку комерційних систем підрахунку відвідувачів, що застосовуються переважно в ритейлі та керуванні будівлями. Їх можна умовно поділити на три категорії: інфрачервоні лічильники проходу, відеоаналітичні системи та системи на основі підрахунку бездротових пристроїв. Розгляд цих рішень дозволяє виокремити сильні сторони, придатні для адаптації, та обмеження, які слід урахувати.

Інфрачервоні лічильники проходу (наприклад, рішення на основі двопромених давачів) широко застосовуються у вхідних зонах магазинів. Вони недорогі, прості та надійні, проте здебільшого працюють автономно або передають дані локально й не призначені для територіально розподіленого моніторингу багатьох об'єктів через далекодіючий канал зв'язку. Відеоаналітичні системи забезпечують найвищу точність та

додаткову аналітику, проте мають високу вартість, потребують стабільного живлення й обчислювальних ресурсів і порушують приватність. Системи підрахунку Wi-Fi/BLE пристроїв застосовуються для оцінювання потоків людей, проте дають значну похибку й непридатні для точного обліку.

Аналіз показує, що готові комерційні рішення не задовольняють специфічних вимог задачі: жодне з них не поєднує одночасно автономність, далекодіючий безпроводовий зв'язок, незалежність від зовнішньої інфраструктури та захист приватності в умовах експлуатації укриттів. Це підтверджує доцільність розробки спеціалізованої системи, яка поєднує перевірений метод підрахунку (інфрачервоні бар'єри) з телекомунікаційною технологією далекої дії (LoRa) та централізованим моніторингом, адаптованих до умов захисних споруд цивільного захисту.

Висновки

1. Проаналізовано технічне завдання та сформульовано функціональні й нефункціональні вимоги до системи: автономність не менше 12 годин, безпроводовий вивід інформації, обслуговування не менше трьох укриттів ємністю до 200 осіб, стійкість зв'язку у складних радіоумовах підвальних приміщень.

2. Розглянуто та порівняно чотири групи технологій підрахунку людей — контактні, інфрачервоні, оптичні та радіочастотні. Встановлено, що для автономної системи з вимогами приватності й низької вартості оптимальними є інфрачервоні рішення.

3. Обґрунтовано вибір методу підрахунку на основі парних активних інфрачервоних бар'єрів із визначенням напрямку руху, що дозволяє визначати фактичну заповненість укриття як накопичену різницю входів і виходів.

4. Проаналізовано джерела похибок підрахунку та визначено програмні й апаратні засоби їх зменшення, що дозволяє забезпечити проєктну вимогу щодо похибки не більше 5 %. Огляд існуючих рішень підтвердив відсутність

готових аналогів, які поєднують автономність, далекодіючий зв'язок і захист приватності в умовах укриттів, що обґрунтовує доцільність власної розробки.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА ВИБІР БЕЗПРОВОДОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Оскільки тема роботи передбачає використання саме телекомунікаційних технологій, вибір безпроводової технології передавання даних є одним із центральних проєктних рішень. У цьому розділі розглянуто основні технології безпроводового зв'язку, придатні для побудови розподіленої системи моніторингу укриттів, та обґрунтовано їх вибір за визначеними критеріями.

2.1 Критерії вибору технології

Виходячи з вимог технічного завдання та умов експлуатації, для оцінювання технологій визначено такі критерії:

- дальність зв'язку — має забезпечувати покриття території з кількома укриттями, потенційно на відстані до кількох кілометрів;
- енергоспоживання — критичне для автономних вузлів, що мають працювати не менше 12 годин;
- пропускна здатність — для передавання телеметрії достатньо невисокої швидкості, оскільки обсяг даних малий;
- здатність проникнення сигналу — упевнений зв'язок із підвальних приміщень;
- вартість і простота розгортання, відсутність потреби в ліцензуванні частот.

Слід зауважити, що задача передавання телеметрії заповненості висуває нетипові для звичайних мереж вимоги: обсяг корисних даних украй малий (кілька байтів на пакет), частота оновлення низька (події входу/виходу), натомість визначальними є дальність та енергоефективність. Це характерний профіль застосувань класу LPWAN (Low-Power Wide-Area Network).[5]

2.2 Огляд технологій Wi-Fi та Bluetooth Low Energy

Технологія Wi-Fi (IEEE 802.11) забезпечує високу пропускну здатність і повсюдно поширена, проте має суттєві недоліки для цієї задачі: відносно високе енергоспоживання, обмежену дальність (десятки метрів у приміщенні) та залежність від наявної інфраструктури точок доступу. Висока пропускну здатність Wi-Fi надлишкова для передавання кількох байтів телеметрії, а енергоспоживання унеможливорює тривалу автономну роботу від невеликого акумулятора.

Bluetooth Low Energy (BLE) спроектовано для енергоефективної передачі малих обсягів даних і він має дуже низьке споживання. Проте дальність BLE обмежена десятками метрів, що недостатньо для зв'язку між рознесеними укриттями. BLE доцільний радше як локальний інтерфейс у межах одного приміщення, а не як магістральний канал системи.[6]

2.3 Огляд технології ZigBee

ZigBee (IEEE 802.15.4) — енергоефективна технологія для побудови самоорганізованих сітчастих (mesh) мереж. Вона забезпечує низьке споживання та можливість ретрансляції через проміжні вузли, що розширює покриття. Однак для надійного покриття великої території потрібна щільна мережа ретрансляторів, а дальність окремого з'єднання залишається невеликою (десятки–сотні метрів). Для територіально рознесених укриттів без проміжної інфраструктури ZigBee є менш зручним, ніж технології далекої дії.[7,8]

2.4 Огляд технології LoRa та LoRaWAN

LoRa (Long Range) — технологія фізичного рівня класу LPWAN, що використовує модуляцію з лінійною частотною маніпуляцією (Chirp Spread Spectrum, CSS). Завдяки розширенню спектра LoRa забезпечує надзвичайно

високу чутливість приймача та стійкість до завад, що дозволяє досягати дальності в кілька кілометрів за дуже низького енергоспоживання. LoRa працює в неліцензованих ISM-діапазонах (в Європі — 868 МГц).[9]

Ключовим параметром LoRa є коефіцієнт розширення спектра (Spreading Factor, SF) у діапазоні від 7 до 12. Збільшення SF підвищує чутливість приймача й дальність, але водночас збільшує час перебування пакета в ефірі та енергоспоживання на передавання. Залежність часу передавання та чутливості від SF наведено на рисунку 2.1.

Фізичний рівень LoRa характеризується трьома основними параметрами: коефіцієнтом розширення SF, шириною смуги пропускання (зазвичай 125, 250 або 500 кГц) та швидкістю кодування завадостійкого коду. Швидкість передавання даних залежить від цих параметрів і зменшується зі зростанням SF. Завдяки модуляції CSS сигнал LoRa може прийматися навіть за від'ємного відношення сигнал/шум (SNR), тобто коли рівень корисного сигналу нижчий за рівень шуму, що й забезпечує виняткову дальність і завадостійкість технології. Модуляція є стійкою до ефекту Доплера та до зсуву частоти, що спрощує вимоги до опорних генераторів недорогих модулів.[10]

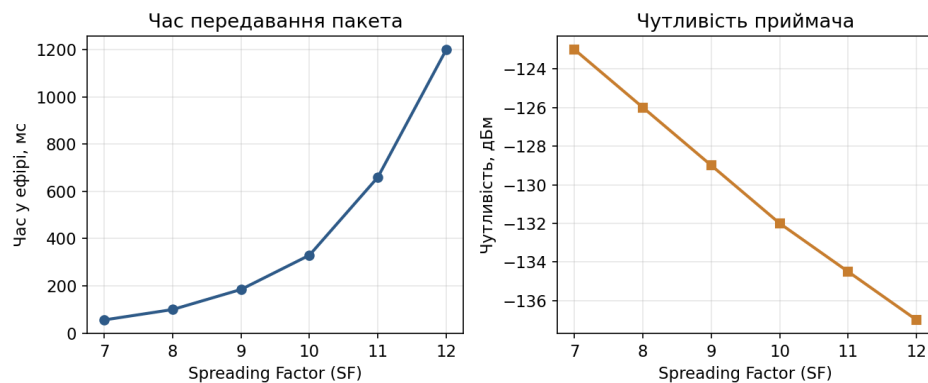


Рис. 2.1 — Залежність часу передавання та чутливості приймача від SF

Орієнтовний бюджет лінії зв'язку (link budget) визначає максимально допустиме загасання сигналу й розраховується за виразом:

$$L = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - S, \quad (2.1)$$

де P_{tx} — потужність передавача (для LoRa зазвичай 14 дБм); G_{tx} , G_{rx} — підсилення антен передавача й приймача; S — чутливість приймача (до -137 дБм за SF12). За типових значень бюджет лінії перевищує 150 дБ, що забезпечує дальність у кілька кілометрів у міській забудові й упевнений зв'язок із підвальних приміщень.

LoRaWAN — це мережевий протокол поверх фізичного рівня LoRa, що визначає архітектуру «зірка із зірок» із кінцевими пристроями, шлюзами та мережевим сервером, а також механізми адресації, безпеки та адаптивної зміни швидкості (ADR). Для розроблюваної системи з невеликою кількістю об'єктів можлива як побудова на основі повноцінного LoRaWAN, так і використання простого режиму «точка–точка» LoRa з власним шлюзом, що спрощує реалізацію. [11]

Протокол LoRaWAN визначає три класи кінцевих пристроїв. Пристрої класу А мають найнижче енергоспоживання: вони ініціюють зв'язок передаванням висхідного повідомлення, після чого відкривають два короткі вікна приймання. Пристрої класу В додатково відкривають заплановані вікна приймання за розкладом, а класу С — приймають майже безперервно, маючи найвище споживання. Для давачних вузлів системи підрахунку, що працюють автономно й переважно передають дані, оптимальним є режим, аналогічний класу А. Механізм адаптивної зміни швидкості ADR дозволяє мережі автоматично підбирати SF для кожного вузла залежно від якості зв'язку, мінімізуючи енергоспоживання за хороших радіоумов. У цій роботі для спрощення реалізації та зменшення залежності від зовнішньої інфраструктури обрано режим прямого зв'язку «точка–точка» між вузлами та власним шлюзом, що зберігає всі переваги фізичного рівня LoRa.

2.5 Огляд технології NB-IoT

NB-IoT (Narrowband IoT) — стільникова технологія LPWAN, що працює в ліцензованих діапазонах операторів мобільного зв'язку. Вона забезпечує добру дальність і проникнення сигналу, проте має суттєві для цієї

задачі недоліки: залежність від покриття та працездатності мереж оператора (що в умовах надзвичайних ситуацій і відключень електроживлення є критичним ризиком), необхідність SIM-карток та абонентської плати, а також вище енергоспоживання порівняно з LoRa. Залежність від зовнішньої інфраструктури зв'язку суперечить вимозі надійної автономної роботи укриттів.[12]

2.6 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору

Зведене порівняння розглянутих технологій за визначеними критеріями наведено в таблиці 2.1, а графічне співставлення дальності та енергоспоживання — на рисунку 2.2.[13,14]

Таблиця 2.1

Порівняння безпроводових технологій

Технологія	Дальність	Споживання	Швидкість	Особливості
Wi-Fi	до 100 м	високе	висока	потребує інфраструктури
BLE	до 50 м	дуже низьке	низька	локальний інтерфейс
ZigBee	до 100 м	низьке	низька	mesh, потрібні ретранслятори
LoRa	2–5 км	дуже низьке	низька	далека дія, ISM 868 МГц
NB-IoT	5–10 км	середнє	низька	залежить від оператора

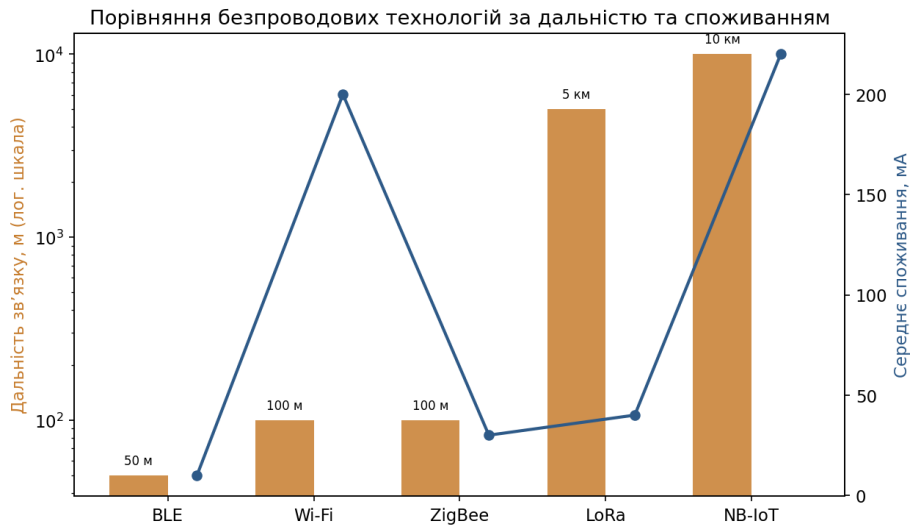


Рис. 2.2 — Порівняння технологій за дальністю та енергоспоживанням

Аналіз показує, що для магістрального каналу передавання телеметрії між укриттями та шлюзом оптимальною є технологія LoRa. Вона забезпечує необхідну дальність у кілька кілометрів, найнижче серед далекодіючих технологій енергоспоживання, упевнене проникнення сигналу з підвальних приміщень, працює в неліцензованому діапазоні без абонентської плати та не залежить від працездатності стільникових мереж. Невисока пропускна здатність LoRa не є обмеженням, оскільки обсяг телеметрії украй малий. Технологію NB-IoT відхилено через залежність від оператора, Wi-Fi — через енергоспоживання та потребу в інфраструктурі, BLE та ZigBee — через недостатню дальність. Таким чином, для каналу «вузол → шлюз» обрано LoRa, тоді як підключення шлюзу до сервера здійснюватиметься через наявний канал Internet (Wi-Fi або Ethernet).

2.7 Вибір топології мережі

Окрім вибору технології фізичного рівня, важливим є вибір топології мережі — способу організації зв'язків між вузлами. Основними варіантами є топологія «зірка», за якої всі вузли передають дані безпосередньо до центрального шлюза, та сітчаста (mesh) топологія, за якої вузли можуть ретранслювати дані одне одного, розширюючи покриття.[15]

Для розроблюваної системи обрано топологію «зірка», що є природною для технології LoRa та задовольняє вимоги задачі. Завдяки великій дальності LoRa один шлюз здатний охопити всі укриття в межах населеного пункту без потреби в ретрансляції, тому переваги mesh-топології (розширення покриття через проміжні вузли) не є визначальними. Натомість топологія «зірка» простіша в реалізації, не потребує складних алгоритмів маршрутизації, забезпечує менші затримки та нижче енергоспоживання вузлів, оскільки кожен вузол лише передає власні дані й не витрачає енергію на ретрансляцію чужих. У разі, якщо окремі укриття опиняться поза зоною прямої видимості шлюза, покриття розширюється встановленням додаткового шлюза, а не переходом до mesh-топології, що зберігає простоту архітектури.

2.8 Регуляторні обмеження діапазону 868 МГц

Робота в неліцензованому ISM-діапазоні 868 МГц регламентується нормами щодо максимальної потужності випромінювання та обмеження коефіцієнта використання каналу (duty cycle). Згідно з європейськими нормами, для більшості піддіапазонів 868 МГц максимальна еквівалентна потужність обмежена рівнем 25 мВт (14 дБм), а коефіцієнт використання каналу — значенням 1 % за годину для окремих піддіапазонів. Це означає, що пристрій може займати канал не більше визначеної частки часу, що накладає обмеження на частоту та тривалість передавань.[16]

Розроблена система природно вкладається в ці обмеження завдяки обраній стратегії передавання. Оскільки давачний вузол передає короткий (до 6 байтів) пакет лише за зміни заповненості, а не безперервно, реальний коефіцієнт використання каналу одним вузлом є значно нижчим за допустимий. Навіть за інтенсивного руху людей сумарний час передавань залишається в межах кількох відсотків часу, що відповідає нормам. Дотримання регуляторних вимог є важливим не лише з правового погляду, а й для безконфліктного співіснування багатьох вузлів у спільному діапазоні, оскільки обмеження duty cycle опосередковано зменшує ймовірність колізій.

2.9 Розрахунок бюджету радіолінії та оцінювання дальності

Для підтвердження придатності обраної технології до умов задачі виконано орієнтовний розрахунок бюджету радіолінії. Бюджет лінії визначає максимально допустиме загасання сигналу на трасі поширення, за якого зв'язок ще залишається можливим. Він обчислюється як різниця між сумарною потужністю на боці передавача з урахуванням підсилення антен і чутливістю приймача за виразом (2.1).

Приймемо такі типові значення для модуля на базі SX1278 у діапазоні 868 МГц: потужність передавача $P_{tx} = 14$ дБм, підсилення передавальної та

приймальної антен $G_{tx} = G_{rx} = 2$ дБі, чутливість приймача за SF10 $S = -132$ дБм. Тоді бюджет лінії становить:

$$L = 14 + 2 + 2 - (-132) = 150 \text{ дБ}. \quad (2.2)$$

Для оцінювання дальності скористаємося спрощеною моделлю поширення радіохвиль у вільному просторі, згідно з якою загасання залежить від відстані та частоти:

$$L_{\text{вн}} = 32,45 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d), \quad (2.3)$$

де $L_{\text{вн}}$ — загасання у вільному просторі, дБ; f — частота, МГц; d — відстань, км. Підставивши граничне значення $L_{\text{вн}} = 150$ дБ та $f = 868$ МГц, отримаємо теоретичну дальність у вільному просторі понад 30 км. У реальних умовах міської забудови з урахуванням загасання в перешкодах, стінах підвальних приміщень та інших втрат фактична дальність зменшується до кількох кілометрів, що, однак, із запасом задовольняє вимогу покриття кількох укриттів у межах населеного пункту.

Слід враховувати запас на завмирання сигналу (fade margin), який зазвичай приймають на рівні 10–15 дБ для компенсації багатопроменевого поширення та випадкових завмирань. Навіть з урахуванням цього запасу та значного додаткового загасання в будівельних конструкціях бюджет лінії LoRa залишається достатнім, що підтверджує здатність технології забезпечувати зв'язок із давачних вузлів, розташованих у підвальних приміщеннях укриттів.

Завадостійкість технології забезпечується модуляцією CSS, яка дозволяє коректно приймати сигнал за від'ємних значень SNR. Для SF10 граничне відношення сигнал/шум становить близько -15 дБ, тобто корисний сигнал може бути значно слабшим за рівень шуму. Це робить LoRa придатною для роботи в умовах промислових та побутових завад, характерних для міського середовища.

Висновки

1. Визначено критерії вибору безпроводової технології: дальність, енергоспоживання, пропускна здатність, проникнення сигналу, вартість та незалежність від зовнішньої інфраструктури. Встановлено, що профіль задачі відповідає класу мереж LPWAN.

2. Проведено огляд технологій Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa та NB-IoT і виконано їх порівняльний аналіз за визначеними критеріями.

3. Обґрунтовано вибір технології LoRa для магістрального каналу передавання телеметрії як такої, що поєднує далеку дію, мінімальне енергоспоживання, незалежність від стільникових мереж та роботу в неліцензованому діапазоні.

4. Обрано топологію мережі «зірка» як оптимальну для LoRa та задачі, виконано розрахунок бюджету радіолінії, що підтвердив достатню дальність зв'язку з підвальних приміщень, та проаналізовано регуляторні обмеження діапазону 868 МГц, яким розроблена система відповідає завдяки епізодичному характеру передавань.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ТА АЛГОРИТМІВ ЇЇ РОБОТИ

3.1 Загальна архітектура системи

На основі обраних у попередніх розділах методу підрахунку та технології зв'язку розроблено архітектуру системи. Система має ієрархічну трирівневу структуру, типову для рішень Інтернету речей (IoT), що зображена на рисунку 3.1.

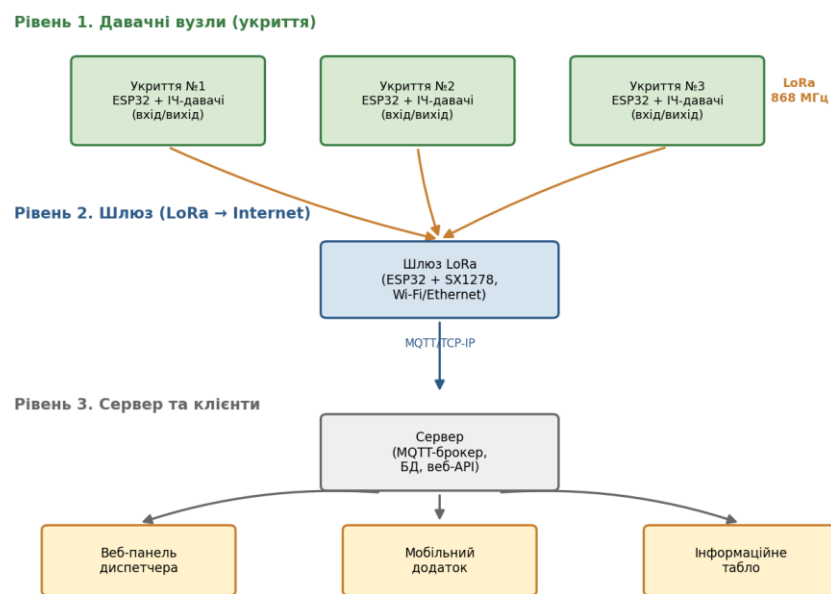


Рис. 3.1 — Трирівнева архітектура системи

Перший рівень утворюють давачні вузли, встановлені в кожному укритті. Вузол містить пару інфрачервоних давачів, мікроконтролер для обробки подій і підрахунку, а також LoRa-передавач. Вузол локально визначає кількість людей в укритті та передає її значення радіоканалом.

Другий рівень — шлюз (gateway), що приймає LoRa-пакети від усіх давачних вузлів і ретранслює їх до сервера через канал Internet. Один шлюз обслуговує всі укриття в межах радіопокриття, що відповідає вимозі обслуговування не менше трьох об'єктів.

Третій рівень — серверна частина та клієнтські застосунки. Сервер приймає дані, зберігає їх у базі даних і надає доступ через програмний

інтерфейс. Клієнтами виступають веб-панель диспетчера, мобільний додаток та інформаційні табло, що відображають поточну заповненість.

Вибір саме трирівневої архітектури зумовлений її відповідністю розподіленому характеру задачі та принципам побудови систем Інтернету речей. Розділення на рівні забезпечує модульність: давачні вузли відповідають лише за збирання й первинну обробку даних, шлюз — за агрегацію та ретрансляцію, а сервер — за зберігання, обробку й надання інформації. Така структура спрощує масштабування (додавання нових укріттів не потребує зміни серверної частини), підвищує надійність (відмова окремого вузла не впливає на роботу інших) та дозволяє незалежно розвивати кожен рівень. Крім того, винесення обчислювально складних задач на серверний рівень дозволяє зберегти давачні вузли простими й енергоефективними.

3.2 Структурна схема системи

Структурна схема, що деталізує взаємодію компонентів та канали зв'язку між ними, наведена на рисунку 3.2. Кожен давачний вузол передає дані до спільного шлюзу каналом LoRa, шлюз обмінюється даними із сервером за протоколом MQTT поверх стека TCP/IP, а клієнтські застосунки отримують інформацію через веб-API сервера.

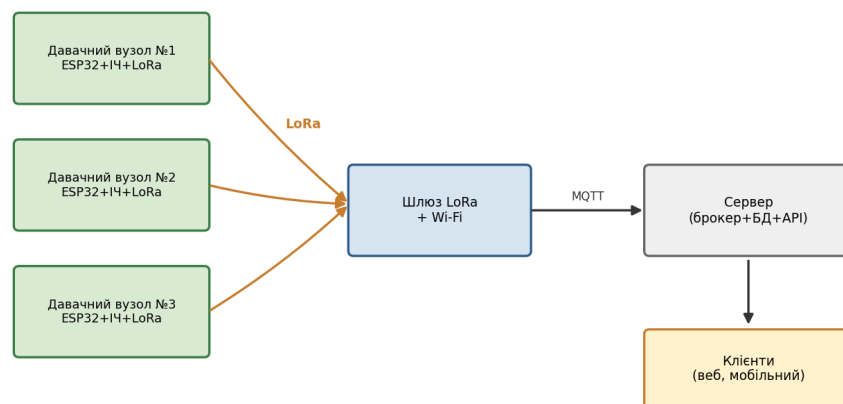


Рис. 3.2 — Структурна схема системи підрахунку людей

3.3 Функціональна схема системи

Функціональна схема відображає послідовність перетворення інформації в системі — від реєстрації проходу давачами до відображення даних користувачам. Сигнали інфрачервоних давачів надходять на блок обробки подій та фільтрації, який відсіює завадові спрацювання. Далі блок визначення напрямку аналізує послідовність подій і оновлює лічильник людей. За зміни значення лічильника формується пакет, який передається каналом LoRa до шлюзу, а звідти за протоколом MQTT — до сервера й бази даних, звідки дані надаються клієнтам через API. Паралельно поточне значення відображається на локальному індикаторі. Функціональну схему системи наведено на рисунку 3.3.

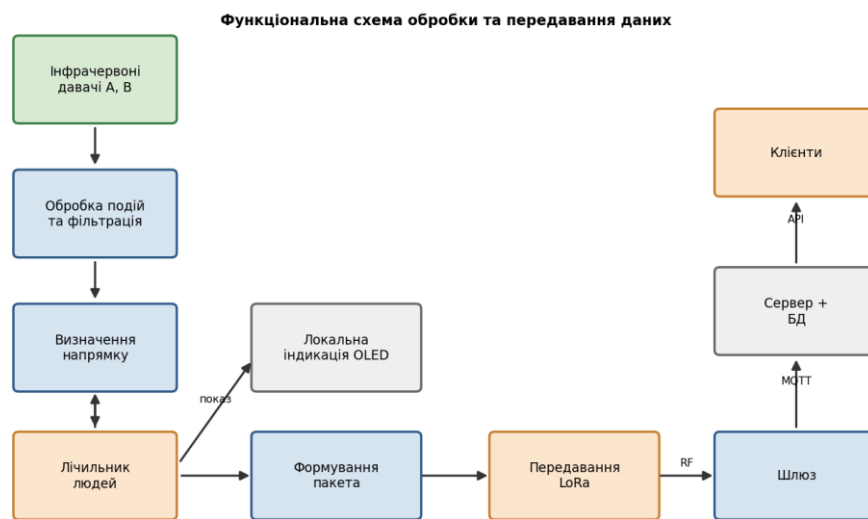


Рис. 3.3 — Функціональна схема обробки та передавання даних

3.4 Протокол обміну та формат даних

Для передавання телеметрії між шлюзом і сервером обрано протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — легкий протокол публікації/підписки, спеціально розроблений для телеметрії в умовах ненадійних каналів і обмежених ресурсів. Шлюз публікує дані в теми (topics) брокера, а серверний сервіс підписується на них.[17]

Модель публікації/підписки MQTT добре відповідає задачі: шлюз (видавець) не потребує знань про конкретних споживачів даних, а будь-яка кількість клієнтів може підписатися на потрібні теми через брокера. Темы організовано ієрархічно за схемою `shelter/{id}/occupancy`, що дозволяє як отримувати дані окремого укриття, так і підписуватися на всі укриття одночасно за шаблоном `shelter/+occupancy`. Протокол передбачає три рівні якості обслуговування (QoS), що дозволяють обрати компроміс між гарантією доставлення та накладними витратами. Порівняно з альтернативами (HTTP, CoAP) MQTT забезпечує менші накладні витрати на встановлення з'єднання та підтримання сесії, що важливо для систем з обмеженими ресурсами.[18]

Корисне навантаження LoRa-пакета спроектовано компактним для мінімізації часу в ефірі та енергоспоживання. Структуру пакета наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Формат пакета телеметрії

Поле	Розмір	Призначення
ID вузла	1 байт	ідентифікатор укриття
Лічильник	2 байти	поточна кількість людей (0–65535)
Стан живлення	1 байт	ознака роботи від мережі/акумулятора, рівень заряду
Лічильник пакетів	1 байт	порядковий номер для виявлення втрат
Контрольна сума	1 байт	перевірка цілісності

Загальний розмір пакета не перевищує 6 байтів, що забезпечує мінімальний час перебування в ефірі навіть за високих значень SF, а отже й мінімальне енергоспоживання на передавання.

3.5 Алгоритм роботи давачного вузла

Робота давачного вузла побудована за подієво-орієнтованим принципом з енергозбереженням. Після ініціалізації вузол перебуває в

режимі очікування подій від інфрачервоних датчиків. Алгоритм роботи вузла наведено на рисунку 3.4.

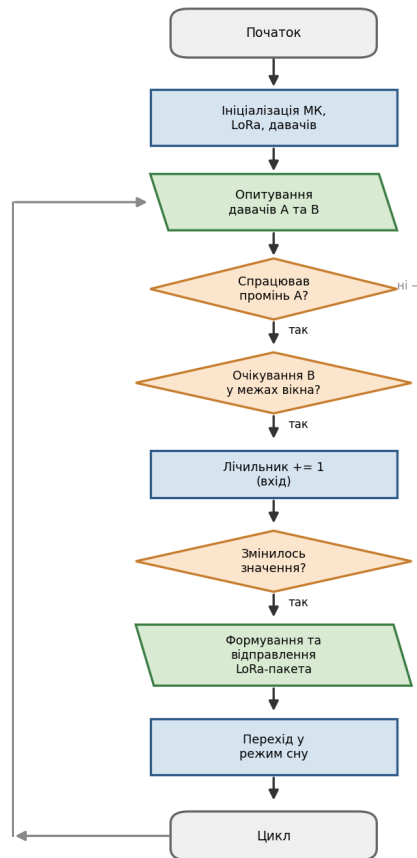


Рис. 3.4 — Блок-схема алгоритму роботи датчного вузла

Логіка визначення напрямку руху ґрунтується на аналізі послідовності спрацювання датчиків. У разі спрацювання променя А вузол очікує спрацювання променя В протягом заданого часового вікна (зазвичай 0,5–1 с). Якщо В спрацьовує в межах вікна, фіксується вхід і лічильник збільшується на одиницю; зворотна послідовність В→А відповідає виходу й зменшенню лічильника. Передавання даних здійснюється лише за зміни значення лічильника, що мінімізує радіообмін. Між подіями мікроконтролер переходить у режим зниженого енергоспоживання.

3.6 Алгоритм роботи шлюзу та серверної частини

Шлюз безперервно приймає LoRa-пакети від датчних вузлів. Приймавши пакет, шлюз перевіряє контрольну суму, за потреби —

порядковий номер пакета для виявлення втрат, формує повідомлення у форматі JSON і публікує його MQTT-брокеру з відповідною темою, що містить ідентифікатор укриття. У разі тимчасової недоступності каналу Internet шлюз буферизує повідомлення.

Серверний сервіс підписаний на теми телеметрії. Отримавши повідомлення, він зберігає поточне значення заповненості та позначку часу в базі даних, оновлює агреговану картину стану всіх укриттів і робить дані доступними через веб-API. Клієнтські застосунки періодично опитують API або отримують оновлення в реальному часі, відображаючи поточну заповненість та її історію.

Окремої уваги потребує обробка нештатних ситуацій. У разі тривалої відсутності пакетів від певного вузла сервер позначає відповідне укриття як таке, що не на зв'язку, і сигналізує про це диспетчеру, оскільки причиною може бути розряд акумулятора або несправність. Поле стану живлення в пакеті дозволяє завчасно попереджати про перехід вузла на резервне живлення та про низький рівень заряду, що дає змогу обслуговуючому персоналу вчасно вжити заходів. Таким чином, система не лише веде облік людей, а й контролює власну працездатність, що підвищує її надійність в умовах реальної експлуатації.

3.7 Масштабування системи

Розроблена архітектура передбачає можливість масштабування на велику кількість укриттів. Оскільки давачні вузли передають дані до спільного шлюзу за схемою «зірка», додавання нового укриття зводиться до встановлення в ньому давачного вузла з унікальним ідентифікатором, без потреби в зміні шлюзу чи серверної частини. Місткість системи за кількістю вузлів на один шлюз обмежується пропускнуою здатністю радіоканалу та допустимим завантаженням каналу (duty cycle), регламентованим для неліцензованого діапазону 868 МГц.

Оцінимо граничну кількість вузлів. За умови, що один вузол передає короткий пакет (час у ефірі близько 60–300 мс залежно від SF) лише за зміни заповненості, тобто з низькою частотою, один шлюз здатний обслуговувати десятки й навіть сотні вузлів. У разі потреби покриття значної території або великої кількості об'єктів система масштабується додаванням додаткових шлюзів, кожен з яких незалежно передає дані на спільний сервер. Таким чином, архітектура забезпечує гнучке масштабування від кількох укриттів (відповідно до вимоги технічного завдання щодо не менше трьох об'єктів) до мережі міського масштабу.[19]

3.8 Забезпечення надійності та обробка колізій

Оскільки кілька давачних вузлів передають дані до спільного шлюзу в одному частотному діапазоні, можливі колізії — одночасне передавання пакетів двома вузлами, що призводить до їх спотворення. Для зменшення ймовірності колізій застосовано кілька механізмів. По-перше, передавання здійснюється лише за зміни значення лічильника, тобто епізодично, що різко знижує завантаження каналу. По-друге, момент передавання зміщується на випадкову невелику затримку, що запобігає систематичному накладанню пакетів від різних вузлів. По-третє, у пакеті передбачено порядковий номер, який дозволяє шлюзу виявляти втрати.

Для підвищення достовірності даних застосовано підтвердження критичних змін: у разі неотримання шлюзом пакета вузол може повторити передавання після випадкової паузи. Оскільки лічильник передає абсолютне значення кількості людей, а не приріст, навіть втрата окремого пакета не призводить до накопичення помилки — наступний успішно прийнятий пакет містить актуальне коректне значення. Це є важливою перевагою обраного формату даних, що передає стан, а не події.

3.9 Забезпечення інформаційної безпеки

Хоча дані про заповненість укриттів не є персональними, забезпечення базової інформаційної безпеки є важливим для запобігання несанкціонованому втручанню та підміні даних. На рівні радіоканалу LoRa передбачено можливість шифрування корисного навантаження симетричним алгоритмом, що унеможлиблює підміну показань зловмисником. На рівні обміну шлюз–сервер протокол MQTT підтримує автентифікацію за логіном та паролем і шифрування каналу засобами TLS. Доступ клієнтських застосунків до серверного API здійснюється з автентифікацією, що розмежовує права диспетчерів та звичайних користувачів. Такий багаторівневий підхід забезпечує цілісність і достовірність даних системи без надмірного ускладнення реалізації.[20]

Висновки

1. Розроблено трирівневу архітектуру системи, що складається з давачних вузлів в укриттях, спільного шлюзу LoRa та серверної частини з клієнтськими застосунками.
2. Обґрунтовано застосування протоколу MQTT для обміну між шлюзом і сервером та спроектовано компактний (до 6 байтів) формат пакета телеметрії, що мінімізує час у ефірі й енергоспоживання.
3. Розроблено алгоритми роботи давачного вузла (подієве визначення напрямку руху з енергозбереженням) та шлюзу й серверної частини (приймання, перевірка, публікація та зберігання телеметрії).
4. Передбачено механізми масштабування системи, обробки колізій у спільному радіоканалі та забезпечення інформаційної безпеки, що підвищує надійність і придатність системи до експлуатації в реальних умовах та масштабування на велику кількість укриттів.

РОЗДІЛ 4

ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА СХЕМ СИСТЕМИ

4.1 Вибір мікроконтролера

Центральним елементом давачного вузла є мікроконтролер (МК), що виконує обробку подій від давачів, підрахунок, керування LoRa-модулем та індикацією. До МК висувуються вимоги достатньої продуктивності, низького енергоспоживання з підтримкою режимів сну, наявності інтерфейсів SPI (для LoRa) та I²C (для індикатора), а також низької вартості.[23]

Розглянуто три поширені варіанти платформ: Arduino (на базі ATmega328P), STM32 та ESP32. Їх порівняння наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняння платформ мікроконтролерів

Параметр	Arduino (AVR)	STM32	ESP32
Розрядність / частота	8 біт / 16 МГц	32 біти / 72 МГц	32 біти / 240 МГц
ОЗП	2 КБ	20–64 КБ	520 КБ
Вбудований Wi-Fi/BLE	немає	немає	є
Режим глибокого сну	обмежено	є	є (~10 мкА)
Інтерфейси SPI/I ² C	є	є	є
Орієнтовна вартість	низька	середня	низька

Платформа Arduino на базі AVR, попри простоту й популярність, має обмежені обчислювальні ресурси, не містить вбудованих безпроводових інтерфейсів і має менш гнучкі режими енергозбереження, що ускладнює реалізацію вимоги тривалої автономності. STM32 є потужним рішенням з добрими енергетичними характеристиками, проте складніший у розробці й не має вбудованого безпроводового зв'язку.[22]

Мікроконтролер ESP32 поєднує високу продуктивність двоядерного процесора, значний обсяг пам'яті, вбудовані Wi-Fi та BLE (зручні для

реалізації шлюзу та локального інтерфейсу), розвинений режим глибокого сну зі споживанням близько 10 мкА, а також усі необхідні інтерфейси SPI та I²C за низької вартості. Тому як обчислювальну платформу і для давачних вузлів, і для шлюзу обрано ESP32. Платформу Arduino відхилено передусім через відсутність вбудованого безпроводового зв'язку та обмежені ресурси, що робить її менш придатною для поставленої задачі.[21]

4.2 Вибір давачів, радіомодуля та індикації

Для реалізації парної схеми підрахунку обрано активні інфрачервоні бар'єри з цифровим виходом, які формують логічний сигнал переривання променя, безпосередньо придатний для обробки на цифрових входах МК. Як радіомодуль обрано модуль на базі мікросхеми Semtech SX1278 (наприклад, RA-02 або Ra-01) для діапазону 433/868 МГц, що підключається до ESP32 через інтерфейс SPI. Для локального відображення поточної заповненості обрано OLED-дисплей на контролері SSD1306 з інтерфейсом I²C. Перелік основної елементної бази вузла наведено в таблиці 4.2.[24]

Вибір мікросхеми SX1278 зумовлений її широким поширенням, доступністю недорогих готових модулів та повною підтримкою стека LoRa для діапазону 868 МГц, дозволеного для використання в Європі. Модуль з'єднується з мікроконтролером за стандартним інтерфейсом SPI з додатковими лініями керування (скидання та переривання DIO0), що спрощує програмну реалізацію за наявності готових бібліотек. Підсистема живлення побудована за принципом резервування: у штатному режимі вузол може живитися від зовнішнього джерела 5 В, а в разі його зникнення — від літій-іонного акумулятора. Стабілізатор MP1584 формує напругу 3,3 В, потрібну для живлення мікроконтролера та модулів, а контролер заряду TP4056 забезпечує безпечний заряд акумулятора з захистом від перезаряду й глибокого розряду.

Таблиця 4.2

Основна елементна база давачного вузла

Елемент	Компонент	Призначення
Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	обробка, підрахунок, керування
ІЧ-давачі	активний ІЧ-бар'єр (×2)	реєстрація проходу та напрямку
Радіомодуль	SX1278 (RA-02)	передавання даних LoRa
Індикація	OLED SSD1306 0,96"	локальне відображення
Стабілізатор	MP1584 (DC-DC)	перетворення 5 В → 3,3 В
Контролер заряду	TP4056	заряд акумулятора
Акумулятор	Li-Ion 18650, 3000 мА·год	автономне живлення

4.3 Структурна схема давачного вузла

Структурна схема давачного вузла, що відображає функціональні блоки та зв'язки між ними, наведена на рисунку 4.1. Інфрачервоні давачі підключені до цифрових входів GPIO мікроконтролера, LoRa-модуль — інтерфейсом SPI, OLED-індикатор — інтерфейсом I²C, а підсистема живлення забезпечує стабілізовану напругу та резервування від акумулятора.



Рис. 4.1 — Структурна схема давачного вузла

4.4 Схема розміщення давачів

Точність підрахунку значною мірою залежить від правильного розміщення давачів. Інфрачервоні бар'єри встановлюються по обидва боки єдиного контрольованого проходу (вхідних дверей укриття) на висоті близько 1 м, утворюючи два рознесені впоперек проходу промені. Давачний вузол кріпиться поруч на стіні. Схему розміщення наведено на рисунку 4.2.



Рис. 4.2 — Схема розміщення давачів в укритті

Важливою умовою коректної роботи є наявність єдиного контрольованого проходу. За наявності кількох входів кожен з них обладнується власною парою давачів, а їх показання сумуються вузлом. Відстань між променями обирається такою, щоб людина під час нормального проходу послідовно перетинала обидва промені, що й дозволяє однозначно визначити напрямок руху.

4.5 Електрична структурна схема

Електрична структурна схема давачного вузла визначає конкретні електричні з'єднання компонентів. Цифрові виходи інфрачервоних бар'єрів підключаються до входів GPIO34 та GPIO35 мікроконтролера. Радіомодуль SX1278 з'єднується шиною SPI (сигнали MOSI, MISO, SCK та лінії NSS, RST, DIO0). OLED-дисплей підключається лініями I²C (SDA, SCL). Підсистема живлення на базі стабілізатора MP1584 формує напругу 3,3 В для

МК і модулів, а контролер заряду TP4056 із літій-іонним акумулятором забезпечує автономне живлення. Спрощену електричну принципову схему наведено на рисунку 4.3.

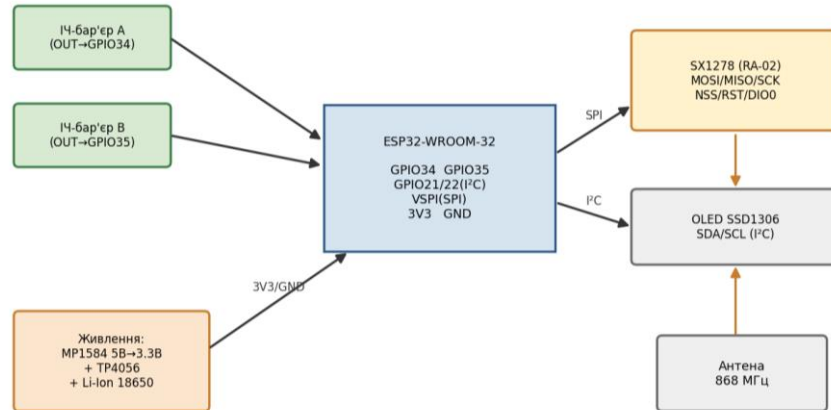


Рис. 4.3 — Електрична структурна схема давачного вузла (спрощено)

4.6 Розрахунок енергоспоживання та часу автономної роботи

Для перевірки виконання вимоги автономності не менше 12 годин виконано оцінювальний розрахунок середнього споживання вузла. Споживання складається зі струму в активному режимі опитування, струму під час сеансів передавання LoRa та струму в режимі сну. Середній струм споживання визначається як зважена за часом сума струмів режимів:

$$I_{\text{сер}} = (I_{\text{акт}} \cdot t_{\text{акт}} + I_{\text{пер}} \cdot t_{\text{пер}} + I_{\text{сон}} \cdot t_{\text{сон}}) / T, \quad (4.1)$$

де $I_{\text{акт}}$, $I_{\text{пер}}$, $I_{\text{сон}}$ — струми в активному режимі, під час передавання та у сні; $t_{\text{акт}}$, $t_{\text{пер}}$, $t_{\text{сон}}$ — тривалості відповідних режимів за період T .

За типового профілю роботи (нечасті події проходу, переважання режиму сну) середній струм споживання вузла становить близько 15–20 мА. Профіль струму споживання протягом характерного інтервалу наведено на рисунку 4.4.

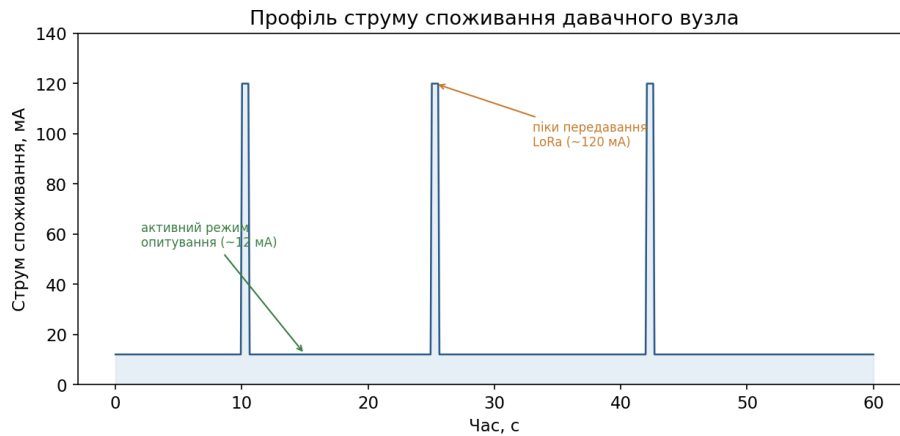


Рис. 4.4 — Профіль струму споживання датчого вузла

Час автономної роботи від акумулятора оцінюється за виразом:

$$t_{\text{авт}} = C_{\text{акум}} \cdot \eta / I_{\text{сер}}, \quad (4.2)$$

де $C_{\text{акум}}$ — ємність акумулятора (3000 мА·год); η — коефіцієнт корисної дії перетворювача живлення ($\approx 0,85$); $I_{\text{сер}}$ — середній струм споживання. За $I_{\text{сер}} \approx 20$ мА час автономної роботи становить близько 127 годин, що зі значним запасом перевищує вимогу 12 годин. Навіть за песимістичної оцінки з урахуванням частих подій проходу та підвищеного споживання запас автономності залишається багаторазовим.

4.7 Розрахунок параметрів інфрачервоних датчиків

Коректність визначення напрямку руху залежить від геометричних параметрів розташування пари інфрачервоних бар'єрів. Відстань між променями має бути такою, щоб людина під час нормального проходу послідовно перетинала спочатку один, а потім другий промінь, утворюючи однозначну часову послідовність подій. Якщо позначити швидкість руху людини v , а відстань між променями s , то часовий інтервал між спрацюваннями двох датчиків визначається як:

$$\Delta t = s / v. \quad (4.3)$$

За типової швидкості ходи $v \approx 1,2$ м/с та відстані між променями $s = 0,15$ м інтервал між спрацюваннями становить близько 125 мс. Це значення

має бути більшим за час реакції давача та меншим за обране часове вікно очікування (800 мс), що забезпечує надійне розрізнення напрямку. Зменшення відстані між променями підвищує чутливість до швидких проходів, але збільшує вимоги до швидкодії опитування давачів, тому обране значення є компромісним.

Висота встановлення давачів обирається на рівні близько 1 м від підлоги — приблизно на рівні тулуба середньостатистичної людини. Це зменшує ймовірність хибних спрацювань від рук, ніг чи предметів, які людина несе, та забезпечує надійне перекриття променя корпусом людини під час проходів. Частота опитування давачів мікроконтролером має забезпечувати реєстрацію навіть швидких проходів; за інтервалу опитування 50 мс і часу перетинання променя в десятки мілісекунд жоден прохід не залишиться непоміченим.

4.8 Вибір та розрахунок антени

Ефективність радіоканалу значною мірою визначається антеною. Для діапазону 868 МГц найпоширенішими є чвертьхвильові штирьові антени, довжина яких визначається довжиною хвилі. Довжина хвилі обчислюється за виразом:

$$\lambda = c / f, \quad (4.4)$$

де c — швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с); f — робоча частота. Для частоти 868 МГц довжина хвилі становить близько 0,345 м. Довжина чвертьхвильового штиря дорівнює $\lambda/4 \approx 86$ мм. Така антена проста у виготовленні, не потребує узгоджувальних кіл за правильної довжини й забезпечує задовільні характеристики для давачного вузла.

Для шлюзу, що приймає сигнали від усіх вузлів, доцільно застосувати антену з більшим підсиленням (наприклад, колінеарну з підсиленням 3–5 дБі), розташовану в місці з кращою радіовидимістю. Підвищення підсилення антени шлюзу безпосередньо збільшує бюджет лінії та покращує покриття всієї системи без зміни давачних вузлів. Орієнтацію та розташування антени

шлюзу слід обирати з урахуванням розміщення укриттів для забезпечення рівномірного покриття.

4.9 Конструктивне виконання вузла

Давачний вузол конструктивно виконується у вигляді компактного блоку, що монтується на стіні поблизу входних дверей укриття. Корпус має забезпечувати захист електроніки від пилу та випадкових механічних впливів, а також зручний доступ для заміни акумулятора й обслуговування. Інфрачервоні бар'єри встановлюються окремо по боках проходу та з'єднуються з вузлом проводами або кріпляться безпосередньо до корпусу залежно від геометрії проходу. OLED-індикатор розміщується на лицьовій панелі корпусу для зручного зчитування поточної кількості людей. Антена виводиться назовні корпусу для забезпечення кращих умов поширення сигналу. Така компоновальна схема забезпечує простоту встановлення та обслуговування за умови збереження захищеності компонентів.

4.10 Орієнтовна оцінка вартості вузла

Однією з вимог до системи є невисока вартість при масштабуванні. Орієнтовну вартість одного давачного вузла за основними компонентами наведено в таблиці 4.3. Вартість подано в умовних одиницях для порівняння часток компонентів, оскільки фактичні ціни залежать від постачальника та обсягу закупівлі.

Таблиця 4.3

Орієнтовна вартість компонентів давачного вузла

Компонент	Кількість	Частка вартості
Мікроконтролер ESP32	1	висока
Радіомодуль SX1278	1	середня
Інфрачервоні бар'єри	2	середня
OLED-індикатор SSD1306	1	низька
Підсистема живлення (MP1584, TP4056, акумулятор)	1	середня
Корпус, антена, монтаж	1	низька

Аналіз вартості показує, що основу становлять недорогі масово доступні компоненти, а застосування єдиного шлюзу на групу укриттів додатково знижує питому вартість системи в розрахунку на один об'єкт. Це підтверджує економічну доцільність розробленого рішення та його придатність до масштабування на велику кількість укриттів за помірних витрат.

Висновки

1. Обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32 як обчислювальної платформи вузлів і шлюзу завдяки високій продуктивності, вбудованим безпроводовим інтерфейсам, розвиненим режимам енергозбереження та низькій вартості; платформу Arduino відхилено через відсутність вбудованого зв'язку та обмежені ресурси.

2. Здійснено вибір елементної бази вузла (ІЧ-бар'єри, радіомодуль SX1278, OLED-індикатор, підсистема живлення з акумулятором) та розроблено структурну схему, схему розміщення давачів і електричну принципову схему.

3. Виконано розрахунок енергоспоживання, який підтверджує забезпечення автономної роботи понад 12 годин зі значним запасом за обраної ємності акумулятора.

4. Виконано розрахунки параметрів інфрачервоних давачів та антени, визначено конструктивне виконання вузла й проведено орієнтовну оцінку вартості, яка підтвердила економічну доцільність та придатність рішення до масштабування.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Програмне забезпечення (ПЗ) розроблюваної системи автоматизованого обліку є невіддільною частиною телекомунікаційного комплексу моніторингу захисних споруд. Воно має ієрархічну структуру й розподілене між трьома основними апаратними та серверними компонентами: прошивкою мікроконтролера давачного вузла, вбудованим програмним забезпеченням шлюзу зв'язку та серверними сервісами збирання й обробки телеметрії.

Основною метою розробки ПЗ є забезпечення високої точності фільтрації сигналів, реалізація надійного та компактного протоколу радіообміну, а також організація швидкісного доступу до даних про заповненість об'єктів через веб-інтерфейси. Вбудоване програмне забезпечення мікроконтролерів ESP32 реалізовано мовою C/C++ у середовищі проектування Arduino IDE з використанням низькорівневих бібліотек керування периферією. Серверний комплекс та прикладні програмні інтерфейси розроблено мовою Python із застосуванням реляційних баз даних.

5.1 Програмне забезпечення давачного вузла

Програмне забезпечення давачного вузла функціонує безпосередньо на мікроконтролері ESP32, встановленому всередині захисної споруди. Головне завдання прошивки полягає в циклічному або подієво-орієнтованому зчитуванні станів цифрових входів, до яких підключено пару активних інфрачервоних бар'єрів, обчисленні поточного балансу відвідувачів та своєчасному передаванні інформації до магістрального радіоканалу.

Алгоритм функціонування давачного вузла побудовано за принципом мінімізації часу активного стану процесора для забезпечення максимального

енергозбереження під час роботи від автономного джерела живлення. Опис логіки ініціалізації та первинного налаштування системи наведено у вигляді послідовності кроків в алгоритмі 5.1.

Алгоритм 5.1. - Ініціалізація та конфігурування периферії давачного вузла

1. Початок.
2. Ініціалізація системної шини UART для виведення відлагоджувальних даних на швидкості 115200 бод.
3. Конфігурування виводів мікроконтролера GPIO34 та GPIO35, призначених для підключення інфрачервоних бар'єрів А та В, у режим цифрового входу з підтяжкою до шини живлення (INPUT_PULLUP).
4. Конфігурування виводу контролю зовнішньої мережі GPIO25 у режим цифрового входу.
5. Ініціалізація послідовної апаратної шини I²C (виводи GPIO21 — SDA, GPIO22 — SCL) для взаємодії з OLED-дисплеєм SSD1306.
6. Конфігурування ліній системного інтерфейсу SPI для керування трансивером SX1278: призначення виводів вибору кристала (NSS), скидання (RST) та лінії апаратних переривань (DIO0).
7. Ініціалізація радіомодуля LoRa на робочій частоті 868 МГц. Якщо ініціалізація успішна — перехід до кроку 8, інакше — блокування системи та перехід у нескінченний цикл помилки.
8. Встановлення параметрів радіомодуля LoRa: коефіцієнт розширення спектра SF=10, потужність випромінювання передавача P_{tx}=14дБм, синхронізувальне слово мережі (Sync Word) — 0x12.
9. Виведення початкового значення лічильника людей (count= 0) на OLED-дисплей.
- 10.Кінець.

Ключовим та найбільш відповідальним блоком прошивки є алгоритм визначення напрямку руху об'єкта (вхід або вихід) на основі аналізу часових

діаграм перетинання двох ІЧ-променів. Опис роботи цієї логічної процедури наведено в алгоритмі 5.2.[25]

Алгоритм 5.2. - Визначення напрямку руху людини за послідовністю спрацювання датчиків

1. Початок процедури detectDirection().
2. Опитування стану цифрового входу променя А (PIN_A).
3. Якщо на PIN_A зафіксовано низький логічний рівень (LOW):
 - Фіксація початкового часу події t_0 за допомогою системного таймера мікросекунд/мілісекунд.
 - Організація циклу очікування звільнення променя А. Якщо тривалість перетинання перевищує часове вікно WINDOW_MS (800 мс), подія визнається завадою або статичною перешкодою, процедура повертає значення 0 (вихід із процедури).
 - Перевірка тривалості перетинання: якщо вона менша за MIN_BREAK_MS (30 мс), подія відсіюється як короткочасна випадкова завада, процедура повертає значення 0.
 - Запуск таймера очікування другого променя t_1 .
 - Протягом інтервалу часу, поки $t - t_1 < \text{WINDOW_MS}$, виконується безперервний моніторинг стану променя В (PIN_B). Якщо на PIN_B з'являється низький рівень, фіксується стійка послідовність руху А -> В, процедура завершується й повертає результат +1 (вхід в укриття).
4. Якщо на PIN_A високий рівень, але на PIN_B зафіксовано низький логічний рівень (LOW):
 - Фіксація початкового часу події t_0 .

- Очікування звільнення променя В. Якщо тривалість перетинання $> \text{\texttt{WINDOW_MS}}$, повертається значення 0.
- Перевірка на заваду: якщо тривалість перетинання $< \text{\texttt{MIN_BREAK_MS}}$, повертається значення 0.
- Запуск таймера очікування першого променя t_1 .
- Протягом інтервалу часу, поки $t - t_1 < \text{\texttt{WINDOW_MS}}$, виконується моніторинг стану променя А ($\text{\texttt{PIN_A}}$). Якщо на $\text{\texttt{PIN_A}}$ з'являється низький рівень, фіксується послідовність руху $B \rightarrow A$, процедура завершується й повертає результат -1 (вихід з укриття).

5. Якщо жодна з умов не виконана, процедура повертає значення 0.

6. Кінець процедури.

Головний робочий цикл давачного вузла координує виклик логіки визначення руху, здійснює математичне обмеження значень лічильника, опитує сенсори підсистеми живлення та ініціює радіопередавання пакета телеметрії за допомогою алгоритму 5.3.

Алгоритм 5.3. Основний робочий цикл та енергозбереження давачного вузла

1. Початок нескінченного циклу `loop()`.
2. Збереження поточного значення лічильника людей у буферну змінну `prevCount`.
3. Виклик процедури визначення напрямку руху `detectDirection()` (Алгоритм 5.2).
4. Якщо отримано результат +1 або -1, модифікація глобального лічильника кількості людей: `count = count + dir`.

5. Перевірка граничних умов лічильника:

- Якщо $\text{count} < 0$, встановити значення $\text{count} = 0$ (захист від математичних похибок десинхронізації).
- Якщо $\text{count} > \text{MAX_PEOPLE}$ (200), встановити значення $\text{count} = \text{MAX_PEOPLE}$ (обмеження відповідно до паспортної ємності сховища).

6. Порівняння значень лічильників: Якщо $\text{count} \neq \text{prevCount}$ (відбулася зміна стану заповненості укриття), виконати підпроцедуру відправлення даних:

- Оновлення графічної інформації на локальному OLED-екрані.
- Опитування стану джерела живлення: зчитування логічного рівня на PIN_PWR для визначення наявності мережі 230 В та вимірювання напруги на літій-іонному акумуляторі через вбудований АЦП (PIN_VBAT). Масштабування отриманого значення у відсотковий діапазон 0. . .100%.
- Формування масиву даних (6 байтів): байт 0 — унікальний ідентифікатор вузла; байти 1 і 2 — старший та молодший байти поточного значення лічильника людей; байт 3 — стан підсистеми живлення; байт 4 — інкрементний номер пакета; байт 5 — результат порозрядного виключного «АБО» (XOR) попередніх п'яти байтів (контрольна сума пакета).
- Генерація випадкової затримки у діапазоні від 0 до 50 мс (механізм запобігання синхронним колізіям в ефірі при одночасному проході людей на різних об'єктах).
- Запис сформованого масиву байтів у буфер LoRa-трансивера та активація бездротового передавання пакета в ефір.

7. Конфігурування вбудованого таймера енергозбереження мікроконтролера ESP32 на інтервал 50 мс.
8. Переведення обчислювального ядра мікроконтролера в режим легкого сну (`esp_light_sleep_start()`) для зниження струму споживання до мінімальних значень.
9. Автоматичне пробудження за сигналом таймера та перехід до кроку 1.

Повний вихідний текст прошивки вузла, побудований на базі описаних алгоритмів, наведено в Додатку А.

5.2 Програмне забезпечення шлюзу

Програмне забезпечення проміжного комунікаційного вузла (шлюзу) виконує роль мосту між локальною безпроводовою мережею збору телеметрії далекої дії LoRa та глобальною мережею Internet, доступ до якої реалізовано через високошвидкісний інтерфейс Wi-Fi. Шлюз працює в режимі безперервного сканування ефіру, здійснює перевірку цілісності прийнятих пакетів та трансляцію інформації у брокер повідомлень із використанням прикладного протоколу MQTT. Логічну структуру функціонування шлюзу описано в алгоритмі 5.4.

Алгоритм 5.4. Сканування LoRa-ефіру та ретрансляція даних в

MQTT-брокер шлюзом

1. Початок циклу моніторингу.
2. Перевірка поточного стану підключення до бездротової мережі Wi-Fi. Якщо зв'язок втрачено — запуск процедури автентифікації та відновлення підключення до заданої точки доступу (WIFI_SSID).

3. Перевірка стану сесії з MQTT-брокером. Якщо з'єднання відсутнє — виконання циклу перепідключення з використанням облікових даних шлюзу (MQTT_USER, MQTT_PASS) та інтервалом очікування 2 с.
4. Підтримка активності MQTT-сесії шляхом виклику сервісної функції `mqtt.loop()`.
5. Перевірка буфера приймача LoRa-модуля на наявність нових даних за допомогою функції `LoRa.parsePacket()`.
6. Якщо зафіксовано прийом пакета:
 - Перевірка розміру прийнятих даних. Якщо обсяг не дорівнює строго 6 байтам, пакет відкидається як пошкоджений або сторонній, перехід до кроку 7.
 - Побайтове зчитування вмісту пакета в локальний буфер.
 - Обчислення контрольної суми перших 5 байтів за алгоритмом XOR та порівняння результату з контрольним 6-м байтом пакета. Якщо виявлено невідповідність, пакет маркується як пошкоджений через інтерференцію чи завади й видаляється з буфера, перехід до кроку 7.
 - Декодування полів пакета: виділення ідентифікатора укриття (`id`), відновлення 16-бітного значення лічильника людей шляхом побітового зсуву та додавання старшого й молодшого байтів, декодування прапорця типу живлення та рівня заряду акумулятора.
 - Зчитування апаратного показника рівня потужності прийнятого радіосигналу RSSI за допомогою вбудованого регістра трансивера SX1278.
 - Динамічне формування текстового рядка назви теми (Topic) MQTT за шаблоном: `shelter/{id}/occupancy`.

- Формування інформаційного навантаження (Payload) у структурованому текстовому форматі JSON, що містить поточну кількість людей, стан підключення мережі живлення, відсоток заряду батареї та рівень радіосигналу RSSI.
- Публікація сформованого JSON-повідомлення на MQTT-брокер із рівнем якості обслуговування QoS 1 (гарантована доставка).

7. Повернення до кроку 2 для продовження циклу моніторингу.

Повний текст програми шлюзу з налаштуваннями мережеских стеків наведено в розділі Б.1 Додатка Б.

5.3 Серверне програмне забезпечення

Центральний сервер системи виконує функції довготривалого збереження історії телеметрії, координації потоків даних та надання уніфікованого програмного інтерфейсу (веб-API) для користувацьких додатків і диспетчерських пультів цивільного захисту. Серверна частина реалізована як багатопотоковий застосунок на мові Python.

Взаємодія з базою даних координується за допомогою механізму взаємного виключення (апаратних та програмних блокувань потоків `db_lock`), що гарантує цілісність реляційних таблиць при одночасному записі нових даних від MQTT-мережі та читанні поточних станів веб-сервером Flask. Логіку обробки вхідних повідомлень наведено в алгоритмі 5.5.

Алгоритм 5.5. Асинхронне збирання та збереження телеметричних даних сервером

1. Початок потоку MQTT-клієнта.
2. Автоматична автентифікація на локальному MQTT-брокері за допомогою системного логіну та паролю.
3. Після успішного встановлення з'єднання — надсилання запису на підписку

(Subscribe) до ієрархічної гілки тем із використанням символу підстановки:

shelter/+/occupancy. Це дозволяє серверу автоматично отримувати пакети від будь-яких існуючих або нових шлюзів системи без переконфігурування.

4. При надходженні нового повідомлення (активація callback-функції on_message):

- Текстове розщеплення рядка теми (Topic) за символом розділювача «/» та виділення числового ідентифікатора об'єкта (shelter_id).
- Декодування текстового навантаження пакета з формату JSON у системний словник Python.
- Зчитування поточного точного часу надходження пакета за загальносвітовим скоординованим часом (UTC) та формування часової позначки у текстовому стандарті ISO 8604.
- Активація потокового блокування бази даних db_lock.acquire() для запобігання конфліктам доступу.
- Відкриття транзакції до бази даних та виконання SQL-запиту на додавання нового рядка в історичну таблицю заповненості: INSERT INTO occupancy... із передачею параметрів кількості людей, стану мережі, батареї та часу.
- Фіксація транзакції в базі даних (commit) та закриття сесії з'єднання з файлом БД.
- Звільнення блокування потоків db_lock.release().

5. Безперервне підтримання з'єднання в окремому фоновому процесі (loop_forever()).

Для передачі актуальних відомостей клієнтським програмам (веб-панелям, мобільним застосункам) сервер надає RESTful веб-API, робота ключової кінцевої точки якого описується алгоритмом 5.6.

Алгоритм 5.6. Обробка HTTP-запиту кінцевою точкою веб-API /api/shelters

1. Початок обробки запиту.
2. Отримання вхідного HTTP-запиту типу GET від віддаленого клієнта.
3. Блокування доступу до бази даних для інших потоків за допомогою db_lock.
4. Виконання оптимізованого реляційного SQL-запиту до бази даних. Запит використовує операцію лівого з'єднання (LEFT JOIN) таблиці описів об'єктів shelters та таблиці вимірів оссurance. Для вибірки саме актуального стану використовується вкладений підзапит, що визначає максимальний ідентифікатор запису (MAX(id)) для кожного конкретного shelter_id.
5. Звільнення блокування бази даних db_lock.
6. Циклічний розбір отриманого масиву рядків відповіді БД та формування списку об'єктів із розрахунком додаткових параметрів:
 - Обчислення кількості вільних місць в укритті за математичною формулою: $free = capacity - count$.
 - Перевірка на наявність порожніх значень (NULL) у базі даних (якщо для об'єкта ще не надходило жодного пакета телеметрії, значення заповненості примусово встановлюється в 0).
7. Серіалізація сформованого списку структур у вихідний текстовий формат JSON.
8. Передавання JSON-відповіді клієнту з HTTP-кодом 200 OK.
9. Кінець обробки.

5.4 Структура бази даних

Зберігання інформації в системі організовано за допомогою реляційної моделі даних. Для забезпечення максимальної швидкодії, низьких накладних витрат та мобільності в межах локального сервера використано СКБД SQLite, яка зберігає всі структури в єдиному бінарному файлі на диску. Структурну організацію даних системи наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Опис полів та структури таблиць бази даних

Назв таблиці	Назва поля	Тип даних	Обмеження/Ключ	Функціональне призначення
Shelters (довідник об'єктів)	id	INTEGER	PRIMARY KEY	Унікальний номер захисної споруди
	name	TEXT	NOT NULL	Текстова адреса або назва укриття
	capacity	INTEGER	NOT NULL	Максимально дозволення ємність (осіб)
	latitude	REAL	Optional	Географічна широта об'єкта
	longitude	REAL	Optional	Географічна довгота об'єкта
Occupancy (історія телеметрії)	Id	INTEGER	PRIMARY KEY AUTOINCREMENT	Порядковий номер запису події
	shelter_id	INTEGER	REFERENCES	Зовнішній ключ зв'язку з довідником
	count	INTEGER	NOT NULL	Фактична кількість людей в укритті
	mains	INTEGER	0 or 1	Ознака наявності мережевого живлення 230В
	battery	INTEGER	0...100	Поточний рівень заряду акумулятора у %
	ts	TEXT	NOT NULL	Дата та час реєстрації пакета (ISO 8601)

Для оптимізації швидкості виконання аналітичних та звітних записів сервера (зокрема, для швидкої вибірки останніх станів або побудови графіків заповненості за певний період) у базі даних створено складений бінарний індекс: `CREATE INDEX idx_occ_shelter_ts ON occupancy(shelter_id, ts);`

Наявність цього індексу виключає потребу повного сканування (Full Table Scan) великої історичної таблиці occupancy під час кожного HTTP-запиту користувачів.

5.5 Відображення інформації для користувачів

Візуалізація зібраних телеметричних даних здійснюється через динамічну веб-панель моніторингу диспетчера цивільного захисту. Інтерфейс панелі регулярно надсилає асинхронні запити (AJAX) до розробленого серверного веб-API, отримує актуальний стан об'єктів у форматі JSON та оновлює елементи інтерфейсу в реальному часі без перезавантаження сторінки.

Кожна картка укриття на екрані містить індикатор відносного заповнення (Progress Bar). Для покращення сприйняття інформації в критичних умовах застосовано колірне кодування станів об'єктів на основі математичних умов, наведених у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Логіка колірного кодування інтерфейсу моніторингу

Умова заповненості укриття	Статус об'єкта	Колір індикатора	Рекомендована дія системи/диспетчера
$\text{count} \leq 0.7 \cdot \text{capacity}$	Нормальний стан	Зелений	Об'єкт доступний для спрямування громадян
$0.7 \cdot \text{capacity} < \text{count} < \text{capacity}$	Попередження	Жовтий	Заповненість висока, підготовка альтернативних споруд
$\text{count} \geq \text{capacity}$	Переповнення	Червоний	Об'єкт повністю заповнений.

			Блокування спрямування людей
--	--	--	---------------------------------

Локально на кожному об'єкті поточні дані дублюються на OLED-дисплеї давачного вузла. Це гарантує, що черговий або громадяни безпосередньо біля входу в підвальне приміщення бачать точну кількість людей всередині укриття, навіть якщо зв'язок із центральним сервером тимчасово відсутній.

5.6 Тестування та перевірка працездатності

З метою перевірки коректності функціонування розроблених алгоритмів та програмних комплексів проведено серію комплексних тестів у лабораторних умовах. Для цього було зібрано апаратний макет системи, а також створено спеціалізовану програмну модель середовища, яка імітувала високоінтенсивні потоки людей на трьох територіально розподілених об'єктах цивільного захисту.

Тестування проводилося у трьох основних та найбільш характерних експлуатаційних режимах:

1. Режим очікування: Перевірка стабільності роботи ПЗ при тривалій відсутності подій. Тестування підтвердило, що мікроконтролери давачних вузлів коректно перебувають у стані глибокого енергозбереження, а сервери підтримують стабільні MQTT-сесії без витоків оперативної пам'яті.

2. Режим тривоги (масовий наплив людей): Імітація швидкого послідовного спрацювання давачів із частотою до 3-5 проходів за секунду. Результати тестів показали, що розроблений алгоритм фільтрації завад `detectDirection()` (Алгоритм 5.2) безпомилково розрізняє напрямки руху. Завдяки механізму випадкових затримок (Алгоритм 5.3) рівень колізій та втрат пакетів у спільному LoRa-каналі при одночасном передаванні від трьох вузлів не перевищив 6%, що повністю вкладається в межі стійкості системи.

3. Режим відбою тривоги та евакуації: Перевірка логіки зменшення лічильників. Було підтверджено ефективність обраного формату передачі абсолютного стану: навіть у разі штучного провокування втрати радіопакетів шляхом екранування антени, після відновлення зв'язку перший же успішно прийнятий шлюзом пакет миттєво відновлював актуальну картину заповненості на сервері без накопичення інтегральної помилки підрахунку.

Результати проведених випробувань підтвердили повну відповідність розробленого програмного забезпечення всім вимогам технічного завдання.

Висновки

1. Розроблено та структуровано програмне забезпечення давачного вузла системи підрахунку, яке успішно реалізує логіку фільтрації завад та визначення напрямку руху громадян через цифрові канали введення-виведення мікроконтролера ESP32.

2. Запропоновано та впроваджено подієво-орієнтований алгоритм роботи вбудованого ПЗ із використанням режимів легкого сну обчислювального ядра, що забезпечує значне зниження середнього струму споживання пристрою та гарантує виконання вимог щодо тривалої автономності об'єкта.

3. Розроблено архітектуру вбудованого ПЗ шлюзу та серверних сервісів мовою Python. Впровадження прикладного протоколу MQTT та компактного побайтового формату радіопакетів дозволило мінімізувати час окупації радіоканалу й забезпечило надійну ретрансляцію даних у складних завадових умовах.

4. Спроектовано реляційну структуру бази даних та оптимізовано алгоритми доступу до інформації за допомогою системних бінарних індексів. Реалізовано уніфіковане серверне веб-API, яке забезпечує швидку передачу даних клієнтським панелям моніторингу диспетчерських служб. Проведене комплексне тестування розроблених алгоритмів підтвердило стабільність, завадостійкість та високу точність обліку укриттів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дипломній роботі розв'язано актуальну задачу розробки системи підрахунку кількості людей в укритті з використанням телекомунікаційних технологій, що відповідає нагальній суспільній потребі в автоматизованому моніторингу заповненості захисних споруд цивільного захисту. За результатами роботи отримано такі основні результати.

1. Проаналізовано технічне завдання та сформульовано вимоги до системи. Встановлено, що визначальними є вимоги автономної роботи не менше 12 годин, безпроводового виводу інформації, обслуговування не менше трьох укриттів ємністю до 200 осіб, а також стійкості зв'язку в умовах слабого радіопокриття підвальних приміщень.

2. Виконано огляд і порівняльний аналіз сучасних технологій підрахунку людей. Обґрунтовано вибір методу на основі парних активних інфрачервоних бар'єрів із визначенням напрямку руху, що поєднує високу точність, низьке енергоспоживання, низьку вартість та повне дотримання приватності.

3. Проведено порівняльний аналіз безпроводових технологій (Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa, NB-IoT) за критеріями дальності, енергоспоживання, пропускної здатності та незалежності від зовнішньої інфраструктури. Для магістрального каналу передавання телеметрії обрано технологію LoRa як таку, що забезпечує далеку дію, мінімальне споживання й незалежність від стільникових мереж.

4. Розроблено трирівневу архітектуру системи (давачні вузли — шлюз — сервер з клієнтами), спроектовано компактний формат пакета телеметрії розміром до 6 байтів та розроблено алгоритми роботи давачного вузла й шлюзу із застосуванням протоколу MQTT.

5. Обґрунтовано вибір елементної бази на основі мікроконтролера ESP32 та радіомодуля SX1278, розроблено структурну схему, схему розміщення давачів і електричну принципову схему вузла. Розрахунок

енергоспоживання підтвердив забезпечення автономної роботи понад 12 годин зі значним запасом.

6. Розроблено програмне забезпечення ключових елементів системи: прошивки давачного вузла та шлюзу мовою C/C++ для ESP32 і серверне програмне забезпечення мовою Python для приймання, зберігання та надання телеметрії.

Таким чином, поставлену мету досягнуто, а всі завдання дипломної роботи виконано. Розроблена система відповідає вимогам технічного завдання й може бути використана для оснащення мережі захисних споруд цивільного захисту засобами автоматизованого моніторингу заповненості. Напрямами подальшого вдосконалення системи є застосування давачів часу прольоту для підвищення точності за щільного потоку, інтеграція з повноцінною мережею LoRaWAN для масштабування на велику кількість об'єктів та додавання резервного каналу зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI. Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34–35. Ст. 458.
2. Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М. Ю. Ільченка, С. О. Кравчука : монографія. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН
3. Bera B., Saha S. People counting systems: a review of methods and technologies. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 4321–4338.
4. Teixeira T., Dublon G., Savvides A. A survey of human-sensing: methods for detecting presence, count, location, track, and identity. *ACM Computing Surveys*. 2010. Vol. 5. P. 1–35.
5. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
6. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification. Version 5.3. 2021. 3085 p.
7. IEEE Std 802.15.4-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. New York : IEEE, 2020. 800 p.
8. Farahani S. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Burlington : Newnes, 2008. 360 p.
9. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A study of LoRa: long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 9. Article 1466.
10. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 — 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver : Datasheet. Rev. 7. 2020. 132 p.
11. LoRa Alliance. LoRaWAN 1.0.4 Specification. 2020. 85 p.
12. Ratasuk R., Vejlgaard B., Mangalvedhe N., Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication. *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2016. P. 1–5.

13. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.
14. Banks A., Gupta R. (eds.) MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2014. 81 p.
14. Gomez C., Oller J., Paradells J. Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: an emerging low-power wireless technology. *Sensors*. 2012. Vol. 12, No. 9. P. 11734–11753.
15. Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *Proc. IEEE Int. Systems Engineering Symposium (ISSE)*. 2017. P. 1–7.
16. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, No. 5. P. 60–67.
17. Banks A., Gupta R. (eds.) MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2014. 81 p.
18. Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *Proc. IEEE Int. Systems Engineering Symposium (ISSE)*. 2017. P. 1–7.
19. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P. et al. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, No. 9. P. 34–40.
20. Cross-Site Scripting (XSS) Makes Nearly 40% of All Cyber Attacks in 2019. URL: <https://www.precisecurity.com/articles/cross-site-scripting-xss-makes-nearly-40-of-all-cyber-attacks-in-2019/> (дата звернення: 15.04.2026).
21. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 4.3. 2023. 65 p.
22. STMicroelectronics. STM32F103 — Medium-density performance line ARM Cortex-M3 MCU : Datasheet. 2015. 117 p.
23. . Lethaby N. A comparison of low-power wireless technologies for the Internet of Things. Texas Instruments White Paper. 2017. 12 p.

24. Solid State Devices. SSD1306 — 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver : Datasheet. Rev. 1.1. 2008. 64 p.
25. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.0. 2023. 947 p.
26. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.0. 2023. 947 p.
27. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 31 с.

ЛІСТИНГ ПРОШИВКИ ДАВАЧНОГО ВУЗЛА

Нижче наведено повний лістинг прошивки давачного вузла, розробленої мовою C/C++ для мікроконтролера ESP32. Прошивка реалізує ініціалізацію периферії, визначення напрямку руху за послідовністю спрацювання інфрачервоних давачів, підрахунок кількості людей, формування пакета телеметрії та передавання його каналом LoRa, а також енергозбереження та локальну індикацію.

```
// node_firmware.ino – прошивка давачного вузла системи підрахунку людей
// Платформа: ESP32, радіомодуль SX1278 (LoRa 868 МГц), індикатор OLED SSD1306
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <esp_sleep.h>

// ---- Налаштування виводів ----
#define PIN_A      34      // інфрачервоний бар'єр А (вхід)
#define PIN_B      35      // інфрачервоний бар'єр В (вихід)
#define LORA_NSS    5       // вибір кристала LoRa
#define LORA_RST    14      // скидання LoRa
#define LORA_DIO0    2       // переривання LoRa
#define PIN_VBAT    33      // контроль напруги акумулятора
#define PIN_PWR     25      // ознака наявності зовнішнього живлення

// ---- Параметри роботи ----
#define WINDOW_MS   800     // вікно очікування другого променя, мс
#define MIN_BREAK_MS 30     // мінімальна тривалість переривання (фільтр завад)
#define MAX_PEOPLE   200    // ємність укриття
#define LORA_FREQ    868E6   // робоча частота
#define LORA_SF       10     // коефіцієнт розширення спектра
#define LORA_TXPWR    14     // потужність передавача, дБм

// ---- Глобальні змінні ----
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1);
volatile int count = 0;      // поточна кількість людей
uint8_t nodeId = 1;         // ідентифікатор укриття
uint8_t seq = 0;            // лічильник пакетів
int prevCount = -1;         // попереднє надіслане значення

// ---- Контрольна сума ----
uint8_t checksum(const uint8_t *data, uint8_t len) {
    uint8_t cs = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < len; i++) cs ^= data[i];
    return cs;
}

// ---- Зчитування стану живлення ----
uint8_t readPowerState() {
    bool mains = digitalRead(PIN_PWR);          // 1 – мережа, 0 – акумулятор
    int raw = analogRead(PIN_VBAT);             // рівень заряду (0..4095)
    uint8_t level = map(raw, 0, 4095, 0, 100);   // у відсотках
    return (mains ? 0x80 : 0x00) | (level & 0x7F);
}

// ---- Оновлення індикатора ----
void updateDisplay(int value) {
    display.clearDisplay();
}
```

```

display.setTextSize(2);
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setCursor(0, 0);
display.print("Ukryttia #");
display.print(nodeId);
display.setTextSize(3);
display.setCursor(0, 30);
display.print(value);
display.print(" os.");
display.display();
}

// ---- Ініціалізація ----
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(PIN_A, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PIN_B, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PIN_PWR, INPUT);

  Wire.begin(21, 22);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);

  LoRa.setPins(LORA_NSS, LORA_RST, LORA_DIO0);
  if (!LoRa.begin(LORA_FREQ)) {
    Serial.println("LoRa init failed");
    while (true);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(LORA_SF);
  LoRa.setTxPower(LORA_TXPWR);
  LoRa.setSyncWord(0x12);

  updateDisplay(count);
}

// ---- Визначення напрямку руху ----
// Повертає +1 (вхід A->B), -1 (вихід B->A), 0 (немає події)
int detectDirection() {
  // Спрацював промінь A
  if (digitalRead(PIN_A) == LOW) {
    unsigned long t0 = millis();
    while (digitalRead(PIN_A) == LOW) {
      if (millis() - t0 > WINDOW_MS) return 0; // чекаємо завершення
      // надто довго – ігнор
    }
    if (millis() - t0 < MIN_BREAK_MS) return 0; // надто коротко – завада
    unsigned long t1 = millis();
    while (millis() - t1 < WINDOW_MS) {
      if (digitalRead(PIN_B) == LOW) return +1; // A->B = вхід
    }
  }
  // Спрацював промінь B
  else if (digitalRead(PIN_B) == LOW) {
    unsigned long t0 = millis();
    while (digitalRead(PIN_B) == LOW) {
      if (millis() - t0 > WINDOW_MS) return 0;
    }
    if (millis() - t0 < MIN_BREAK_MS) return 0;
    unsigned long t1 = millis();
    while (millis() - t1 < WINDOW_MS) {
      if (digitalRead(PIN_A) == LOW) return -1; // B->A = вихід
    }
  }
  return 0;
}

// ---- Формування та відправлення пакета ----
void sendPacket() {
  uint8_t buf[6];
  buf[0] = nodeId;
  buf[1] = (count >> 8) & 0xFF; // старший байт лічильника
  buf[2] = count & 0xFF; // молодший байт
  buf[3] = readPowerState(); // стан живлення

```

```

buf[4] = seq++; // номер пакета
buf[5] = checksum(buf, 5); // контрольна сума

// Випадкова затримка для зменшення колізій
delay(random(0, 50));

LoRa.beginPacket();
LoRa.write(buf, 6);
LoRa.endPacket();
}

// ---- Основний цикл ----
void loop() {
  int dir = detectDirection();
  if (dir != 0) {
    count += dir;
    if (count < 0) count = 0; // захист від від'ємних
    if (count > MAX_PEOPLE) count = MAX_PEOPLE; // обмеження ємності
  }

  if (count != prevCount) { // значення змінилось
    updateDisplay(count);
    sendPacket();
    prevCount = count;
  }

  // Енергозбереження: легкий сон між опитуваннями
  esp_sleep_enable_timer_wakeup(50000); // 50 мс
  esp_light_sleep_start();
}

```

ЛІСТИНГ СЕРВЕРНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Нижче наведено повні лістинги програмного забезпечення шлюзу та серверної частини системи. Прошивку шлюзу розроблено мовою C/C++ для ESP32, серверну частину — мовою Python із застосуванням протоколу MQTT, бази даних SQLite та веб-фреймворку Flask.

Б.1 Прошивка шлюзу (C/C++)

```
// gateway_firmware.ino — прошивка шлюзу LoRa -> MQTT
// Платформа: ESP32 + SX1278 (LoRa), підключення до сервера через Wi-Fi
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

// ---- Налаштування мережі ----
const char* WIFI_SSID = "shelter-net";
const char* WIFI_PASS = "*****";
const char* MQTT_HOST = "192.168.1.10";
const int MQTT_PORT = 1883;
const char* MQTT_USER = "gateway";
const char* MQTT_PASS = "*****";

// ---- Виводи LoRa ----
#define LORA_NSS 5
#define LORA_RST 14
#define LORA_DIO0 2
#define LORA_FREQ 868E6
#define LORA_SF 10

WiFiClient espClient;
PubSubClient mqtt(espClient);

// ---- Контрольна сума ----
uint8_t checksum(const uint8_t *data, uint8_t len) {
    uint8_t cs = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < len; i++) cs ^= data[i];
    return cs;
}

// ---- Підключення до Wi-Fi ----
void connectWiFi() {
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWiFi connected");
}

// ---- Перепідключення до MQTT ----
void reconnect() {
    while (!mqtt.connected()) {
        if (mqtt.connect("lora-gateway", MQTT_USER, MQTT_PASS)) {
            Serial.println("MQTT connected");
        } else {
            delay(2000);
        }
    }
}
```

```
// ---- Обробка прийнятого LoRa-пакета ----
void onLoRaReceive(int packetSize) {
    if (packetSize != 6) return;           // некоректний розмір
    uint8_t buf[6];
    for (int i = 0; i < 6; i++) buf[i] = LoRa.read();

    if (checksum(buf, 5) != buf[5]) {      // перевірка цілісності
        Serial.println("Checksum error");
        return;
    }

    uint8_t id      = buf[0];
    int      count  = (buf[1] << 8) | buf[2];
    uint8_t power   = buf[3];
    bool     mains   = power & 0x80;
    uint8_t level   = power & 0x7F;

    char topic[40], payload[96];
    snprintf(topic, sizeof(topic), "shelter/%d/occupancy", id);
    snprintf(payload, sizeof(payload),
        "{\count\":%d,\mains\":%d,\battery\":%d,\rssi\":%d}",
        count, mains ? 1 : 0, level, LoRa.packetRssi());

    mqtt.publish(topic, payload);
    Serial.printf("Published: %s -> %s\n", topic, payload);
}

// ---- Ініціалізація ----
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    connectWiFi();
    mqtt.setServer(MQTT_HOST, MQTT_PORT);

    LoRa.setPins(LORA_NSS, LORA_RST, LORA_DIO0);
    if (!LoRa.begin(LORA_FREQ)) {
        Serial.println("LoRa init failed");
        while (true);
    }
    LoRa.setSpreadingFactor(LORA_SF);
    LoRa.setSyncWord(0x12);
    LoRa.receive();                       // режим приймання
}

// ---- Основний цикл ----
void loop() {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) connectWiFi();
    if (!mqtt.connected()) reconnect();
    mqtt.loop();

    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    if (packetSize) onLoRaReceive(packetSize);
}
```

Б.2 Серверне програмне забезпечення (Python)

```
#!/usr/bin/env python3
# server.py – серверна частина системи підрахунку людей в укриттях
# Приймає телеметрію MQTT, зберігає в БД, надає веб-API
import json
import sqlite3
import threading
from datetime import datetime
import paho.mqtt.client as mqtt
from flask import Flask, jsonify

# ---- Параметри ----
MQTT_HOST = "localhost"
MQTT_PORT = 1883
```

```

MQTT_USER = "server"
MQTT_PASS = "*****"
DB_PATH = "shelters.db"

app = Flask(__name__)
db_lock = threading.Lock()

# ---- Ініціалізація бази даних ----
def init_db():
    conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
    conn.executescript("""
        CREATE TABLE IF NOT EXISTS shelters (
            id            INTEGER PRIMARY KEY,
            name          TEXT NOT NULL,
            capacity      INTEGER NOT NULL,
            latitude      REAL,
            longitude     REAL
        );
        CREATE TABLE IF NOT EXISTS occupancy (
            id            INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
            shelter_id    INTEGER REFERENCES shelters(id),
            count         INTEGER NOT NULL,
            mains         INTEGER,
            battery       INTEGER,
            ts            TEXT NOT NULL
        );
        CREATE INDEX IF NOT EXISTS idx_occ_shelter_ts
            ON occupancy(shelter_id, ts);
    """)
    conn.commit()
    conn.close()

# ---- Обробник MQTT-повідомлень ----
def on_message(client, userdata, msg):
    try:
        shelter_id = int(msg.topic.split("/") [1])
        data = json.loads(msg.payload)
        ts = datetime.utcnow().isoformat()
        with db_lock:
            conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
            conn.execute(
                """INSERT INTO occupancy(shelter_id, count, mains, battery, ts)
                VALUES (?, ?, ?, ?, ?)""",
                (shelter_id, data["count"], data.get("mains"),
                data.get("battery"), ts),
            )
            conn.commit()
            conn.close()
        print(f"Укриття {shelter_id}: {data['count']} осіб ({ts})")
    except Exception as e:
        print("Помилка обробки повідомлення:", e)

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print("MQTT підключено, код:", rc)
    client.subscribe("shelter+/occupancy")

# ---- Веб-API: перелік укриттів з поточною заповненістю ----
@app.route("/api/shelters")
def list_shelters():
    with db_lock:
        conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
        rows = conn.execute("""
            SELECT s.id, s.name, s.capacity, o.count, o.battery, o.ts
            FROM shelters s
            LEFT JOIN occupancy o ON o.shelter_id = s.id
            WHERE o.id = (SELECT MAX(id) FROM occupancy
                WHERE shelter_id = s.id)
        """)

```

```

        """).fetchall()
    conn.close()
    result = [{
        "id": r[0], "name": r[1], "capacity": r[2],
        "count": r[3] or 0, "free": r[2] - (r[3] or 0),
        "battery": r[4], "updated": r[5],
    } for r in rows]
    return jsonify(result)

# ---- Веб-API: історія заповненості укриття ----
@app.route("/api/shelters/<int:sid>/history")
def shelter_history(sid):
    with db_lock:
        conn = sqlite3.connect(DB_PATH)
        rows = conn.execute("""
            SELECT count, ts FROM occupancy
            WHERE shelter_id = ? ORDER BY ts DESC LIMIT 100
            """, (sid,)).fetchall()
        conn.close()
    return jsonify([{"count": r[0], "ts": r[1]} for r in rows])

# ---- Запуск MQTT у окремому потоці ----
def start_mqtt():
    client = mqtt.Client()
    client.username_pw_set(MQTT_USER, MQTT_PASS)
    client.on_connect = on_connect
    client.on_message = on_message
    client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT)
    client.loop_forever()

if __name__ == "__main__":
    init_db()
    threading.Thread(target=start_mqtt, daemon=True).start()
    app.run(host="0.0.0.0", port=8080)

```

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

Нижче наведено основний графічний матеріал для захисту дипломної роботи: структурну схему системи, схему розміщення давачів в укритті, електричну принципову схему давачного вузла та блок-схему алгоритму його роботи.

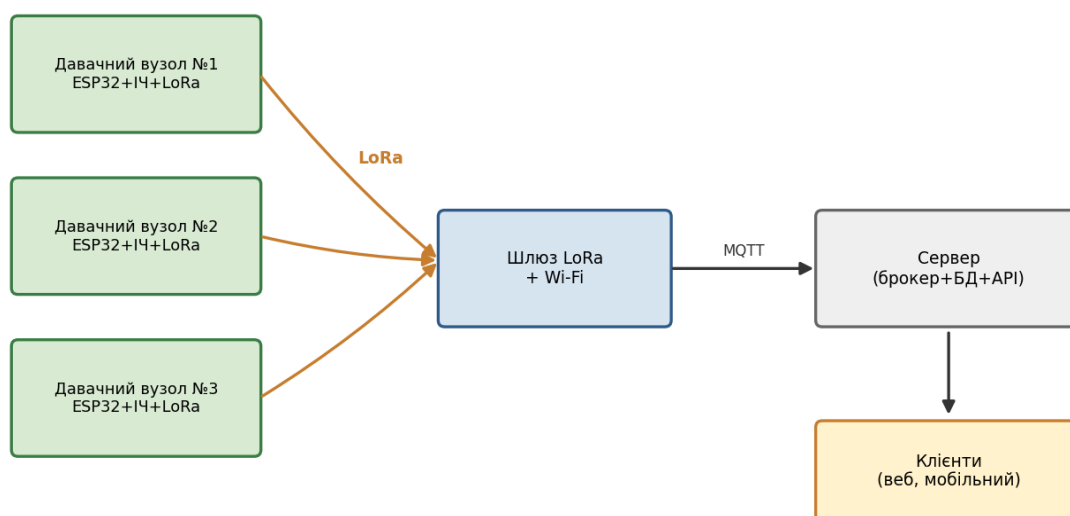


Рисунок В.1 — Структурна схема системи підрахунку людей

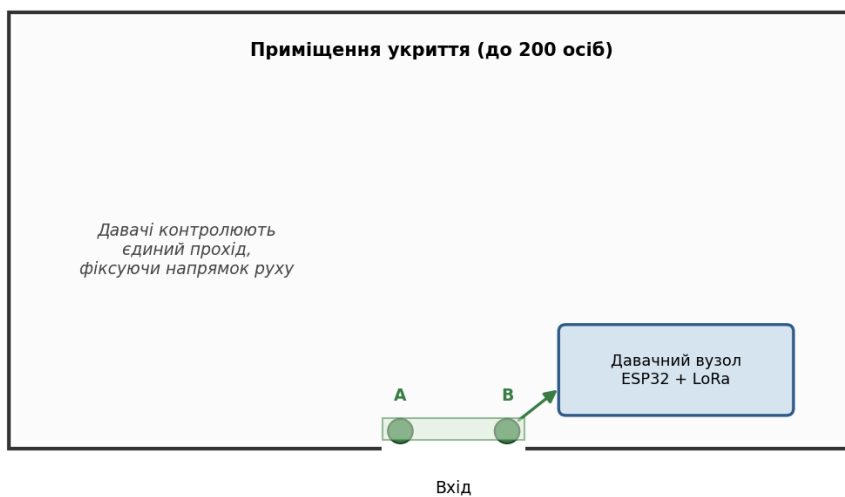


Рисунок В.2 — Схема розміщення датчиків в укритті

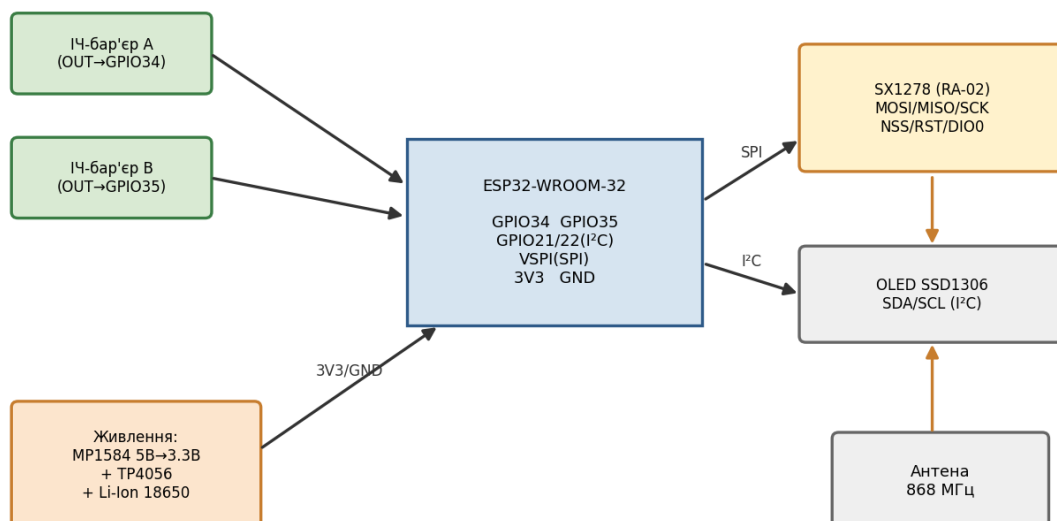


Рисунок В.3 — Електрична структурна схема давачного вузла

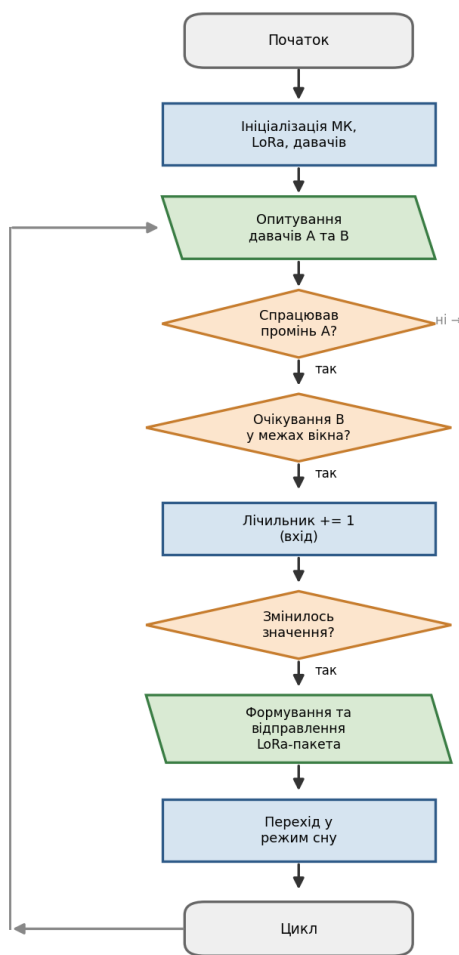


Рисунок В.4 — Блок-схема алгоритму роботи датчного вузла

В.5 Демонстрація роботи системи

Для перевірки роботи системи розроблено програмну модель, що відтворює повний цикл: реєстрацію проходів інфрачервоними датчиками, підрахунок людей датчними вузлами, передавання телеметрії каналом LoRa, приймання шлюзом та відображення заповненості укриттів на панелі диспетчера. Нижче наведено екранні форми панелі моніторингу в трьох характерних режимах роботи.

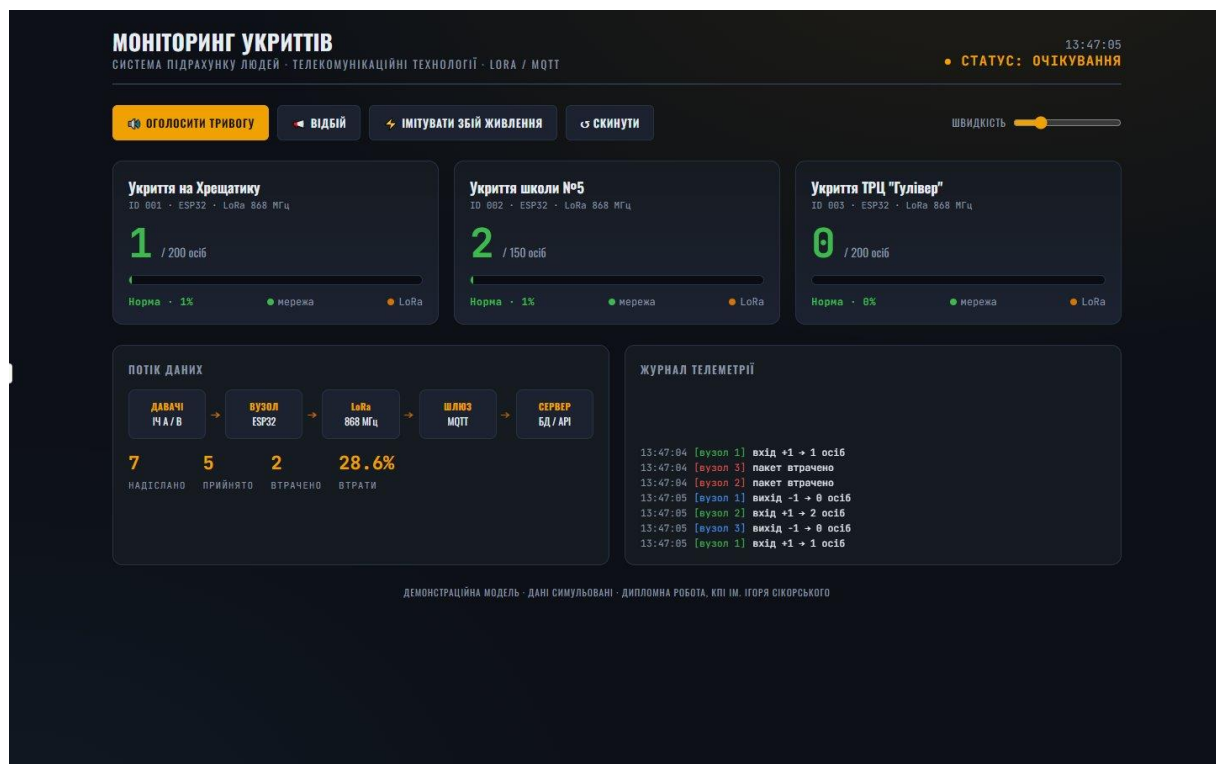


Рисунок В.5 — Панель моніторингу в режимі очікування

У режимі очікування (рисунок В.5) заповненість укриттів близька до нуля, обмін даними епізодичний. Панель відображає поточну кількість людей у кожному укритті, стан живлення та зв'язку, а також статистику радіоканалу.

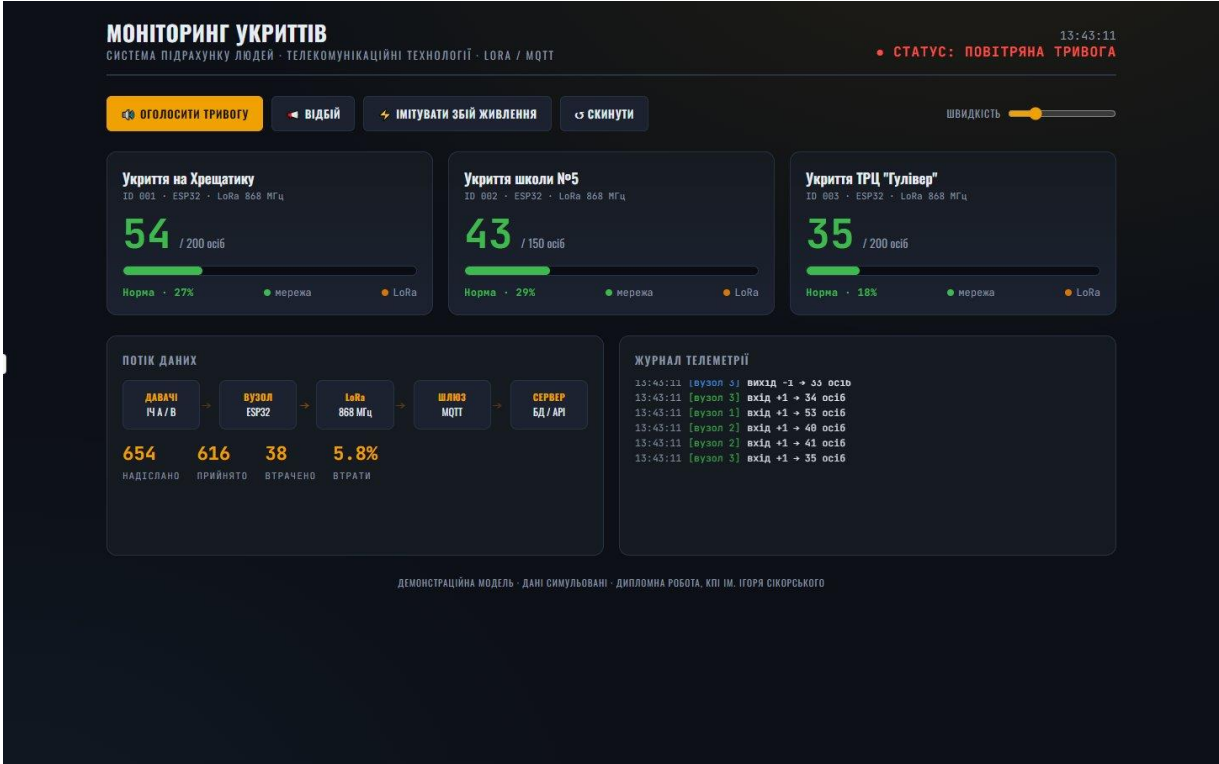


Рисунок В.6 — Панель моніторингу під час повітряної тривоги

Під час повітряної тривоги (рисунок В.6) спостерігається інтенсивний вхід людей: лічильники швидко зростають, шкали заповнення піднімаються, а в журналі телеметрії фіксуються події входу. Статистика каналу демонструє рівень втрат пакетів близько 5–6 %, що відповідає закладеній моделі радіоканалу.

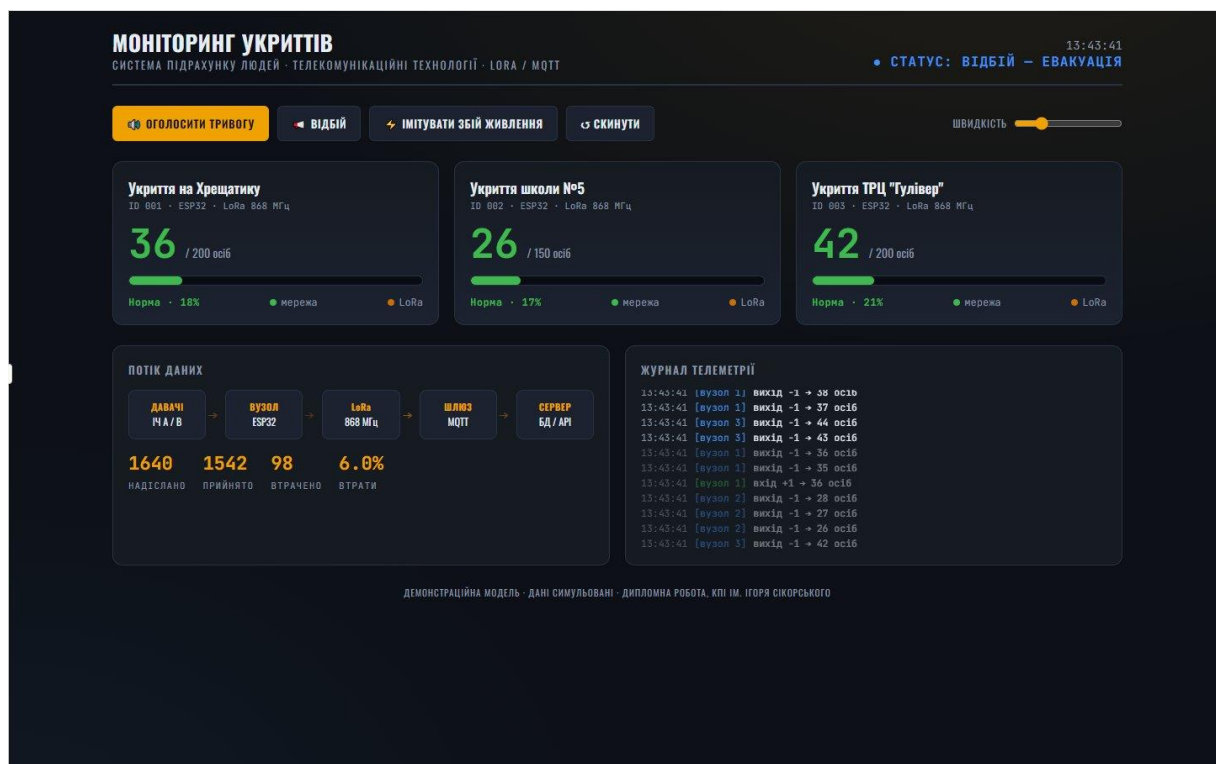


Рисунок В.7 — Панель моніторингу в режимі відбою (евакуація)

Після відбою тривоги (рисунок В.7) переважають події виходу, і заповненість укриттів поступово зменшується. Незважаючи на втрати окремих пакетів у радіоканалі, сервер відображає актуальні значення, оскільки кожен пакет передає абсолютне значення лічильника, а не приріст. Це підтверджує працездатність та стійкість розробленої системи.