

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Чорноморський національний університет
імені Петра Могили**

**Факультет комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії**

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри,
д-р техн. наук, проф.

_____ І. М. Журавська

« __ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Туристична сенсорна мережа на базі LoRaWAN

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

123 – КМР.ПЗ.00 – 605.21810502

Студент

_____ В. О. Баєв

підпис

« __ » _____ 202__р.

Керівник доцент, канд. фіз.-мат. наук

_____ С. В. Пузирьов

підпис

« __ » _____ 202__р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____ І. М. Журавська

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної магістерської роботи

Видано студенту групи 605м факультету комп'ютерних наук

_____ Баєв Віктор Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Туристична сенсорна мережа на базі LoRaWAN

Затверджена наказом по ЧНУ ім. Петра Могили №226 від 08.11.2023.

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи « _____ » _____ 20__ р.

3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні

Очікуваним результатом роботи є розроблена модель туристичної сенсорної мережі з використанням протоколу LoRaWAN. Вхідними даними роботи є перелік вимог до проєкту туристичного переносного пристрою й технічна специфікація протоколу LoRaWAN.

4. Перелік питань, що підлягають розробці

1) огляд бездротових технологій обміну даними, визначення переваг LoRa;

2) огляд існуючих туристичних мобільних пристроїв;

3) розробка апаратної частини туристичної сенсорної мережі ;

4) розробка програмної частини туристичної сенсорної мережі;

5. Перелік графічних матеріалів

слайди презентації

6. Завдання до спеціальної частини:

Проведення оцінки умов праці фахівців підприємства, а саме аналіз виробничого приміщення, оцінка природного освітлення.

7. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи
Д-р біол. наук, професорка Григор'єва Л. І.	Кафедра екології Навчально-наукового медичного інституту ЧНУ ім. Петра Могили	Спеціальна частина з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях

Керівник роботи

Канд. фіз.-мат. Наук, доцент Пузирьов Сергій Володимирович

(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Завдання прийнято до виконання

Баєв Віктор Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

(підпис)

Дата видачі завдання «____» _____ 20____ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної магістерської роботи

Тема: Туристична сенсорна мережа на базі LoRaWAN

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	23.10.2023	01.11.2023	Виконано
2.	Складання календарного плану КМР	01.11.2023	05.11.2023	Виконано
3.	Огляд літератури за темою роботи	05.11.2023	17.11.2023	Виконано
4.	Пошук та аналіз аналогічних рішень	17.11.2023	24.11.2023	Виконано
5.	Проектування апаратної частини	24.11.2023	08.12.2023	Виконано
6.	Розробка алгоритмів відправки та збереження даних	8.12.2023	29.12.2023	Виконано
7.	Тестування отриманої моделі	9.01.2024	15.01.2024	Виконано
8.	Оформлення звіту й презентації з КМР	15.01.2024	20.12.2024	Виконано
9.	Перший попередній захист КМР	30.01.2024	31.01.2024	Виконано
10.	Виправлення зауважень. Апробація результатів досліджень.	31.01.2024	10.02.2024	Виконано
11.	Рецензування	10.02.2024	12.02.2024	Виконано
12.	Другий попередній захист КМР	13.02.2024	14.04.2024	Виконано
13.	Підготовка до захисту	14.02.2024	25.02.2024	Виконано
14.	Захист	27.02.2024	28.02.2024	Виконано

Розробив здобувач Віктор Олексійович Баєв _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи доцент Пузирьов Сергій Володимирович _____

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

Магістерської кваліфікаційної роботи

«Туристична сенсорна мережа на базі протоколу LoRaWAN»

Студент: Баєв Віктор Олексійович

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент С.В. Пузирьов

Кваліфікаційна робота розглядає питання розробки мережі туристичних сенсорних пристроїв на базі протоколу LoRaWAN. Було досліджено переваги та недоліки використання LoRaWAN на відкритій місцевості в умовах великої відстані між клієнтами та шлюзом. Практичне значення результатів може бути використано як спосіб автоматизації виміру та відслідковування місцеположення та певних показників оточення туристичної групи під час проходження маршруту. Така функціональність може бути корисною задля спрощення процесу відзвітування після проходження маршруту та підвищення безпеки самого проходження туристичного маршруту шляхом передачі вимірюваних даних зв'язковому групі.

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи складається зі вступу, чотирьох основних розділів, розділу щодо охорони праці, висновків та додатків. Вступ містить загальні відомості щодо досліджуваної проблеми та причини з яких вона була досліджена. У першому розділі наведено відомості щодо аналізу наявних джерел інформації за темою й аналогічних пристроїв, відповідно до яких було розроблено ряд вимог до проєкту. Другий розділ містить процес проєктування, розрахунків математичної моделі й розробки алгоритмів. У третьому розділі проводить вибір та аналіз доступної елементної бази розроблюваного пристрою. У четвертому розділі подається процес розробки програмної реалізації та моделювання макету пристрою. У висновках наведено загальну інформацію щодо результатів виконаних досліджень та проєктування мережі туристичних сенсорних пристроїв. Додатки роботи містять відомості щодо апробації роботи, лістинг програмного коду та блок-схеми розроблених алгоритмів.

В цілому кваліфікаційна робота без додатків містить 71 сторінка, 33 рисунків, 6 таблиць, 33 джерел посилання.

Ключові слова: туризм, спортивний туризм, LoRaWAN, сенсорна мережа, сенсор, сенсорний пристрій.

ABSTRACT

of the Master's thesis

"Tourist sensor network based on the LoRaWAN protocol"

Student: Viktor Baiev Oleksiyovych

Consultant: Docent, Candidate of Physic-mathematical Sciences Puzyrov Sergii

The qualification work considers the development of a network of tourist sensor devices based on the LoRaWAN protocol. The advantages and disadvantages of using LoRaWAN in an open area with a long distance between clients and the gateway were investigated. The practical value of the results can be used as a way of automating the measurement and tracking of the location and certain indicators of the tourist group's environment during the route. Such functionality can be useful for simplifying the process of reporting after passing the route and increasing the safety of the tourist route itself by transmitting the measured data to the communication group.

The explanatory note of the qualification work consists of an introduction, four main sections, a section on labor protection, conclusions and appendices. The introduction contains general information about the investigated problem and the reasons for which it was investigated. The first section provides information on the analysis of available sources of information on the topic and similar devices, according to which a number of requirements for the project were developed. The second section contains the process of designing, calculating the mathematical model and developing algorithms. In the third section, the selection and analysis of the available element base of the developed device is carried out. In the fourth section, the process of developing the software implementation and modeling of the device layout is presented. The conclusions provide general information about the results of the conducted research and the design of a network of tourist sensor devices. The appendices of the work contain information on the approbation of the work, a listing of the software code, and block diagrams of the developed algorithms.

In general, the qualification work without appendices contains 71 pages, 33 figures, 6 tables, and 33 reference sources.

Keywords: tourism, sports tourism, LoRaWAN, sensor network, sensor, sensor device.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМИ. ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	9
1.1 Огляд специфіки туристичних технічних засобів	9
1.2 Аналіз необхідних даних.....	12
1.3 Огляд засобів бездротової передачі даних	13
1.3.1 Огляд Bluetooth і Bluetooth Low Energy	13
1.3.2 Огляд технології Zigbee	14
1.3.3 Огляд технології Wi-Fi	16
1.3.4 Протокол LoRaWAN.....	16
1.3.5 Висновки щодо технологій бездротових передачі даних	18
1.4 Аналіз існуючих рішень	19
1.4.1 Годинник-навігатор Garmin Instinct 2X Solar Tactical Edition...	20
1.4.2 Супутниковий комунікатор Garmin inReach Mini 2 Flame	22
1.4.3 Патент US11147459B2.....	23
1.4.4 Патент CN106373318B. Система моніторингу пожеж.....	25
1.5 Вимоги до проєкту	26
1.5.1 Призначення	26
1.5.2 Вимоги до апаратного забезпечення.....	26
Висновки до розділу 1	27
2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТУРИСТИЧНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORAWAN	28
2.1 Розробка архітектури мережі пристроїв	28
2.1.1 Зірка.....	28
2.1.2 Комірчаста (mesh)	29

Кафедра комп'ютерної інженерії	
Туристична сенсорна мережа на базі протоколу LoRaWAN	3
2.1.3 Дерево.....	30
2.1.4 Вибір архітектури мережі	31
2.2 Механізм збереження даних	34
2.2.1 Розрахунок мінімально необхідного об'єму сховища	34
2.2.2 Алгоритм збереження даних.....	38
2.3 Розробка алгоритму обміну повідомленнями	39
Висновок до розділу 2	40
3 ТЕХНІЧНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТУРИСТИЧНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORAWAN	41
3.1 Вибір сенсорних пристроїв	41
3.1.1 Барометр.....	41
3.1.2 GPS-трекер.....	43
3.1.3 Модуль пам'яті.....	45
3.2 Вибір апаратної платформи	45
3.2.1 Arduino UNO.....	46
3.2.2 Arduino Nano.....	47
3.2.3 Arduino Pro Mini	48
3.2.4 Висновок	49
3.3 Вибір LoRa-модулю	50
3.3.1 Microchip RN2483	50
3.3.2 HopeRF RFM95.....	51
3.3.3 Висновки до аналізу LoRa-модулів.....	52
3.4 Вибір LoRa-шлюзу	52
Висновок до розділу 3	54
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ	55
4.1 Моделювання схеми	55
4.1.1 Моделювання схеми	55
4.1.2 Розрахунок АКБ	58
4.2 Програмна реалізація.....	59

Кафедра комп'ютерної інженерії	
Туристична сенсорна мережа на базі протоколу LoRaWAN	4
4.2.2 Алгоритм відправки даних.....	60
4.2.3 Алгоритм резервного збереження даних.....	63
Висновок до розділу 4	64
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	68
ДОДАТОК А ДОВІДКА.....	72
ДОДАТОК Б Алгоритм побудови маршрутизації мережі.....	73
ДОДАТОК В Алгоритм резервного збереження даних.....	74
ДОДАТОК Г Алгоритм роботи пристрою класу А.....	75
ДОДАТОК Д Лістинг функції реагування на подію	76
ДОДАТОК Е Лістинг функції відправки даних	77
ДОДАТОК Ж Функція запису даних.....	78
ДОДАТОК З Публікація тез на конференції «Могилянські читання»..	79
ДОДАТОК И Тези опубліковані під час конференції «Інформаційні технології та інженерія»	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BLE	–	Bluetooth Low Energy
GPS	–	Global Positioning System
I2C	–	Inter-Integrated Circuit
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	–	Internet of Things
LoRa	–	Long Range
LoRaWAN	–	Long Range Wide Area Network
SPI	–	Serial Peripheral Interface
UART	–	Universal asynchronous receiver/transmitter

ВСТУП

Після проходження певного туристичного маршруту у якості звіту та підтвердження факту проходження групою заявленого маршруту, керівник туристичної групи повинен надати деталі маршруту, серед яких:

- фотознімки;
- особливості районів маршруту (рельєф, погодні умови, тощо);
- стан учасників під час проходження маршруту.

На даний момент переважна більшість керівників ведуть паперові чи електронні щоденники походу. З ціллю автоматизації фіксації деталей походу були виконані дослідження можливості виміру, збереження та відправки вимірюваних даних щодо проходження туристичного маршруту групою. Це дозволить більш точно відтворювати події та деталі проходження маршруту. Окрім цього, можливість передачі вимірюваних даних до центрального серверу покращить комунікацію між туристичною групою та зв'язковим. Тож, **актуальність роботи** зумовлена необхідністю розробки вимірювально-комунікативного пристрою, який буде здатний якомога довше працювати в умовах низького рівня зв'язку зі стільниковою та інтернет мережею. Головна ідея полягає у розробці пристрою, який буде здатний працювати в незвичайних умовах (в далині від будь-яких цивілізованих селищ): в місцях з низьким рівнем зв'язку та відсутньою можливістю часто заряджати або змінювати акумулятор. Іншою важливою характеристикою розроблювального пристрою є його мобільність – вага та розміри.

Метою дослідження є розробка проєкту апаратно-програмного комплексу вимірювальних пристроїв, які здатні обмінюватись даними в позаміських умовах.

Як **об'єкт дослідження** кваліфікаційної роботи було визначено енергоефективні технології обміну та збереження даних й можливості їх реалізації у IoT-проєктах.

Предметом дослідження даної роботи є – вивчення способів обміну даними в умовах низького рівня зв'язку та можливості резервного копіювання даних у внутрішню пам'ять пристрою. За проектною моделлю, у випадку відсутності зв'язку пристрій повинен мати можливість зберігати дані у внутрішній пам'яті. Коли зв'язок буде відновлено, усі дані які зберігаються у внутрішній пам'яті будуть надіслані до серверу, а внутрішня пам'ять може бути очищена.

Досягнення поставленої мети потребує виконання ряду **задач**, серед яких:

- проаналізувати доступні джерела інформації та аналогічні проекти;
- розробити проєкт сенсорного пристрою з підтримкою LoRaWAN протоколу;
- розробити механізми резервного зберігання даних;
- виконати моделювання розробленого проєкту;
- протестувати розроблену модель;
- оформити результати досліджень.

Гіпотеза даної роботи полягає у визначенні переваг та недоліків використання LoRaWAN мереж у випадку високої рухомості клієнтів у позаміських умовах.

Наукова новизна дослідження полягає у аналізі можливостей технології LoRa у ролі резервного каналу у лісистих чи гірських місцевостях. Розроблений пристрій реалізовує протокол LoRaWAN шляхом використання програмної бібліотеки й об'єднує у своєму складі ряд додаткових сенсорів. Окрім цього, розроблений пристрій підтримує журналювання відправлених даних до під'єданого модулю пам'яті.

Практичне значення роботи полягає у використанні системи розроблених пристроїв задля спортивних або розважальних туристичних походів. Даний пристрій забезпечить зв'язок похідної групи з центральним зв'язковим та зможе передавати поточні дані щодо стану групи і їх оточення.

Це може підвищити безпечність походів та спростити написання похідної звітності. Окрім цього, подібний пристрій може бути використаний у цілях ведення статистики на певній місцевості

Апробація роботи була проведена під час XXVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Могилянські читання» (Миколаїв, 06-10 листопада 2023 р.) та під час Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Інформаційні технології та інженерія» (онлайн, 31 січня – 2 лютого 2024 р.).

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМИ. ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Був виконаний аналіз технологій, які можуть бути використані задля побудови мережі сенсорних пристроїв. У цілях кращого розуміння проблеми був проведений огляд наявних аналогічних проєктів та туристичних пристроїв, які близькі за тематикою або активно використовуються на даний момент туристами. Згідно з вивченими матеріалами був сформований ряд вимог щодо розроблюваного проєкту.

1.1 Огляд специфіки туристичних технічних засобів

Був проведений огляд специфіки та умов у яких проходять туристичні походи. Технічні засоби призначені для туристів мають ряд специфічних вимог, оскільки під час проходження туристичного маршруту користувачі пристроїв стикаються з рядом проблем, пов'язаних з віддаленістю від розвиненої інфраструктури, погодними умовами, й іншими зовнішніми небезпеками. На рис. 1.1 наведено приклад туристичного маршруту, поданого у [1], з села Пасічна до села Бистриця.

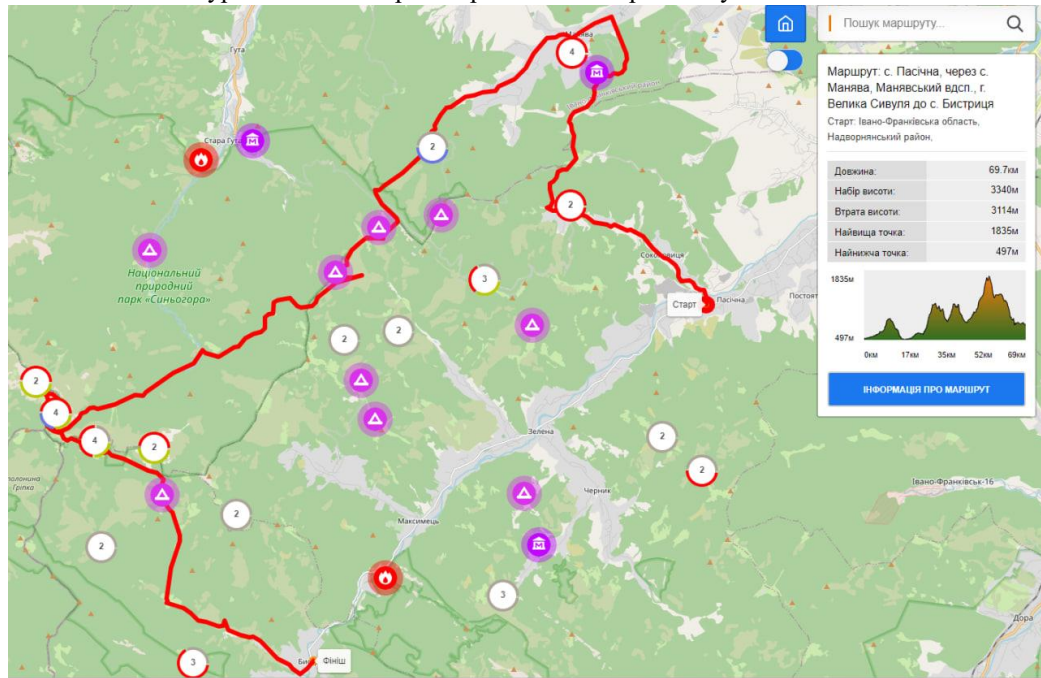


Рисунок 1.1 – Приклад туристичного маршруту

Було проведено дослідження якості зв'язку, яка наявна на території, через яку пролягає маршрут. Згідно з [2, 3] більша частина маршруту пролягає у місцях з низьким рівнем зв'язку стільникової мережі, або повністю відсутній. На рис. 1.2-1.3 наведено мапу покриття мережі на даній території.

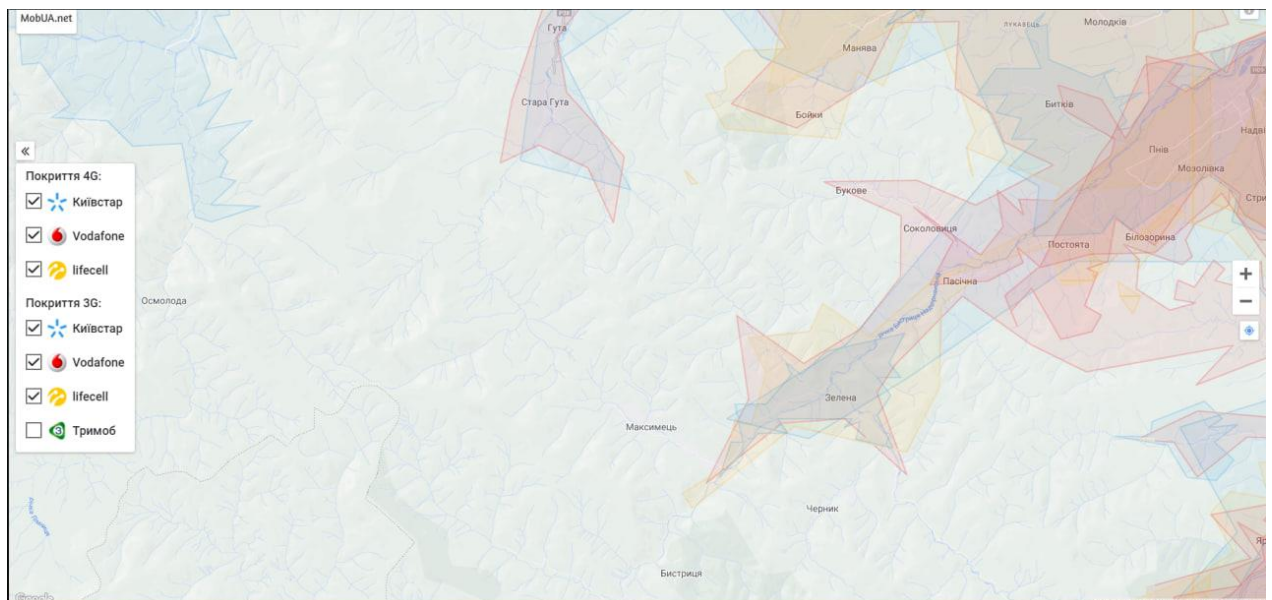


Рисунок 1.2 – Карта покриття стільниковою мережею згідно з MobUA

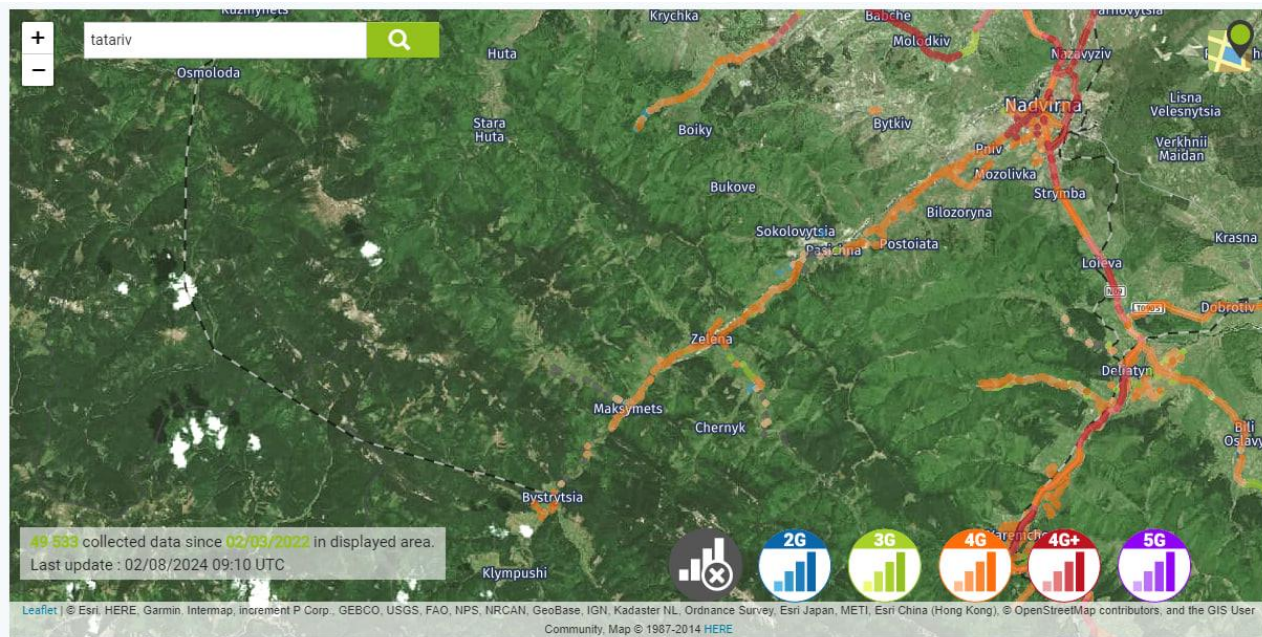


Рисунок 1.3 – Карта покриття згідно з nPerf

Іншою проблемою з якою стикаються туристи при використанні технічних засобів – енергоефективність. Протягом проходження туристичного маршруту група не має можливості відновити заряд акумуляторів пристроїв. Дану проблему часто вирішують такими способами:

- використання портативних АКБ;
- використання додаткових акумуляторів (якщо пристрій дозволяє змінювати акумулятор);
- повне відключення пристрою або переведення його до режиму низького вживання енергії.

Окрім вищенаведених пунктів, істотним є питання мобільності технічних засобів. Вага та розміри технічних засобів, які використовуються туристами повинні задовольняти потреби високої рухомості туристичної групи. Згідно з дослідженнями, середня вага туристичного рюкзака може відрізнятись від типу маршруту та фізичних здібностей особи й складає близько 30 кг.

Таким чином, згідно з виконаними дослідженнями, при розробці проєкту туристичного технічного засобу найбільшої уваги потребують питання:

- енергоефективності;
- незалежності від рівня зв'язку;
- мобільності.

1.2 Аналіз необхідних даних

Було проведено дослідження щодо даних, які можуть бути корисні під час проходження туристичних маршрутів різних складностей. Окрім складності, туристичні маршрути можуть розподілятися за видами:

- піший;
- гірський;
- лижний;
- з використанням додаткового транспорту (велосипедні, мото, авто);
- водний;
- спелео (підземний).

У рамках даної роботи розглядалась специфіка суто піших та гірських туристичних маршрутів. Найбільш важливим та практичним показником у рамках досліджуваної системи – є місцеположення особи з сенсором. Таким чином, сенсорний пристрій має містити GPS-модуль. Задля кращого розуміння типів даних, які необхідно вимірювати були досліджені положення маршрутно-кваліфікаційної комісії щодо звітів про туристичні походи [4]. Виходячи з цього, окрім GPS-модулю задля відстеження характеру маршруту може бути використаний альтіметр. Цей сенсор зможе виміряти поточну висоту на якій знаходиться особа-користувач. Окрім характеру тропи, альтіметр дозволить відслідковувати зміни висоти впродовж дня. Додатково розроблюваний пристрій може містити додаткові функції, серед яких:

- дисплей з годинником;
- вимірювання температури;
- вимірювання вологості;
- вимірювання рівня радіації.

Оскільки використання дисплею може значно підсилити рівень споживання заряду батареї, було прийнято рішення не розглядати дану функцію.

1.3 Огляд засобів бездротової передачі даних

Був виконаний порівняльний аналіз засобів бездротової передачі, які активно використовуються у IoT-проектах й могли б задовільнити поставлені вимоги. Використовувана технологія повинна мати якомога більшу зону покриття і низькі показники вживання енергії. Серед можливих рішень розглядались такі стандарти:

- стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth);
- Bluetooth Low Energy;
- стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee);
- стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi);
- LoRa.

1.3.1 Огляд Bluetooth і Bluetooth Low Energy

Bluetooth відноситься до технологій персональної мережі й розроблювався з ціллю замінити дротове підключення периферичних пристроїв персональних комп'ютерів. Стандарт надає можливість передавати дані на малі відстані (від 10 до 100 метрів) за допомогою радіо хвиль. Робоча частота сигналу складає 2,4 ГГц. Підтримує мережі типу «точка-точка» та «зірка». При цьому у межах однієї мережі присутній лише один головний пристрій. Не потребує ліцензії на використання.

Для цілей використання у акумуляторних пристроях існує протокол, побудований на основі Bluetooth, який має назву Bluetooth Low Energy (BLE). Хоча BLE заснований на технології Bluetooth, дані технології не є повністю зворотно-сумісними між собою. Головна ціль розробки BLE – створити стандарт конкурентний технології Zigbee, який міг би замінити IEEE 802.15.1 у сенсорних чи інших невеликих пристроях, які не мають постійного джерела живлення. Згідно з [5], технічні характеристики даного стандарту такі:

- частотний діапазон: 2,4 ГГц;
- відстань покриття: 30 м;
- споживаний струм: 15 мА;
- швидкість передачі даних: до 2 Мбіт/с.

1.3.2 Огляд технології Zigbee

Zigbee – мережеві протоколи які реалізують радіо стандарт IEEE 802.15.4. Протокол був створений у 2003 році як альтернатива технології Bluetooth для використання у сфері IoT. Ціллю розробки технології Zigbee було створення бездротової технології передачі даних, яка б забезпечувала стабільне підключення між вбудованими пристроями та низьке споживання енергії. Розробники визначили декілька типів логічних пристроїв у мережі Zigbee:

- ZC – Zigbee координатор. Виконує ініціалізацію мережі, керує вузлами та зберігає повну інформацію про них. Будь-яка мережа повинна мати хоча б один координатор;
- ZR – Zigbee маршрутизатор. Виконує роль маршрутизатору між пристроями. Може також виконувати якісь власні функції (вимір показників, відправка повідомлень, тощо);
- ZED – кінцевий пристрій Zigbee. Будь-який кінцевий пристрій, під'єднаний до мережі. Виконує лише власні функції.

На рис. 1.4 наведено приклад структури мережі за технологією Zigbee.

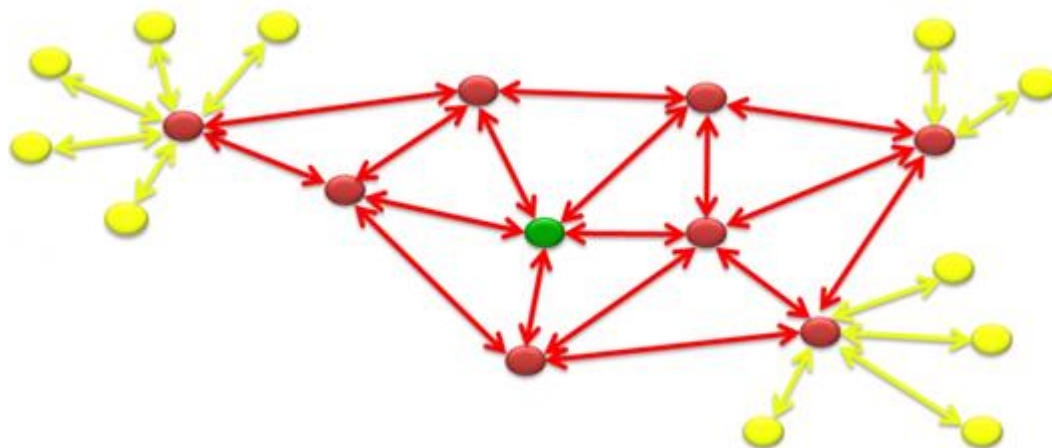


Рисунок 1.4 – Приклад структури мережі Zigbee

Низький рівень споживання енергії у пристроях в мережі Zigbee досягається тим, що кінцеві пристрої більшу частину своєї роботи знаходяться у режимі сну. Координатор та маршрутизатори зазвичай під'єднані до живлення на пряму, бо виконують енергоємну роботу. Коли виникає необхідність надіслати сигнал до іншого пристрою у мережі, кінцевий пристрій виконує наступні кроки:

- виходить зі сплячого режиму;
- підключається до мережі Zigbee;
- надсилає повідомлення;
- повертається до сплячого режиму.

Таким чином, навантажені маршрутизатори живляться від мережі живлення, а кінцеві пристрої, які виконують тільки корисну роботу, живляться від елементів живлення (батарейки та інше) і можуть працювати довгий час. Пристрої Zigbee підтримують роботу у трьох діапазонах частот:

- 2.4 ГГц (16 каналів);
- 915 МГц (10 каналів);
- 868 МГц (1 канал).

Технологія надає можливість передавати інформацію у радіусі від до 100 метрів зі швидкістю до 250 кбіт/с. Найбільшого поширення технологія

набула у системах інтернету речей (керування системами розумного дому, передача даних з датчиків, тощо).

1.3.3 Огляд технології Wi-Fi

Wi-Fi – технологія бездротового обміну даними на основі стандартів IEEE 802.11. Контролери, які взаємодіють з Wi-Fi мережею повинні пройти сертифікацію об'єднанням Wi-Fi Alliance. Основне призначення технології – підключення клієнтів до мережі інтернет та обмін мультимедійними даними. Для вбудованих пристроїв це надає можливість спілкуватись з віддаленими серверами, отримувати актуальні дані за допомогою публічних API або шляхом сканування HTML сторінок сайтів. Основні діапазони передачі даних – 2.4 ГГц та 5 ГГц. Перша версія специфікації була прийнята у 1997 році, але на сьогоднішній день можливості технології були значно розширені новими версіями стандарту. Недоліком використання технології Wi-Fi у вбудованих пристроях є високий рівень споживання енергії порівняно з іншими рішеннями для бездротової передачі даних. Іншою проблемою використання Wi-Fi для побудови мереж вбудованих пристроїв є радіус покриття. У зв'язку з високою популярністю стандарту IEEE 802.11 сигнал з частотою 2,4 ГГц стає більш розповсюджений, тож часто два різних сигнали можуть конфліктувати між собою. Побудова мережі на базі стандартів Wi-Fi може бути коштовною у зв'язку з використанням великої кількості інфраструктурних пристроїв (маршрутизатори, точки доступу й інші). З урахуванням вище наведеної інформації, можна сказати, що використання Wi-Fi при побудові IoT мережі доцільне лише в умовах постійного джерела енергії й з ціллю інтеграції даної мережі з приватною мережею користувача, або мережею інтернет.

1.3.4 Протокол LoRaWAN

Даний протокол передачі заснований на технології LoRa. Згідно з [6], LoRa – це метод модуляції радіохвиль, розроблений компанією Semtech. Він

працює в неліцензованих діапазонах частот, надаючи пристроям можливість обмінюватися даними на великих відстанях із мінімальним споживанням енергії. На рис. 1.5 зображено розділення технології LoRaWAN за рівнями OSI

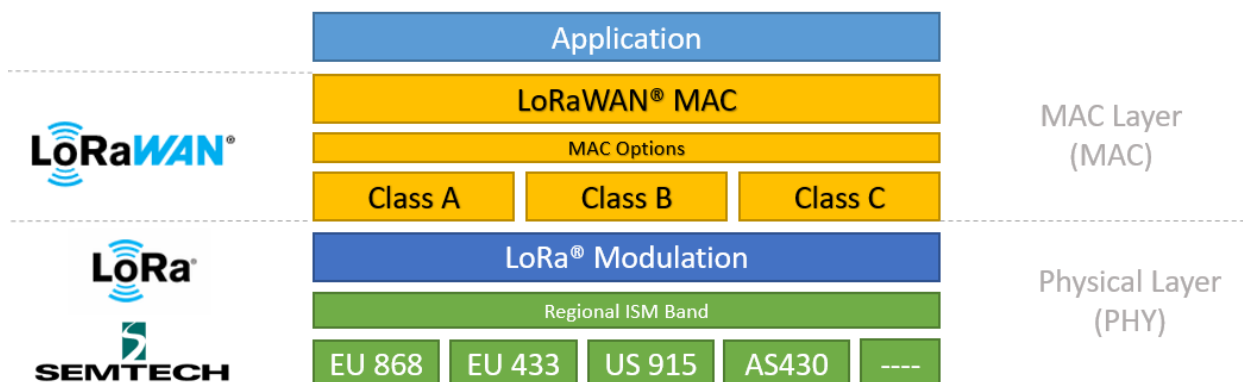


Рисунок 1.5 – Принципи роботи LoRaWAN за рівнями OSI

Мережі LoRaWAN можуть бути побудовані за різними топологіями. Найбільшого розповсюдження мають комірчаста та зірка. Згідно з [7], LoRaWAN має три класи кінцевих пристроїв, які відповідають різним вимогам:

- клас А. Передача даних ініціюється кінцевим пристроєм й завжди асинхронна. Передача даних на пристрій завжди відбувається після відправки даних з пристрою. Є найбільш енергоефективним;
- клас В. Відповідно з класом А, періодично виконуються запити з ціллю отримання даних на пристрій;
- клас С. Завжди прослуховує лінію зв'язку. Підходить для пристроїв які мають постійне джерело енергії, оскільки має високий ступінь енергоживлення.

Питання безпеки підключення та обміну даними у LoRaWAN мережах вирішується використанням ключів шифрування за алгоритмом AES з довжиною у 128 біт. У мережі визначаються два типи ключів:

- унікальний ключ сесії поміж кінцевим пристроєм та шлюзом (NwkSKey);

– унікальний ключ рівня застосунку, який може використовуватись усіма пристроями (AppSKey).

Серед додаткових засобів безпеки мережі можуть бути виділені такі засоби як аутентифікації нових пристроїв, які додаються у мережу та написання власної прошивки на пристроях, яка буде передбачати додаткове шифрування інформації перед відправкою. Згідно з [8], LoRaWAN широко використовується у якості протоколу IoT-мереж. Одна з найбільш розповсюджених сфер використання LoRaWAN – побудова сенсорних мереж:

- система розумного дому;
- система відслідковування стану повітря чи ґрунту на великих територіях [9];
- передача даних (освітленість, якість повітря, тощо) з сенсорів у межах міста [10].

Необхідно зазначити, що згідно з [11], LoRaWAN мережі чутливі до перешкод. Під час дослідження автори виконали низку експериментів, у ході яких визначили як впливають зовнішні чинники на якість та дальність передачі даних. Відповідно до наведених досліджень, задля покращення якості (швидкість передачі, дальність) покриття LoRaWAN мережею певної місцевості, можна використовувати такі способи:

- встановлення прямої видимості зі шлюзом;
- встановлення шлюзу на високі місця;
- використання декількох шлюзів.

Окрім цього, було встановлено обернено-пропорційну залежність між дальністю покриття та швидкістю передачі даних.

1.3.5 Висновки щодо технологій бездротових передачі даних

Відповідно до виконаних досліджень, було виявлено, що найбільш ефективними задля вирішення поставленої проблеми комунікації пристроїв в умовах туристичного походу, є технології LoRaWAN та Zigbee. Згідно з

додатковими даними з [12], було виділено порівняльну характеристику LoRaWAN та інших обраних стандартів бездротової передачі даних, яка наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика бездротових технологій передачі даних

Технологія	Частота, ГГц	Швидкість передачі, кбіт/с	Радіус покриття, м	Степінь вживання енергії
Bluetooth/BLE	2,4	720 – 1000	1 – 10	Низький
LoRaWAN	0,433; 0,868	0,25 – 50	Більше ніж 10 000	Низький
Wi-Fi	2,4; 5	1200 – 5400	Близько 100	Високий
Zigbee	0,870; 0,902 – 0,928; 2,4	20 – 50	10 – 1600	Низький

Як згадувалось вище, головними вимогами до пристрою є низький ступінь споживання енергії та здатність передавати дані на великі відстані. Згідно з табл. 1.1, відповідно до необхідних характеристик, LoRaWAN протокол є найбільш оптимальним для використання у розроблюваній мережі пристроїв. Незважаючи на низьку швидкість передачі даних, дана технологія надає найбільший радіус покриття мережі й має низькі показники вживання енергії.

1.4 Аналіз існуючих рішень

Був виконаний огляд існуючих рішень і патентної бази, які повністю або частково повторюють функціонал досліджуваного проекту. Згідно з оглядом, туристичні пристрої розподілились за такими категоріями:

- супутниковий трекер;
- рація/радіо;

– багатофункціональний смарт-годинник.

Серед досліджуваних пристроїв найчастіше зустрічались вироби компанії Garmin. Дана компанія спеціалізується зі створення спортивних та туристичних гаджетів (смарт-годинники, GPS-трекери, тощо). Приклади моделей наведено нижче.

1.4.1 Годинник-навігатор Garmin Instinct 2X Solar Tactical Edition

Зовнішній вигляд моделі наведений на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Garmin Instinct 2X Solar Tactical Edition

Дана модель має ряд функцій звичайного годинника та додаткові функції для активностей пов'язаних зі спортивною або військовою діяльністю. Даний годинник містить сонячні батареї, що дозволяє збільшити тривалість роботи годинника. Має змогу відміряти пульс та насиченість крові киснем. Операційна система годинника містить ряд корисних функцій у повсякденному житті:

- перегляд повідомлень (електронні листи, текстові повідомлення, тощо);
- оплата годинником;
- календар.

Окрім цього, наявні інтеграції з рядом спортивних сервісів Garmin, серед яких:

- рекомендації щодо тренувань;
- відслідковування фізичного стану користувача;
- функції призначені для конкретного виду спорту (плавання, велоспорт, тощо).

За додаткову плату користувач може отримати доступ до балістичного калькулятора, який спрощує процес прицілювання в польових умовах. Загальні характеристики годинника наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – загальні характеристики годинника Garmin Instinct 2X Solar Tactical Edition

Характеристика	Значення
Розмір, мм	50,0 × 50,0 × 14,5
Вага, г	67
Час роботи від батареї	Залежно від режиму. Від 36 годин до 40 днів
Внутрішня пам'ять, Мбайт	64
Датчики	GPS, пульсометр, монітор насичення крові, висотомір, компас, гіроскоп, акселерометр, термометр

Таким чином, можна сказати, що цільовою аудиторією даного рішення – є військові. Даний годинник містить усі мінімально-необхідні функції інших смарт-годинників компанії Garmin (безконтактна оплата, перегляд повідомлень, інтеграції з сервісами компанії, тощо) й ряд корисних додаткових функцій пов'язаних з військовими активностями. Висока якість та популярність даного гаджету зумовлена якістю програмної частини гаджету. Усі сенсори інтегровані з сервісами компанії Garmin та надають широкий спектр можливостей користувачу. Висока автономність пристрою досягається шляхом використання сонячної батареї та оптимізацією програмної частини.

1.4.2 Супутниковий комунікатор Garmin inReach Mini 2 Flame

Був виконаний огляд супутникового комунікатора. Вигляд моделі наведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Супутниковий комунікатор Garmin inReach Mini 2 Flame

Серед функцій даного комунікатора можна навести:

- обмін повідомленнями супутниковою мережею;
- автоматична відправка даних щодо місцеположення (кожні 10 або 30 хвилин);
- компас.

Згідно з описом пристрою, він не має можливості завантажувати та відображати карти місцевості. Незважаючи на це, пристрій має функцію повернення до початкової точки: за допомогою компасу та GPS пристрій запам'ятовує маршрут користувача та може привести його зворотнім шляхом. Для користування даним пристроєм користувач повинен мати активну підписку на користування супутниковою мережею. Має екстрену кнопку SOS, яка відправляє повідомлення про небезпечну ситуацію до координаційного центру. Загальні характеристики пристрою наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Загальні характеристики супутникового комунікатора
Garmin inReach Mini 2 Flame

Характеристика	Значення
Розмір, см	5,17 × 9,90 × 2,61
Вага, г	100
Час роботи від батареї	Залежно від обраного режиму та умов користування. Від 2 днів до 30 днів
Внутрішня пам'ять	Значення не надано
Датчики	супутниковий приймач, GPS, компас

Згідно з виконаним аналізом даний пристрій має значно менший спектр функцій. Головна перевага пристрою – незалежність від покриття стільниковою або іншою мережею. Супутникова мережа має значно більше покриття, таким чином користувач має більшу вірогідність надіслати повідомлення у екстремальних місцях з низьким рівнем зв'язку (відкритий океан, глибокий ліс, високогір'я, тощо). Тож, головне призначення даного пристрою – мати резервну лінію зв'язку з іншими людьми на випадок відсутнього зв'язку.

1.4.3 Патент US11147459B2

Патент представлений у [13], розглядає питання розробки пристрою у вигляді браслету з ціллю відслідковування стану та місцеположення пацієнтів хворих на деменцію. На рис. 1.8 представлений зовнішній вигляд патентного пристрою.

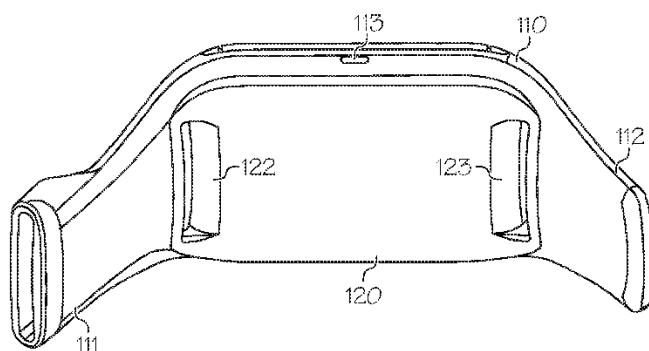
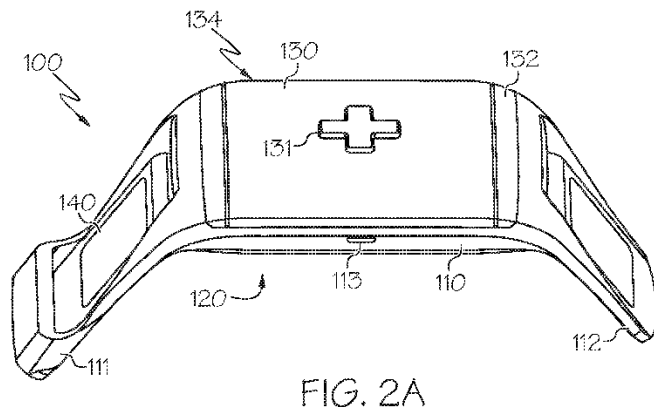


Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд пристрою з патенту US11147459B2

Розробник представленого патенту пропонує розташувати певну кількість шлюзів територією лікарні. Кожний пацієнт буде мати власний сенсорний браслет з унікальним ідентифікатором. Шляхом об'єднання LoRaWAN протоколом даних пристроїв пропонується створити локальну мережу, у якій медичний персонал зможе контролювати стан (шляхом перевірки показників сенсорів) й місцеположення пацієнтів. У рамках наведеного дослідження розробник описує протокол та способи спілкування між пристроями. Окрім цього, у висновках пропонується альтернативне використання подібних пристроїв у освітніх закладах, поліцейських та військових академіях, спортивних школах, тощо.

1.4.4 Патент CN106373318B. Система моніторингу пожеж

Згідно з патентом у [14], технологія LoRa може бути використана задля системи моніторингу пожеж на певній території. Оригінальний текст патенту був перекладений шляхом використання технологій розпізнавання символів. На рис. 1.9 представлена схема комунікації між пристроями у перекладі українською мовою.

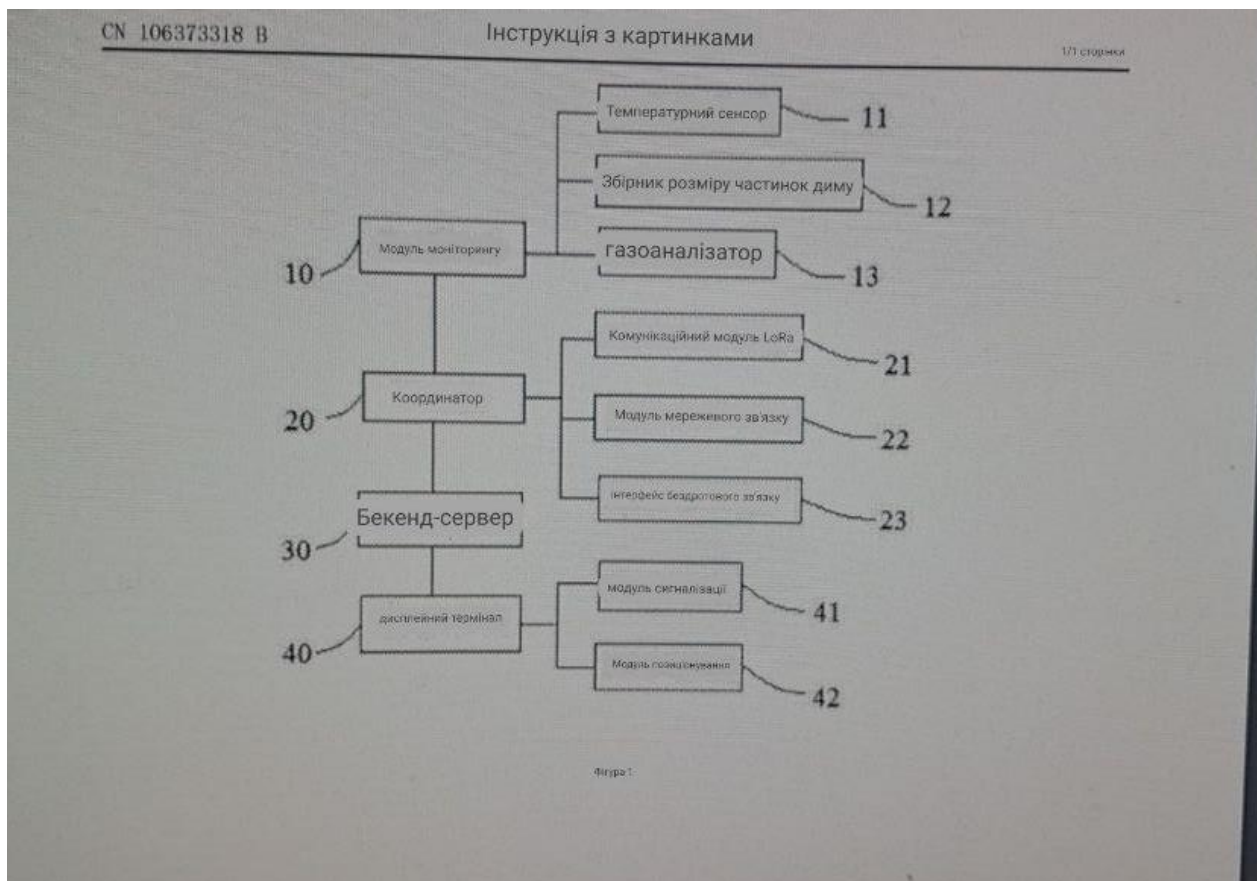


Рисунок 1.9 – Переклад схеми комунікації між пристроями

Як видно з дослідження, розробник пропонує сенсорну систему на базі технології LoRa, яка буде здатна надсилати показники сенсорів стану повітря та температури до певного серверу. Згідно з патентом, сенсорні модулі пропонується заряджати за допомогою сонячних панелей. Передбачається, що локація сенсорних модулів, буде визначатись за RSSI сигналу. Використання такої мережі надає змогу швидко реагувати на появу пожежі у лісистій місцевості й вести статистику тих чи інших чинників пожеж у лісах.

1.5 Вимоги до проєкту

Відповідно до виконаного аналізу літератури та огляду варіацій існуючих рішень та технологій, були сформовані певні вимоги щодо розроблюваного проєкту.

1.5.1 Призначення

Головне призначення проєкту сенсорної туристичної мережі на базі LoRaWAN – об'єднати учасників туристичного походу мережею сенсорних пристроїв, які передають показники сенсорів на центральний сервер. Сенсорні пристрої повинні мати наступні характеристики:

- висока ступінь енергонезалежності;
- мобільність (низька вага, невеликі габарити);
- якісний зв'язок на великих відстанях.

Передбачається, що даний комплекс пристроїв може бути використаний у надзвичайних умовах, віддалених від розвинених міст або селищ.

1.5.2 Вимоги до апаратного забезпечення

Згідно з виконаними дослідженнями, були зроблені висновки відносно набору апаратного забезпечення пристроїв сенсорної мережі. Серед необхідних модулів кожний пристрій повинен містити:

- модуль зв'язку LoRa;
- модуль додаткової пам'яті;
- модуль підключення джерела живлення;
- GPS-модуль;
- модуль альтиметру.

Головними вимогами до апаратного забезпечення є використання енергоефективних елементів й створення мобільного пристрою: з якнайменш нижчою вагою та габаритами. Оскільки даний пристрій планується використовувати у вигляді переносного пристрою, було передбачено модуль

підключення джерела живлення. Інші сенсорні модулі, окрім обраних, були визначені як неактуальні та мають менший пріоритет. Задля передачі даних буде використаний модуль LoRa. У випадку відсутності з'єднання дані будуть записані у внутрішню пам'ять пристрою. Задля збільшення максимально можливої пам'яті передбачається використання додаткового модулю пам'яті.

Висновки до розділу 1

Був виконаний аналіз літературних та наукових джерел й існуючих рішень, які вирішують питання обміну та запису інформації щодо зовнішніх умов під час проходження туристичного маршруту. Відповідно до виконаного аналізу, були розроблені вимоги щодо реалізації проєктного пристрою та мережі. У якості технології передачі даних між пристроями було обрано протокол LoRaWAN, оскільки він надає низький рівень споживання енергії й велику дальність покриття. Згідно з оглядом необхідних даних під час проходження маршруту та написання звіту керівником туристичної групи, у якості датчиків було прийнято рішення використати лише альтіметр. Серед модулів зв'язку проєкт передбачає використання GPS-модулю, та LoRaWAN-модулю.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТУРИСТИЧНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORAWAN

Даний розділ містить відомості щодо створення моделі системи туристичної сенсорної мережі. Була розглянута принципова схема мережі, базові алгоритми та принципи роботи сенсорних пристроїв, способи взаємодії різних компонентів системи. На основі виконаних досліджень була представлена модель за якою може бути побудована мережа сенсорних пристроїв.

2.1 Розробка архітектури мережі пристроїв

Був виконаний огляд топологій, поширених при побудові сенсорних мереж у IoT-проектах. Серед найбільш розповсюджених були визначені такі топології:

- зірка;
- комірчаста (mesh);
- дерево;
- змішана.

2.1.1 Зірка

Приклад побудови мережі за топологією зірка наведено на рис. 2.1. Мережа за топологією «зірка» будується з використанням одного центрального логічного пристрою, який об'єднує усі інші в мережу.

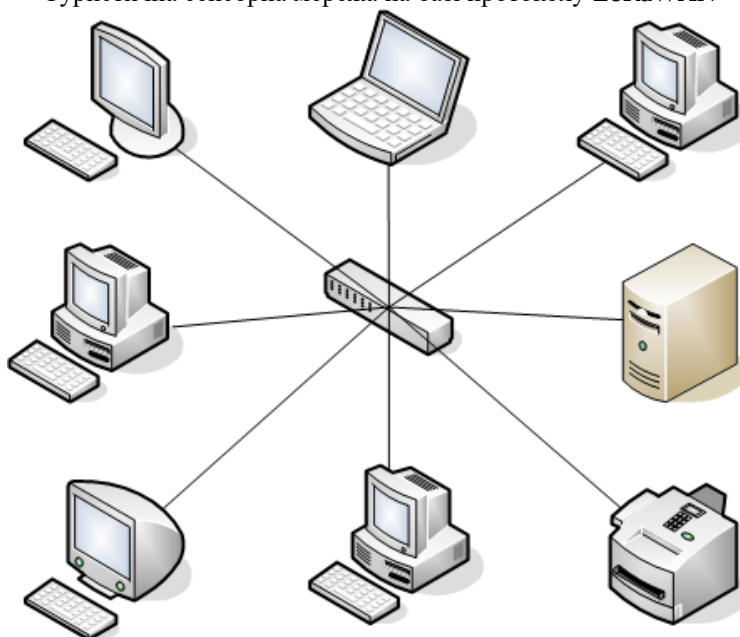


Рисунок 2.1 – Приклад мережі топології «зірка»

Як видно з прикладу рис. 2.1, дана мережа має один маршрутизатор, який об'єднує усіх клієнтів. Головним недоліком такого підходу є технічні обмеження маршрутизатору мережі. У випадку будь-якої несправності маршрутизатора – мережа не буде функціонувати. Якщо розглядати мережу топології «зірка» у контексті використання в бездротових мережах, дана топологія обмежує мережу радіусом покриття однієї точки доступу. Незважаючи на перелічені недоліки, мережа топології «зірка» часто використовується при побудові простих IoT-проектів. Завдяки використанню одного логічного пристрою, який виконує функцію маршрутизації, зменшуються витрати енергії пристроїв-клієнтів. Таким чином, відповідальність побудови та підтримки мережі знімається із сенсорних чи контролерних пристроїв і вони виконують лише свою визначену функцію.

2.1.2 Комірчаста (mesh)

Даний тип топології передбачає побудову однорангової мережі, де кожний клієнт має відомості про інших доступних клієнтів. На рис. 2.2 наведено приклад схеми мережі, побудованої за комірчастою топологією.

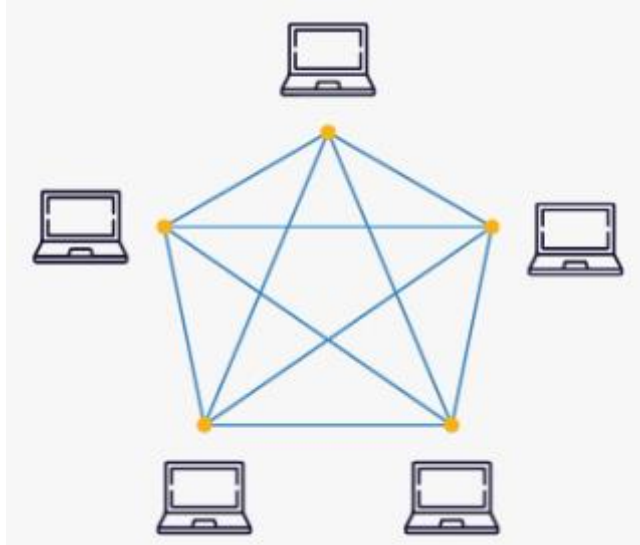


Рисунок 2.2 – Приклад мережі комірчастої топології

Даний тип топології може бути складним для налаштування, але забезпечує високий рівень стабільності мереж. Задля спрощення підключення нових клієнтів до мережі, розробниками були створені алгоритми самостійної організації мережі. Таким чином, у випадку виходу з ладу якоїсь ланки мережі, клієнтські пристрої зможуть обмінюватись даними іншим шляхом. Окрім цього, наявність декількох шлюзів надає змогу клієнту обрати найбільш оптимальний шлях до отримувача. Недоліком використання даного типу мережі в IoT-проектах є те, що кожний клієнт мережі повинен містити логіку побудови та підтримки комірчастої мережі. Виконання даних алгоритмів часто передбачає відправку та обробку періодичних повідомлень, що є енерговитратним процесом. Окрім цього, виконання логіки підтримки мережі може потребувати додаткових витрат працездатності і пам'яті пристрою. Таким чином, використання комірчастих мереж для побудови мережі вбудованих пристроїв доцільне коли наявне постійне джерело енергії і пристрій достатньо потужний для виконання поставлених задач.

2.1.3 Дерево

Топологія типу «дерево» передбачає розбиття множини пристроїв мережі на ранги. На основі рангів пристроїв будується ієрархія, відповідно

якої створюється мережа пристроїв. На рис. 2.3 наведено приклад схеми мережі побудованої за топологією «дерево».

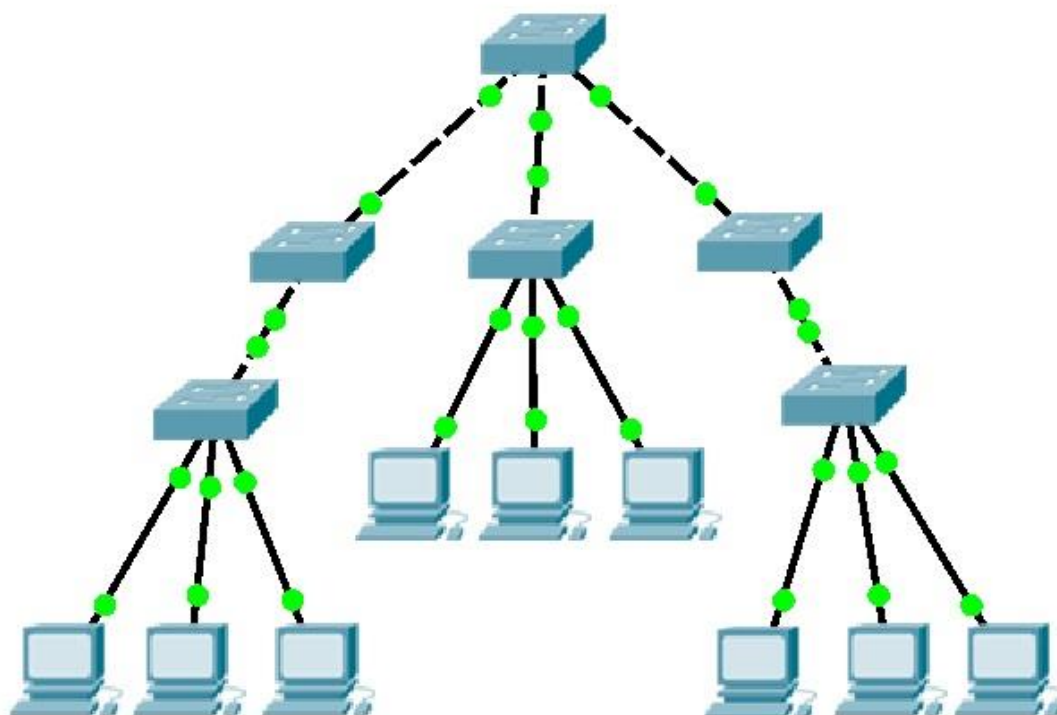


Рисунок 2.3 – Приклад мережі топології «дерево»

Використання топології «дерево» дозволяє зберегти переваги топології «зірка» й вирішує проблему радіусу покриття та стабільності шляхом додавання додаткових точок доступу (маршрутизаторів) у мережу. У сфері IoT-проектів топологія типу «дерево» може бути використана для побудови складної мережі, яка містить велику кількість клієнтів з різними функціями чи правами доступу. Розподілення обов'язків маршрутизації мережі поміж декількома точками доступу надає змогу спростити процес конфігурації мережі. Окрім цього, можливість додавання чи видалення окремих гілок мережі спрощує процес розширення мережі.

2.1.4 Вибір архітектури мережі

Були виконані дослідження щодо використання різних типів топологій у побудові бездротових мереж. До уваги були взяті такі характеристики:

- ступінь стабільності підключення та рівню сигналу, який отримується;
- кошторис побудови мережі (кількість необхідних пристроїв обслуговування мережі);
- енерговитратність мережі.

Згідно з вищенаведеними теоретичними відомостями, найбільш ефективною та економною з точки зору використання енергії, є використання змішаної топології на основі топологій «дерево» та «зірка». Використання комірчастої топології може потребувати додавання алгоритмів підтримки та побудови мережі у клієнтські сенсорні пристрої, що збільшить енерговитратність та навантаження на пристрої. Однак, практичні дослідження наведені у [15], демонструють, що при збільшенні дистанції до 3 км і більше, використання комірчастої топології порівняно з топологією «зірка» може бути близьким або більш оптимальними за показниками енерговитратності. Розробка наведена у [16] демонструє, що радіус покриття LoRa сигналу в умовах лісистості місцевості досягає близько 250 м. Тож, для покриття зони у 10 гектарів необхідно мати принаймні 4 сенсорних пристроїв у мережі. Так само дослідження наведені у [17] демонструють, що зі збільшенням LoRa пристроїв, кількість втрачених пакетів повідомлень зменшується. Подальший аналіз теоретичних відомостей показав, що замість використання комірчастої топології з одноранговими пристроями, можна використати топологію типу «дерево» з можливістю динамічного налаштування мережі. Дослідження [18] наводить переваги та недоліки використання топології «дерево» з можливістю динамічного налаштування. Згідно з виконаним дослідженням, наведена розробка дозволяє значно підвищити час роботи пристроїв шляхом синхронізованого переходу в режим сну. Розроблений протокол передачі даних має назву LoRa SEEL й поширюється за некомерційною ліцензією.

Підводячи підсумки, на основі виконаних досліджень, було прийнято рішення використати топологію у вигляді дерева. Принципова схема мережі наведена на рис. 2.4.

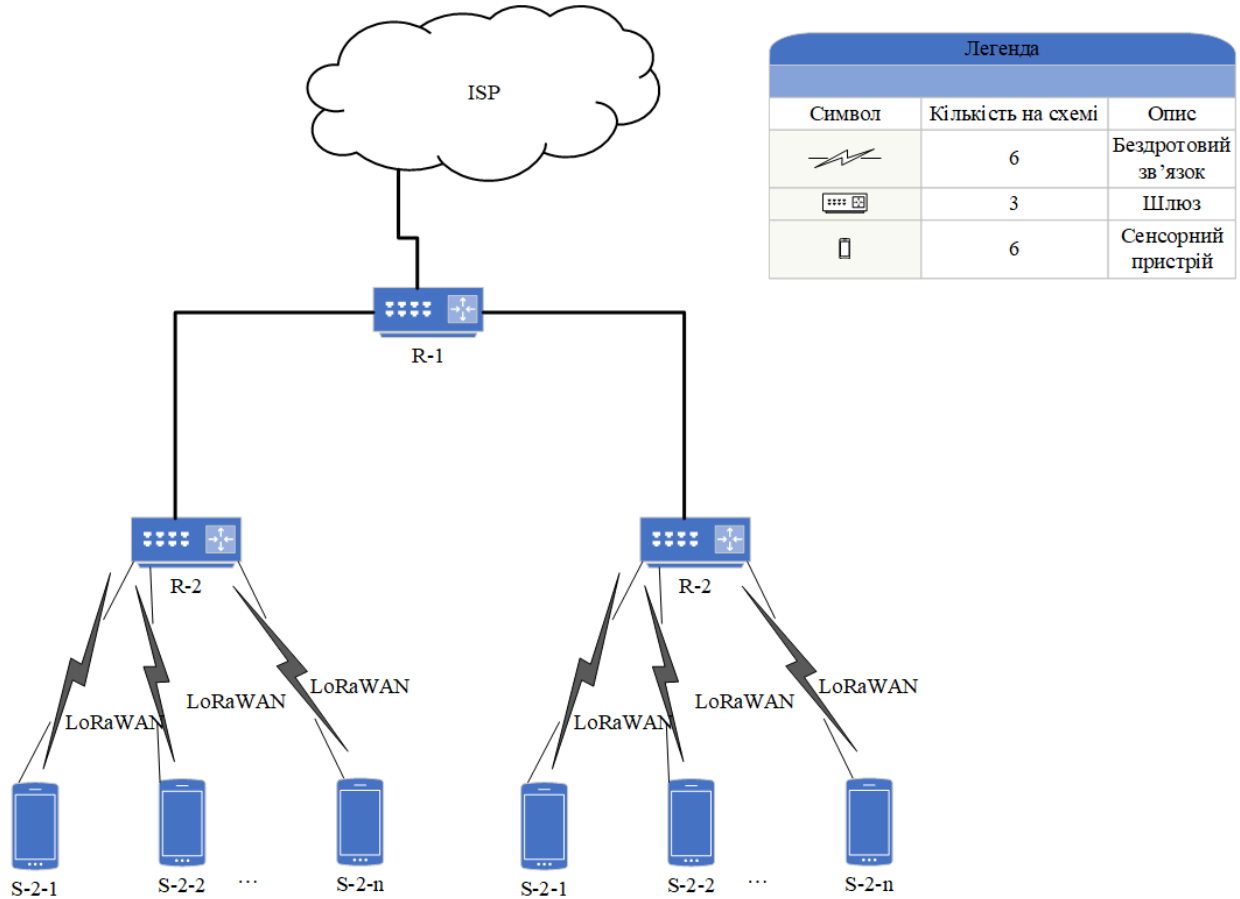


Рисунок 2.4 – Принципова схема мережі

Такий спосіб побудови мережі забезпечить можливість легко розширювати мережу. Виділення ієрархії поміж пристроями дозволить зняти навантаження з побудови та підтримки мережі з сенсорних клієнтних пристроїв. У випадку необхідності пристрої, які виконують роль точки доступу, можуть бути розширені логікою динамічного налаштування, що покращить ступінь енергонезалежності мережі. Виходячи зі схеми, передбачається, що сенсорні пристрої будуть відправляти дані до обраного шлюзу, який в свою чергу відправляє зібрані дані до мережі інтернет на сервер застосунку. Алгоритм маршрутизації мережі може бути реалізований типово за принципом найближчого можливого шлюзу. Такий спосіб забезпечує більш

надійну передачу даних, що гарантує відсутність втрачених пакетів даних. У дослідженні наведеному в [19] пропонується використати інакший алгоритм побудови маршрутизації шлюзів. У додатку Б наведено локалізований та дещо змінений алгоритм побудови маршрутизації мережі. Такий алгоритм маршрутизації оптимізує кількість шлюзів, які будуть використані при відправці повідомлення до базової станції й дозволяє відфільтрувати зайві зв'язки між ланками мережі. У випадку якщо маршрут до БС не був побудований, за алгоритмом програма переходить у режим сну й виконає перевірку знову під час наступного запуску даної логіки. Передбачається, що зможе виконуватись періодично задля оновлення таблиці маршрутизації й побудови найбільш оптимальних маршрутів.

2.2 Механізм збереження даних

2.2.1 Розрахунок мінімально необхідного об'єму сховища

У випадку відсутності зв'язку сенсорний пристрій повинен мати можливість зберігати невідправлені дані у внутрішній пам'яті. Задля підвищення надійності сховища пропонується використати записи в енергонезалежній пам'яті. За формулою (2.1) були проведені підрахунки мінімально необхідного об'єму носія даних:

$$C_e = \frac{T \cdot l_{msg}}{t_{delay}} \quad (2.1)$$

де, C_e – розрахований об'єм даних за пройдений маршрут;

T – сумарний час роботи сенсорного пристрою;

l_{msg} – довжина одного повідомлення;

t_{delay} – затримка поміж вимірами.

Сумарний час роботи сенсорного пристрою може бути виражений як додаток часу, який витрачається для переміщень протягом дня, та кількості днів у поході (2.2):

$$T = T_{walk} \cdot d$$

де, T_{walk} – середній час, який група витрачає для переміщень;
 d – кількість днів у поході.

Час, який група проводить у переміщенні зазвичай співпадає з часом тривалості дня: від заходу до заходу сонця. Це пов'язано з тим, що група зобов'язана пройти якомога далі та дістатись точки наступної ночівлі. Окрім цього, час переходу залежить від типу (піший або гірський) самого туристичного походу. Рекомендований час подолання маршруту протягом дня – 12 годин, або 720 хвилин. Згідно з, залежно від ступеня складності маршруту кількість днів може варіюватись від 6 до 20 днів.

Довжина повідомлення записаного на носій визначається декількома факторами, зокрема способом серіалізації даних. На даний момент розробниками залежно від поставлених задач використовуються такі способи:

- текстовий формат. JSON, XML, тощо;
- бінарний формат. BSON, ProtoBuff, MessagePack, тощо.

Використання текстового формату виправдане спрощенням процесу пошуку помилок й підвищенням читабельності даних. Таким чином, для перегляду отриманої інформації необхідно лише відкрити файл чи прочитати сигнал. Недоліком використання текстових форматів у IoT-проектах є додаткові витрати об'єму пам'яті й апаратної потужності на формування текстового об'єкту за обраним стандартом. Згідно з даними наведеними у [20], використання бінарних форматів даних у сфері IoT-проектів є більш доцільним. Серед переваг використання бінарних форматів:

- оптимальніше використання пам'яті;
- менші витрати апаратних ресурсів.

Тому, задля збереження даних було прийнято рішення використати бінарний формат серіалізації. Серед способів серіалізації даних у бінарний формат було прийнято рішення віддати перевагу стандарту MessagePack.

Згідно з дослідженнями [20], даний стандарт є найбільш енергоефективним. Компактність даного стандарту досягається за рахунок оптимізації байтового представлення стандарту JSON. На рис. 2.5 представлено приклад різниці між представленням даних у форматі JSON та PSN.

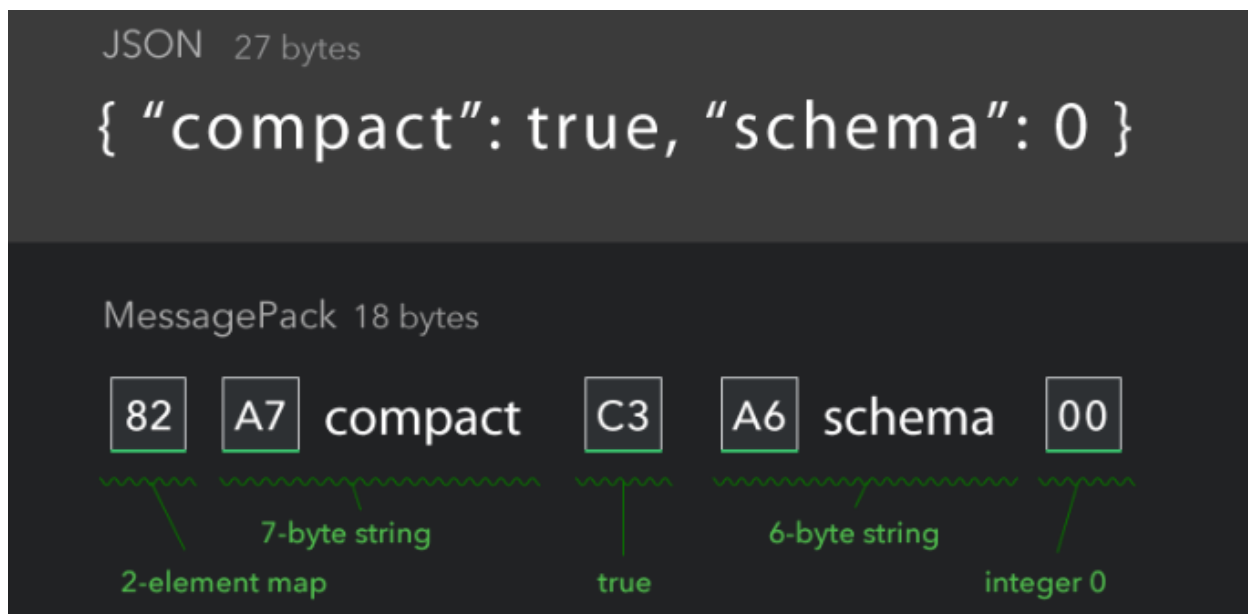


Рисунок 2.5 – Порівняння даних серіалізованих у форматі JSON та MessagePack

Була розроблена модель за якою передбачається зберігати дані у сховищі. За результатами тестування, вихідна модель у форматі JSON розміром 127 байт (з розрахунку, що кожний символ складає один байт) була стиснута до 108 байт. Оскільки формат даних може бути змінений у подальшому, у розрахунках було використане значення 128 байт, що відповідає приблизно 150 байт формату JSON.

JSON 127 bytes

```
{"temperature":40.50,"high":4689.20,"lat":34.719040,"longitude": 80.979327,"humidity":0.47,"lightness": 100000,"power":100}
```

MessagePack (hex) 108 bytes 85 %

```
87 ab 74 65 6d 70 65 72 61 74 75 72 65 cb 40 44 40 00 00 00 00 00 a4 68 69
67 68 cb 40 b2 51 33 33 33 33 33 a3 6c 61 74 cb 40 41 5c 09 80 b2 42 07 a9
6c 6f 6e 67 69 74 75 64 65 cb 40 54 3e ad 4b 27 45 bf a8 68 75 6d 69 64 69
74 79 cb 3f de 14 7a e1 47 ae 14 a9 6c 69 67 68 74 6e 65 73 73 ce 00 01 86
a0 a5 70 6f 77 65 72 64
```

Рисунок 2.6 – Приклад кодування даних форматом MessagePack

У якості значення часу періодичного запису даних було прийнято рішення обрати інтервал у 5 хвилин. Таким чином, підставивши числові значення у рівняння (2.1–2.2), отримаємо:

$$T_6 = 720 \cdot 6 = 4320 \text{ (хвилин)}$$

$$C_{e6} = \frac{4320 \cdot 128}{5} = 110592 \text{ (байт)}$$

Були так само виконані розрахунки для випадку з вищим ступнем складності походу:

$$T_{21} = 720 \cdot 21 = 15120 \text{ (хвилин)}$$

$$C_{e21} = \frac{15120 \cdot 128}{5} = 387072 \text{ (байт)}$$

Іншою характеристикою, яка могла б значно вплинути на об'єм сховища є періодичність записів до файлу. У випадку якщо встановити періодичність до 1 хвилини:

$$C_{e1_6} = \frac{4320 \cdot 128}{1} = 552960 \text{ (байт)}$$

$$C_{e1_21} = \frac{15120 \cdot 128}{1} = 1935360 \text{ (байт)}$$

Таким чином, у випадку використання сенсорного пристрою під час проходження маршруту низького ступеня складності, де кількість днів не

перевищує 6 днів, буде достатньо сховища об'ємом 128 кбайт. Задля використання сенсорного пристрою під час проходження маршрутів більш високої складності, об'єм сховища повинен мати об'єм якнайменш 512 кбайт. У випадку необхідності збільшення частоти записів, об'єм сховища може значно зростати, до 2 Мбайт і більше. Залежність величини мінімально необхідного об'єму від вхідних параметрів наведена на рис. 2.7.

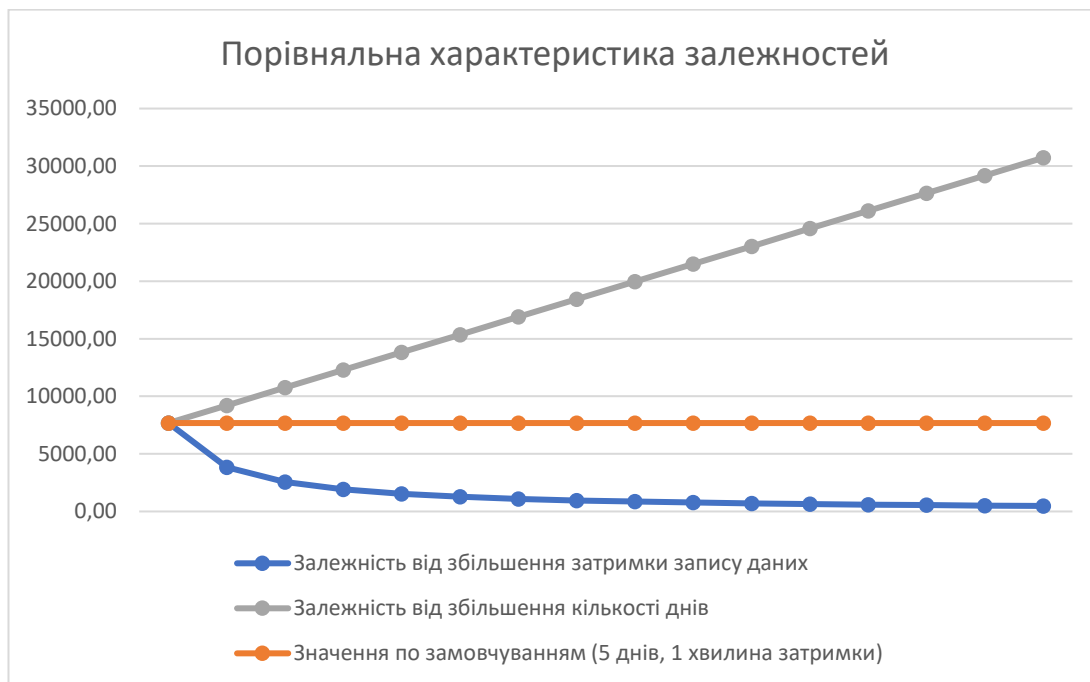


Рисунок 2.7 – Порівняльна характеристика залежності ємності сховища від зміни параметрів

2.2.2 Алгоритм збереження даних

Був розроблений алгоритм, за яким передбачається побудувати функцію резервного збереження даних. Блок-схема алгоритму наведена у додатку В. Процес починається з отримання даних, які були виміряні сенсорами. У випадку успішної відправки даних, процес завершується й виклик логіки резервного копіювання не потрібен. Якщо процес відправки даних мережею завершився не успішно, виконується спроба записати виміряні дані у внутрішнє сховище. У алгоритмі був використаний вхідний параметр N, який позначає кількість записів, які може містити один файл. Умова з лічильником

була додана з ціллю розподілити записані дані поміж декількома файлами. Таким чином вирішується проблема створення одного важкого файлу. Окрім цього, зі збільшенням розміру файлу, процес його читання й запису може значно сповільнюватись. Іншим способом вирішення даної проблеми є створення для кожного сенсору нового файлу, але даний процес може бути надто енерговитратним. Окрім цього, зі збільшенням кількості файлів у кореневій директорії процес орієнтування файлами стає складніше.

2.3 Розробка алгоритму обміну повідомленнями

Як було зазначено вище, технологія LoRa має низьку швидкість передачі даних. У зв'язку з цим у специфікації протоколу LoRaWAN розробники надають максимальний обсяг пакету даних. Згідно з версією 1.0.3 [21], максимальний розмір пакету даних складає 242 байти. Необхідно зазначити, що розробники оперують меншим об'ємом пакету, оскільки частина може бути використана в утилітарних цілях бібліотеками або самим протоколом. Також специфікація протоколу визначає ряд стандартних повідомлень, які виконують службову функцію. Серед таких повідомлень:

- приєднання до мережі;
- комунікація типу запит-відповідь;
- перевірка стану клієнта.

Інша проблема, яка вирішується у тексті специфікації – синхронізація повідомлень у часі. Як було зазначено вище, пристрої класу В мережі на базі протоколу LoRaWAN періодично відправляють широкомовні запити. Задля успішного отримання відповіді на запит, клас В синхронізує час коли він здатен приймати повідомлення із часом відправки широкомовного запиту. Для цього інтервал відправки повідомлення розподілений на певні комірочки, кожна з яких складає 30 мс. Відповідь, яку пристрій отримає на своє повідомлення прийде рівно через T кількість секунд. Таким чином, час, який пристрій здатен приймати вхідні повідомлення розраховується за формулою:

де, T – час прослуховування вхідних повідомлень;
 $beaconReserved$ – час відправки широкомовного повідомлення;
 N – номер комірки.

Згідно зі специфікацією LoRaWAN [21] й вищенаведеними моделями були розроблені алгоритми відправки та обміну повідомленнями. Розроблений алгоритм наведений у додатку Г. Задля зменшення об'єму пам'яті, який використовується для обміну повідомлення, було прийнято рішення використати серіалізацію на основі MessagePack. Хоча згідно з [20], серіалізація за технологією ProtoBuff надає кращі показники використання пам'яті, ProtoBuff є значно менш оптимальним за показниками енергоефективності.

Висновок до розділу 2

У рамках даного розділу були розглянуті різні моделі побудови мережі й способів резервного збереження даних. На основі виконаних досліджень були створені базові алгоритми, за якими передбачується побудувати систему. У якості архітектури мережі було прийнято рішення використати архітектуру типу дерево. Дана архітектура задовольняє поставлені вимоги щодо енергоефективності та розширюваності мережі й може бути реалізована відповідно ієрархії класів, наведених у специфікації протоколу LoRaWAN. Аналіз механізму резервного збереження даних продемонстрував, що в залежності від ряду вхідних параметрів (стандарту серіалізації, періодичності вимірів, часу походу) задля збереження даних може потребуватись сховище об'ємом від 128 кбайт до 2 Мбайт. У якості механізму серіалізації як для алгоритму збереження даних, так і для алгоритму відправки повідомлень LoRaWAN мережею було прийнято рішення використати MessagePack. Даний стандарт демонструє найбільш оптимальне відношення результуючого об'єму і енергоефективності алгоритмів серіалізації та десеріалізації.

3 ТЕХНІЧНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТУРИСТИЧНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ LORAWAN

У даному розділі розглядається питання технічно-апаратного оснащення туристичної сенсорної мережі. Було проведено порівняння та пошук емпіричних даних щодо використання мікроконтролерів як основи для побудови сенсорних пристроїв. Досліджується питання вибору та підключення LoRa-модулю разом з іншими сенсорними пристроями.

3.1 Вибір сенсорних пристроїв

У першому розділі даної роботи був виконаний огляд показників сенсорів, які задовільняють мінімальні потреби сенсорної туристичної мережі. Серед них було визначено:

- температуру;
- висоту;
- місцеположення.

Відповідно до наведених показників, був виконаний огляд сенсорів, які могли б задовільнити поставлені вимоги.

3.1.1 Барометр

Вимір висоти може бути реалізований на основі різних комбінацій сенсорних пристроїв. Найбільш розповсюджений спосіб – це використання різниці тисків на висоті. Відношення тиску від висоти може бути виражено формулою:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right), \quad (3.1)$$

де p – тиск на певній точці;

p_0 – тиск на рівні моря;

M – молярна маса повітря, рівна 0,029 кг/моль;

g – прискорення вільного падіння, рівне 9,81 м/с²;

h – висота точки над рівнем моря;

R – універсальна газова константа, рівна 8,31 Дж/моль · К;

T – абсолютна температура повітря, виражена у Кельвінах.

Тоді, висота може бути виражена як:

$$h = \frac{RT}{Mg} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \quad (3.2)$$

У зв'язку з тим, що отримати актуальний місцевий тиск на рівні моря є неможливим, у якості тиску на рівні моря була використана константа. Це може створити додаткову похибку, але у даному випадку нею можна знехтувати. Таким чином, для коректного визначення висоти необхідно мати такі показники:

- поточний рівень тиску;
- температура повітря.

Серед інших аналогічних пристроїв було прийнято рішення використати BME 280 [22]. На рис. 3.1 наведено наявні входи та виходи даного контролера.

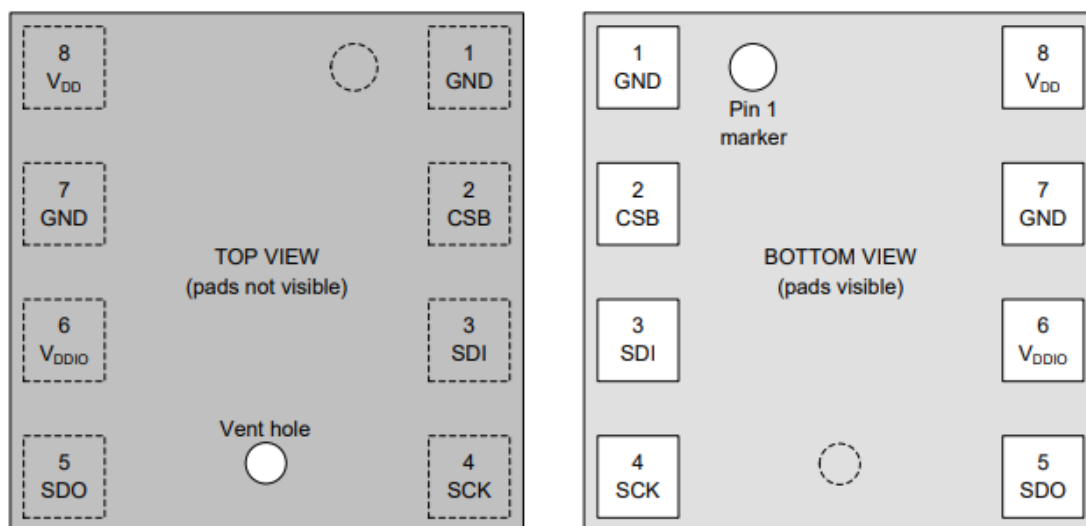


Рисунок 3.1 – Вигляд зверху та знизу на сенсор BME 280

BME 280 підтримує підключення за стандартами I2C та SPI. Згідно зі специфікацією, споживаний струм під час вимірювання тиску складає

714 мкА. У режимі сну від 0,1 мкА до 0,5 мкА. Також надає змогу вимірювати показники вологості та температури повітря. Використання даного датчику задовольнить потреби й розрахування висоти та надасть змогу записувати дані щодо поточної температури оточення. Окрім цього, він має низько показники вживання енергії.

3.1.2 GPS-трекер

Проблема визначення місцеположення клієнтського пристрою може бути вирішена програмним або апаратним способом. Так у дослідженні [23] наводиться дослідження алгоритму позиціонування на основі пройдених клієнтом точок доступу. Серед інших відомих алгоритмів існують:

- алгоритми засновані на триангуляції місцевості;
- алгоритми засновані на аналізі сили сигналу;
- алгоритми засновані на аналізі часу, який проходить сигнал.

Точність використання даних алгоритмів залежить від кількості точок доступу, з якими взаємодіє клієнт. У зв'язку зі специфікою оточення та низькою якістю зв'язку на території туристичних маршрутів, задля визначення позиції користувача було прийнято рішення використати GPS-модуль. У якості GPS-модулю було прийнято рішення використати Neo-6M. На рис. 3.2 наведено графічну схему взаємодії компонентів даного модулю.

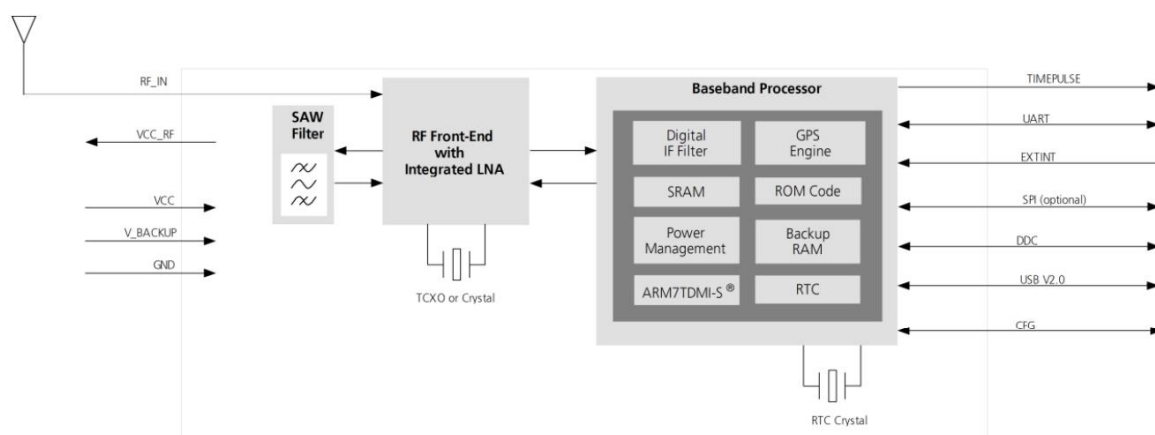


Рисунок 3.2 – Схема взаємодії компонентів Neo-6M

Згідно з технічною документацією, найбільші показники вживаної енергії складають 67 мА, але зазвичай у режимі відслідковування місцеположення споживання не перевищує 40 мА. У режимі низького споживання енергії, при тактовій частоті 1 Гц, значення зменшується до 12 мА. Neo-6М підтримує обмін даними технологіями UART, SPI, I2C, але часто виробники надають лише входи для UART інтерфейсу. Додатково даний модуль містить власний акумулятор й EEPROM модуль пам'яті, у який можна помістити налаштування модулю. Задля зміни конфігурації та перевірки вимірюваних даних виробник модулю UBoot надає власне програмне забезпечення. На рис. 3.3 наведено інтерфейс застосунку u-center. Даний програмний застосунок містить ряд віджетів, які користувач може корегувати на власний розсуд. За допомогою них користувач може переглянути дані вимірюні GPS-модулем.

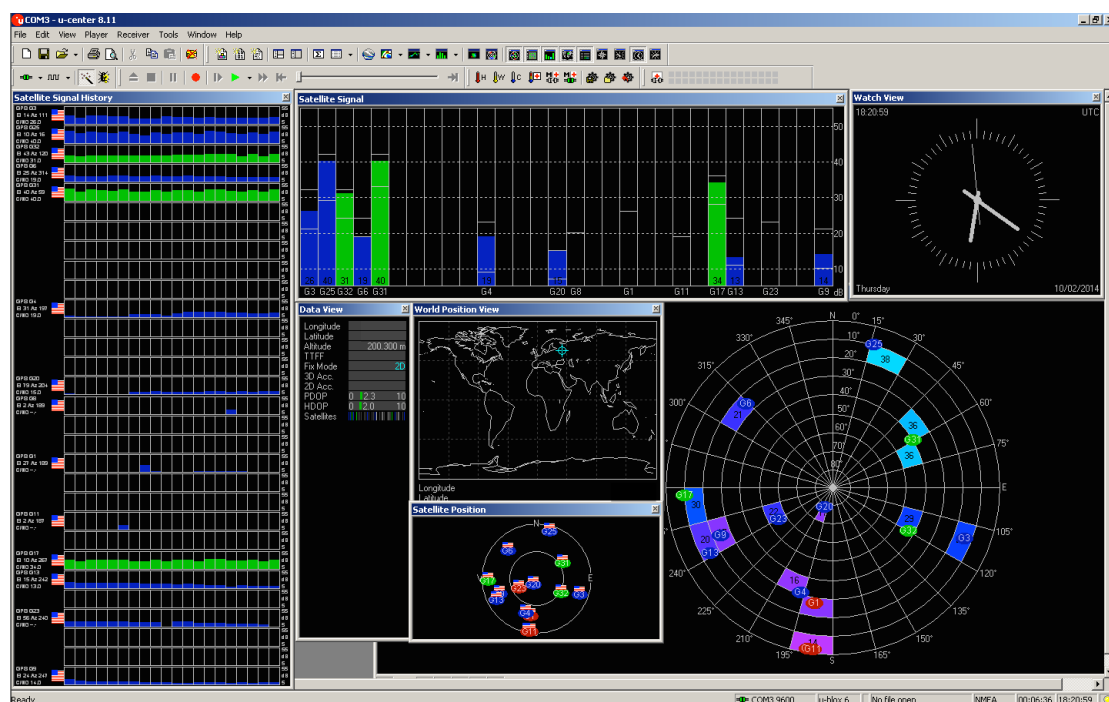


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програми

3.1.3 Модуль пам'яті

Задля розширення об'єму сховища апаратної платформи та надання додаткового сховища було прийнято рішення використати модуль SD-карти. Використання SD-карти у якості сховища надає такі переваги:

- можливість заміни сховища даних;
- легкість перенесення даних на інші пристрої.

Згідно з експериментом [24], кількість споживаної енергії залежить від активності користування та самої платформи, яка виконує запис. Згідно з даними експериментатора, споживання енергії варіюється у межах від 25 мА до 300 мА. У якості моделі модулю підключення SD-карти було запропоновано [25]. Обраний модуль дозволяє використовувати Micro SD-карти об'ємом 2 Гбайт або Micro-SDHC об'ємом до 32 Гбайт. Такий об'єм даних задовольняє потреби пам'яті, які були розраховані у розділі 2.

3.2 Вибір апаратної платформи

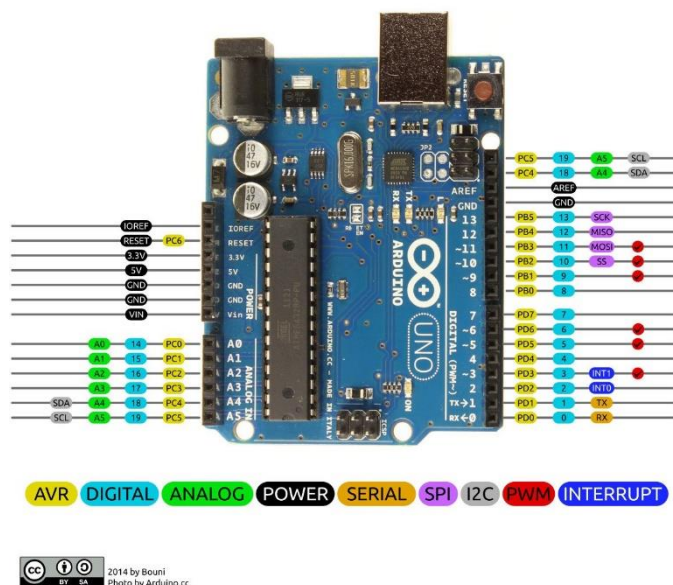
Був виконаний огляд апаратних рішень, на основі яких можуть бути побудовані портативні сенсорні пристрої. Виробники надають ряд готових рішень, які мають вбудований LoRa-модуль об'єднаний з мікроконтролером, але часто такі плати містять ряд додаткових надлишкових функцій. Дана особливість може привести до додаткових витрат енергії та апаратної потужності, що у контексті розробки енергоефективного пристрою є критичним. Тому серед альтернатив розглядались переважно рішення, які не мають LoRa-модулю, але підтримують його підключення. У результаті пошуків були виокремлені такі рішення:

- Arduino UNO;
- Arduino Nano;
- Arduino Pro Mini.

3.2.1 Arduino UNO

Arduino Uno представляє собою рішення засноване на мікроконтролері ATmega328P. На даний момент існує 3 ревізії даної плати. На рис. 3.4 наведене схематичне зображення Arduino UNO третьої ревізії.

Arduino Uno R3 Pinout



3.2.2 Arduino Nano

Даний мікроконтролер є функціональним аналогом Arduino UNO. На рис. 3.5. наведено схематичне зображення плати.

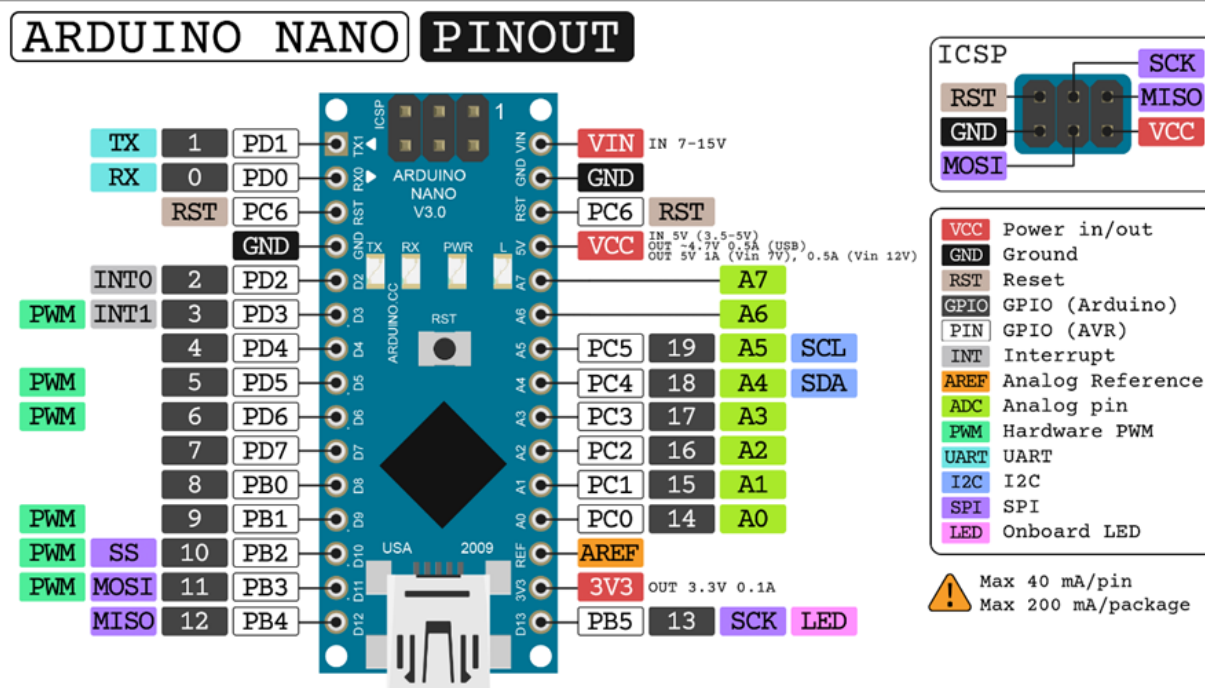


Рисунок 3.5 – Схема контактів Arduino Nano

Залежно від ревізії Arduino Nano може бути реалізований на базі ATmega328 (третя ревізія) або ATmega168 (друга ревізія). Розглядалися технічні характеристики Arduino Nano третьої ревізії, на базі ATmega328:

- напруга живлення: рекомендована 7-12 В, гранична 6-20 В;
- споживання: 19 мА;
- FLASH пам'ять: 32 кбайт;
- SRAM пам'ять: 2 кбайт;
- EEPROM: 1 кбайт;
- тактова частота: 16 МГц;
- габарити: 45 × 18 мм;
- 14 цифрових входів/виходів та 8 аналогових.

3.2.3 Arduino Pro Mini

Arduino Pro Mini була розроблена компанією Sparkfun у співпраці з Arduino. Було розроблено дві версії мікроконтролера: на базі ATmega168 та ATmega328 Графічне представлення контактів плати наведено на рис. 3.6.

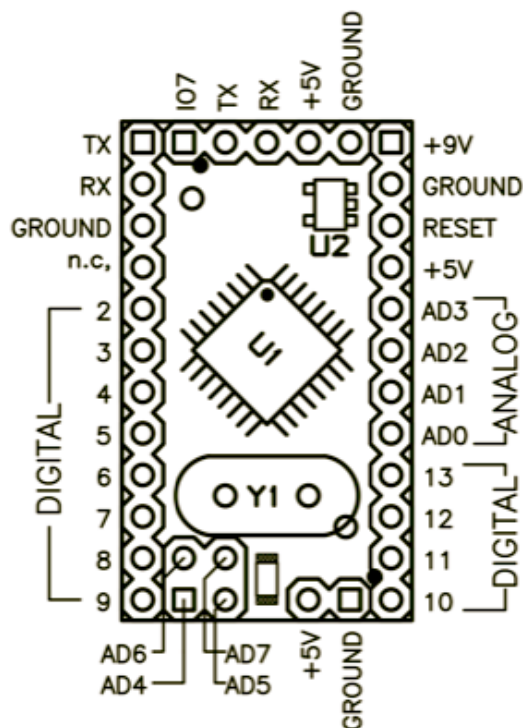


Рисунок 3.6 – Схематичне представлення мікроконтролера Arduino Pro Mini

328

У рамках досліджень були розглянуті технічні характеристики версії на основі ATmega328:

- напруга живлення: рекомендована 7-12 В;
- споживання: 10-20 мА;
- FLASH пам'ять: 32 кбайт;
- SRAM пам'ять: 1 кбайт;
- EEPROM: 512 байт;
- тактова частота: 16 МГц;
- габарити: 33 × 18 мм;
- 14 цифрових входів/виходів та 8 аналогових.

Для живлення даного мікроконтролера можна використати UBS-UART перетворювач, під'єднавши його до відповідних контактів, або надати напругу на контакт RAW. Якщо напруга стабілізована до значення 5 В, або 3,3 В, то можуть бути використані відповідні контакти. Використання VCC контактів надають змогу зменшити споживання мікроконтролера.

3.2.4 Висновок

У результаті аналізу наявних мікроконтролерів, на базі яких може бути побудована система сенсорного пристрою, була створена порівняльна характеристика. Зведені дані наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика мікроконтролерів

Назва	Arduino UNO	Arduino Nano	Arduino Pro Mini 328
центральний мікроконтролер	ATmega328	ATmega328	ATmega328
рекомендована напруга живлення, В	7-12	7-12	7-12
споживання, мА	45	19	10 – 20
габарити, мм	68 × 53	45 × 18	33 × 18

Згідно з порівняльною характеристикою мікроконтролерів, було прийнято рішення використати мікроконтролер Arduino Pro Mini 328 [26]. Хоча кожне з обраних рішень використовують однаковий центральний мікроконтролер, Arduino Pro Mini 328 надає найнижчі показники споживання енергії. Такі показники досягаються за рахунок зменшення додаткових функцій (відсутність світлодіодів на платі, перетворювача UBS-UART, тощо).

3.3.2 HopeRF RFM95

Згідно з виконаним аналізом відкритих джерел інформації, LoRa-модуль RFM95 [28] активно використовується під час розробки проєктів заснованих на передачі даних LoRa сигналом. Згідно зі специфікацією виробника, модуль має такі технічні характеристики:

- напруга живлення: 3,3В;
- споживання: залежно від режиму роботи. В режимі відправки до 120 мА, у режимі сну менше 1 мкА;
- потужність антени: до 20 дБм;
- чутливість прийому: до -146 дБм;

На рис. 3.7 наведено графічну схему контактів доступних у модулі RFM95.

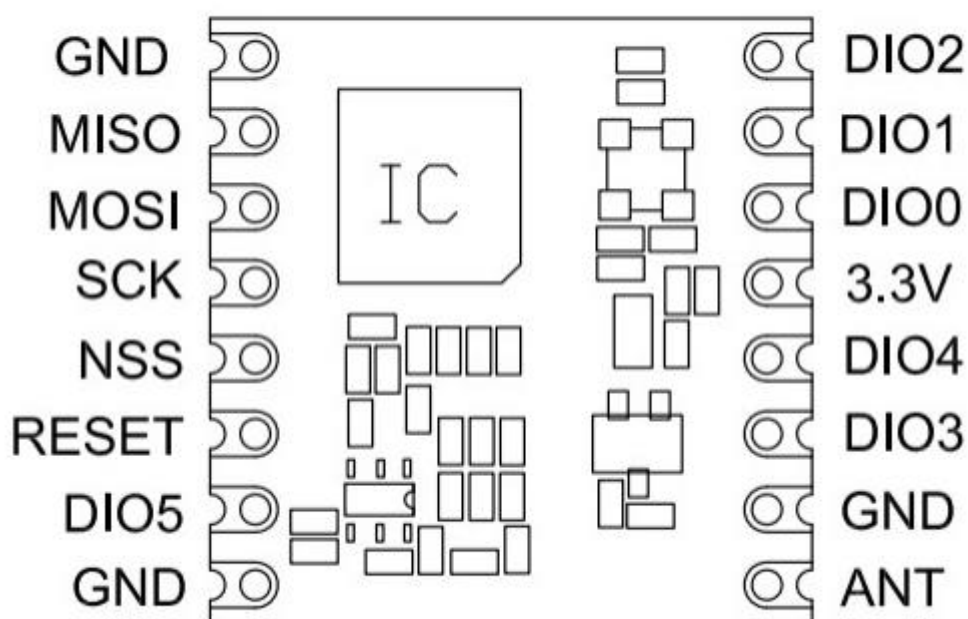


Рисунок 3.8 – Графічна схема взаємодії компонентів модулю RFM95

Для використання даного модулю до нього необхідно підключити антену до контакту ANT. Інтеграція модулю з іншими мікроконтролерами може бути реалізована на основі інтерфейсу SPI.

3.3.3 Висновки до аналізу LoRa-модулів

Відповідно до аналізу технічних специфікацій вищенаведених LoRa-модулів була створена порівняльна характеристика наведена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика LoRa-модулів

Назва	Microchip RN2483	HopeRF RFM95
Максимальне споживання, мА	30 мА	120 мА
Потужність антени, дБм	14 дБм	20 дБм
Чутливість приймача, дБм	-148 дБм	-146 дБм
Підтримка LoRaWAN	Так	Лише програмна реалізація
Зовнішні інтерфейси	UART	SPI

Згідно з аналізом технічної специфікації, використання модулю Microchip RN2483 є більш доцільним. Незважаючи на це, під час пошуку наявних LoRa-модулів й аналізі ціни обраних альтернатив, було прийнято рішення про використання модулю HopeRF RFM95. У зв'язку з тим, що даний модуль не підтримує апаратно протокол LoRaWAN, його реалізація повинна бути виконана програмно.

3.4 Вибір LoRa-шлюзу

Був проведений аналіз рішень шлюзів, які підтримують LoRaWAN протокол. Згідно з існуючими рішеннями, найбільшого розповсюдження мають такі виробники:

- Kerlink;
- Mutlitech;
- The Things Industries.

Окрім цього, пристрій, який буде виконувати роль шлюзу може бути реалізований з використанням інструментів RaspberryPi. У рамках даного дослідження було прийнято рішення обрати готове рішення, оскільки розробка й налаштування LoRa-шлюзу не було ціллю даної роботи. Серед інших можливих аналогів було обрано рішення компанії Multitech [29] Conduit IP67 200 Series. На рис. 3.9 наведено вигляд обраного шлюзу.



Рисунок 3.9 – Multitech Conduit IP67 200 Series

Даний шлюз був розроблений з ціллю можливості встановлення ззовні. Температура функціонування пристрою складає від -40°C до 70°C . Налаштування шлюзу може бути виконане шляхом використання програмного застосунку DeviceHQ від компанії Multitech. Для підключення до глобальної мережі доступні стандарти Ethernet та Wi-Fi й можливість використання стільникової мережі. Підтримує спілкування протоколами HTTP, MQTT та CoAP. Корпус пристрою надає захист відповідно стандарту IP67. Згідно зі специфікацією параметрів LoRa-модулю, даний шлюз здатен генерувати сигнал з потужністю від 14 дБм до 27 дБм й приймати з чутливістю від $-124,8$ дБм до $-138,9$ дБм. Схема комунікації пристрою, надана виробником, наведена на рис. 3.10.

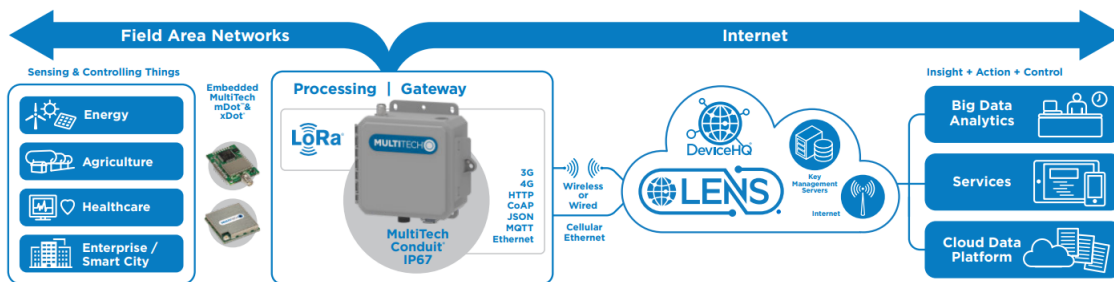


Рисунок 3.10 – Принципи комунікації шлюзу Multitech Conduit IP67 200 Series

Висновок до розділу 3

У рамках даного розділу був виконаний огляд доступних технічних засобів, на основі яких буде побудована туристична сенсорна мережа на базі протоколу LoRaWAN. Були проаналізовані показники, які необхідні туристам для аналізу їх маршруту та моніторингу стану групи. Відповідно до результатів у якості сенсорів були обрані:

- барометр BME 280;
- GPS-трекер Neo-6M.

У якості додаткового сховища даних було прийнято рішення використати SD-карту. Використання SD-карти надає змогу швидко змінити носій інформації й легко переносити дані з одного пристрою на інший. Окрім цього, використання SD-карти задовольняє мінімально необхідний об'єм пам'яті навіть походів високої категорії складності. При виборі апаратної платформи серед інших аналогів був обраний мікроконтролер Arduino Pro Mini на базі ATmega328. Обраний мікроконтролер має найменші показники споживання енергії і найменший розмір. У якості модулю комунікації LoRa був обраний HopeRF RFM95 у зв'язку з його низькою ціною та доступністю. Був виконаний аналіз наявних рішень шлюзів з підтримкою LoRaWAN протоколу. У результаті аналізу було обране рішення Multitech Conduit IP67 200 Series, оскільки дане рішення є досить компактним й може бути встановлене й використане в складних умовах.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

У даному розділі розглядається реалізація розроблених у попередніх розділах алгоритмів та апаратної взаємодії між компонентами сенсорного пристрою.

4.1 Моделювання схеми

Моделювання схеми було виконане з використанням застосунку Fritzing. Даний програмний застосунок є програмою, яка поширюється з відкритим кодом. Fritzing має багату елементну базу й поєднує у собі функції розробки схеми підключення за монтажною платою, у вигляді електронної схеми та розробки монтажної плати пристрою.

4.1.1 Моделювання схеми

Відповідно до обраних у третьому розділі елементів, була розроблена схема підключення елементів. Результати моделювання наведені на рис. 4.1.

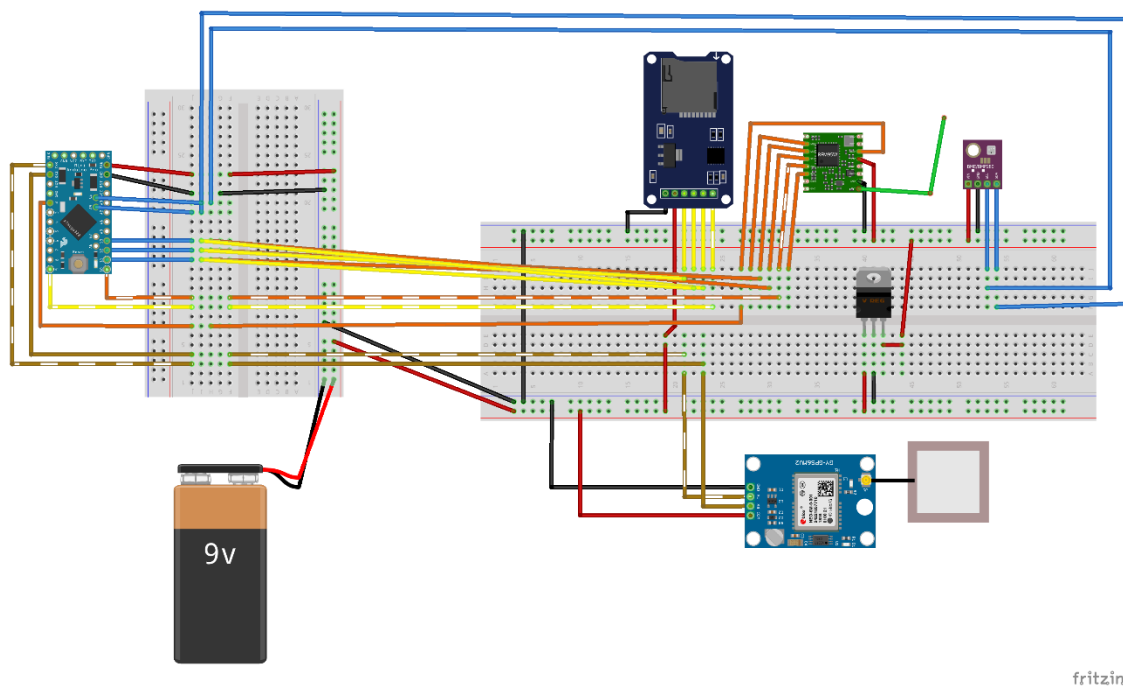


Рисунок 4.1 – Схема підключення компонентів пристрою

До елементної бази компонентів був доданий стабілізатор напруги, оскільки ряд компонентів для штатної роботи потребують стабілізованої напруги рівної 3,3 В. У табл. 4.1 наведено список контактів, задіяних мікроконтролером Arduino Pro Mini

Таблиця 4.1 – Список контактів використаних у Arduino Pro Mini

Назва контакту	Підключений до
RAW	Джерело енергії
A5(SCL)	BPME280-SCL
A4(SDA)	BME280-SDA
RXI	Neo-6M-TX
TX0	Neo-6M-RX
6	SD-модуль-CS
10(SS)	RFM95-NSS
11(MOSI)	SD-модуль-MOSI та RFM95-MOSI
12(MISO)	SD-модуль-MISO та RFM95-MOSI
13(SCK)	SD-модуль-SCK та RFM95-SCK
2	RFM95-DIO0

У якості джерела енергії на схемі була використана батарея. Вхідна напруга була підключена до контакту RAW, оскільки мікроконтролер Arduino Pro Mini має власний стабілізатор напруги. У якості інтерфейсу спілкування для сенсору барометра був використаний інтерфейс SPI. Модулі LoRa передавача та SD-картки були підключені за допомогою інтерфейсу SPI. Згідно специфікації даного інтерфейсу, визначення конкретного пристрою, до якого звертається мікроконтролер виконується за допомогою контакту CS. Таким чином, модуль SD-карти був підключений до контакту 6, а модуль передавача LoRa до стандартного контакту 10. Необхідно зазначити, що ряд

бібліотек не мають можливості визначення CS контакту програмно й використовують стандартний контакт. Дана особливість може привести до непередбачуваних помилок та конфлікту модулів під час використання пристрою. Контакти GPS-модулю були під'єднані до мікроконтролера за стандартом UART, тобто контакт TX GPS-модулю з'єднаний з RX мікроконтролера й навпаки. За допомогою вбудованих можливостей програмного застосунку Fritzing, на основі моделі підключених елементів, були створені електрична схема та модель макетної плати. Результати побудови схем наведено на рис. 4.2 та рис. 4.3 відповідно.

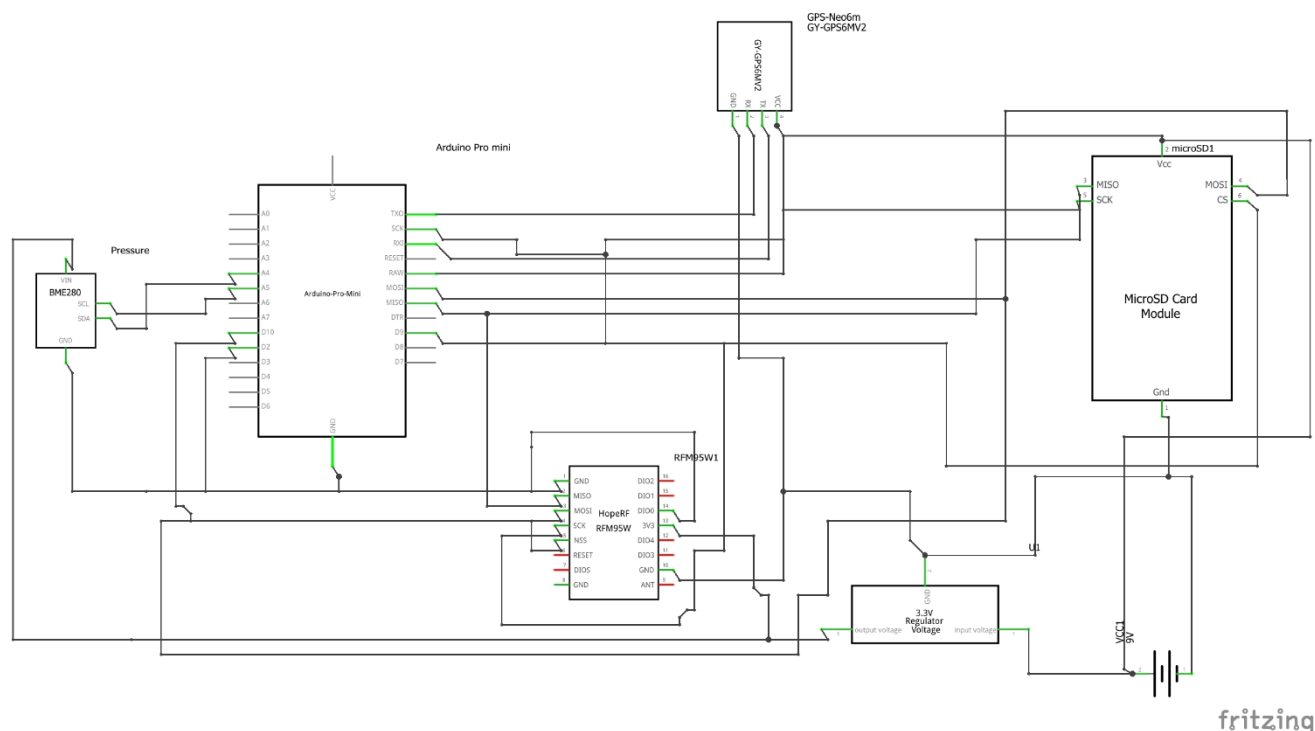


Рисунок 4.2 – Електрична схема пристрою

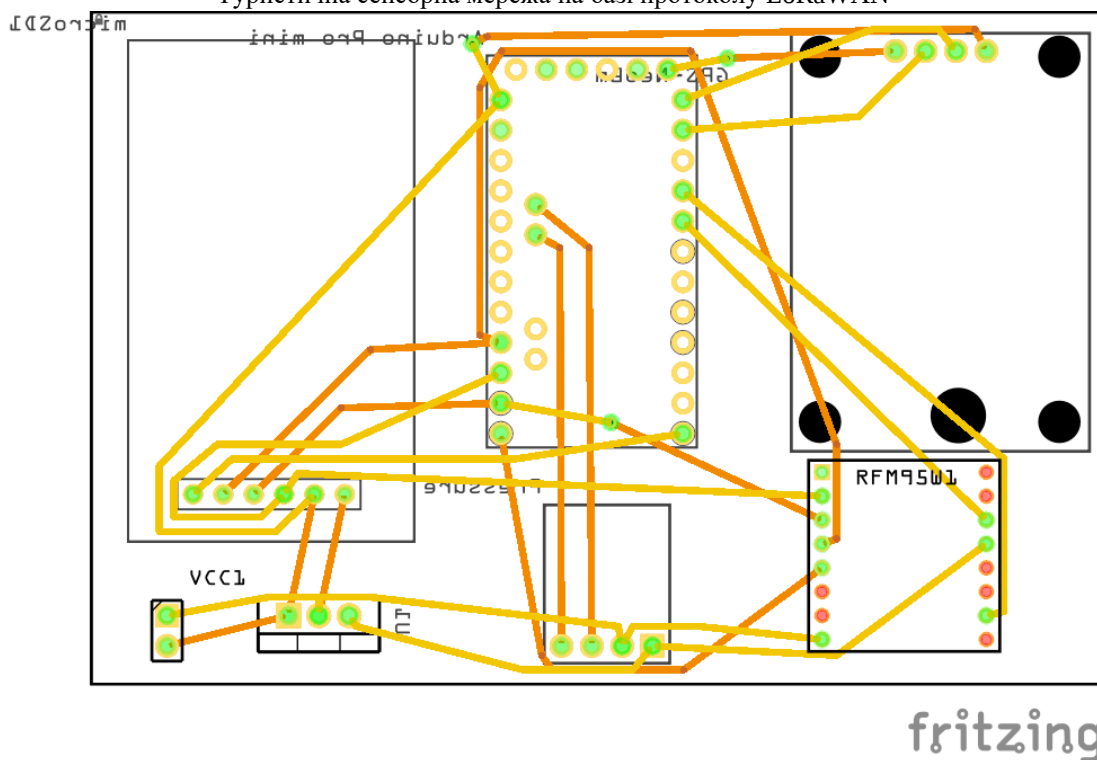


Рисунок 4.3 – Схема макетної плати

4.1.2 Розрахунок АКБ

За результатами моделювання пристрою були виконані розрахунки наближеного значення використання енергії. Згідно з технічною специфікацією використаних пристроїв, споживання кожного окремо складає:

- Arduino Pro Mini: 10-20 мА;
- сенсор BME280: 720 мкА, або 0,72 мА;
- GPS-модуль Neo-6M: 70 мА;
- Модуль SD-карти: 200 мА;
- HopeRF RFM95: 120 мА.

У результаті розрахунків, сумарна енергія споживання даної системи складає:

$$S = 20 + 0,72 + 70 + 200 + 120 = 410,72(\text{мА})$$

Таким чином, у випадку використання акумулятору ємністю 2000 мА, його заряду вистачить якнайменш на 4 години безперервної роботи у режимі

повної активності модулів, без використання режиму сну чи інших програмних оптимізацій.

4.2 Програмна реалізація

Оптимізація використання енергії виконується не лише вибором енергоефективних елементів, але й розробкою відповідного програмного забезпечення. У випадку використання режиму енергозбереження показники вживання енергії елементів значно зменшуються:

- Arduino Pro Mini: близька 100 мкА;
- сенсор BME280: менше 1 мкА;
- GPS-модуль Neo-6M: 70 мА;
- Модуль SD-карти: 200 мА;
- NoreRF RFM95: близько 1 мкА.

Була виконана програмна реалізація алгоритмів наведених у другому розділі даної роботи. У якості середовища розробки був використаний програмний застосунок Visual Studio Code з розширенням PlatformIO. На відміну від ArduinoIDE, дане середовище розробки надає змогу більш широко використовувати функції мови C++. Використання PlatformIO зобов'язує розробника використовувати певний шаблон проєкту. Приклад структури проєкту наведений на рис. 4.4.

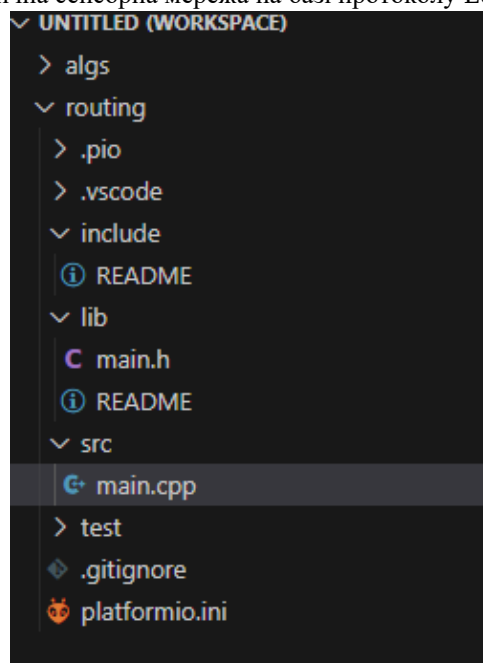


Рисунок 4.4 – Структура PlatformIO проєкту

Структура PlatformIO проєкту має схожий вигляд із іншими стандартними проєктами мовою C++:

- директорія `include` містить файли заголовків, які стосуються розроблюваного проєкту;
- директорія `src` містить файли вихідного коду;
- директорія `lib` містить внутрішні бібліотеки проєкту, які можуть бути додані самостійно розробниками.

Налаштування проєкту виконується за допомогою файлу `platformio.ini`, або графічного інтерфейсу. Синтаксис файлу конфігурації надає змогу встановлювати параметри залежно від розроблюваного оточення, або мікроконтролера. Це дозволяє розроблювати проєкт, який зможе працювати на декількох платформах.

4.2.2 Алгоритм відправки даних

Була створена програмна реалізація пристрою класу А, який здатний вимірювати та відправляти вимірянні дані мережею LoRaWAN. Як було відмічено у третьому розділі роботи, модуль RFM95 не реалізовує протокол

LoRaWAN на апаратному рівні, тому задля реалізації протоколу був виконаний аналіз наявних бібліотек. Згідно з виконаним аналізом, на даний момент існують такі рішення:

- MCCI LoRaWAN LMIC library [30];
- MCCI Arduino LoRaWAN Library [31].

Аналіз технічної документації бібліотек та наведених прикладів роботи продемонстрував, що обидві бібліотеки займають потребують великий простір FLASH-пам'яті й можуть мати проблеми з використанням на мало-потужних мікроконтролерах. Оскільки бібліотека MCCI Arduino LoRaWAN Library не може бути повністю скомпільована на базі мікроконтролера ATmega328, у якості реалізації LoRaWAN протоколу була використана бібліотека MCCI LoRaWAN LMIC library. Дана бібліотека надає реалізацію фреймворку LMIC (англ. LoRaWAN-MAC-in-C) розробленою IBM, яка може бути використана у проєктах сумісних з Arduino. На даний момент фреймворк продовжує розвиватись та використовуватись спільнотою розробників. Згідно з документацією, бібліотека підтримує стандарти LoRaWAN версій 1.0.2 та 1.0.3. Інтеграція даної бібліотеки з користувацькою реалізацією відбувається за допомогою функції onEvent: при виклику функції наступного циклу, програмний код бібліотеки викликає функцію onEvent, яка реалізована ззовні. Приклад функції onEvent наведений у додатку Г. Такий спосіб може привести до помилок, оскільки у випадку використання даної бібліотеки у складі складного проєкту, існує вірогідність виклику функцію onEvent іншої зовнішньої бібліотеки. Для запобігання появи даної проблеми, відповідний параметр налаштування бібліотеки має бути використаний, а перехоплювач подій визначений явно розробником програми. Для налаштувань параметрів та умов використання бібліотеки використовуються макроси. Задля відправки даних мережею LoRaWAN у бібліотеці використовується асинхронна функція, яка викликається раз у певний проміжок часу. Приклад функції відправки даних наведений у додатку Д. У даній функції виконується отримання

актуальних даних зі встановлених сенсорів й виконується відправка даних. Згідно з документацією, при використанні даної бібліотеки не рекомендується використовувати буфер даних більший ніж 220 байт. Задля виміру показників з сенсору BME280, була використана бібліотека Adafruit_BME280 [32]. Дане рішення включає у собі ряд готових функції для роботи та підключення даного сенсору інтерфейсом I2C. Для визначення поточного рівня висоти була використана функція readAltitude, яка приймає параметр рівня моря.

```
/*!  
 * Calculates the altitude (in meters) from the specified atmospheric  
 * pressure (in hPa), and sea-level pressure (in hPa).  
 * @param seaLevel Sea-level pressure in hPa  
 * @returns the altitude value read from the device  
 */  
float Adafruit_BME280::readAltitude(float seaLevel) {  
    // Equation taken from BMP180 datasheet (page 16):  
    // http://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf  
  
    // Note that using the equation from wikipedia can give bad results  
    // at high altitude. See this thread for more information:  
    // http://forums.adafruit.com/viewtopic.php?f=22&t=58064  
  
    float atmospheric = readPressure() / 100.0F;  
    return 44330.0 * (1.0 - pow(atmospheric / seaLevel, 0.1903));  
}
```

Рисунок 4.5 – Функція визначення висоти

Реалізація функції заснована на рівнянні висоти за барометричною формулою й надає достовірні дані на висоті до 11 км. Окрім цього бібліотека Adafruit_BME280, надає ряд інших функцій, заснованих на рівняннях барометричної формули, можливість встановити похибку залежно від температури та вологості. Зчитування даних GPS-модулю було реалізоване за допомогою бібліотеки TinyGpsPlus [33]. Дана бібліотека працює на основі аналізу текстових даних, які були отримані інтерфейсом UART з підключеного GPS-модулю. Цифрові значення, отримані від GPS-модулю записуються у відповідні поля класу. На рис. 4.6 наведено список публічних полів, які визначені у класі даних.

```
TinyGPSLocation location;  
TinyGPSDate date;  
TinyGPSTime time;  
TinyGPSSpeed speed;  
TinyGPSCourse course;  
TinyGPSAltitude altitude;  
TinyGPSInteger satellites;  
TinyGPSHDOP hdop;
```

Рисунок 4.6 – Список публічних полів класу даних GPS-модулю

У результаті розробник бібліотеки надає зручний інтерфейс зчитування та оперування даними GPS-модулю. Дані, отримані з сенсорних пристроїв серіалізуються за стандартом MessagePack, після чого копіюються до буфера повідомлення LoRaWAN мережі. Виділення окремого буфера для потреб LoRaWAN мережі було виконано задля уникнення перевантаження мережі. Таким чином, функцією `memcpy` серіалізовані дані копіюються до масиву байт `payload`. Лістинг описаного процесу наведено на рис. 4.7.

```
packer.to_map("alt", altitude, "lat", latitude, "longit", longitude);  
Serial.write(packer.data(), packer.size());  
if (packer.size() > sizeof(payload))  
{  
    Serial.print("Cutting data");  
}  
memcpy(payload, packer.data(), sizeof(payload) - 1);  
// prepare upstream data transmission at the next possible time.  
// transmit on port 1 (the first parameter); you can use any value from  
// 0 to 223 (others are reserved).  
// don't request an ack (the last parameter, if not zero, requests an ack  
// from the network).  
// Remember, acks consume a lot of network resources; don't ask for an ack  
// unless you really need it.  
LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload) - 1, 0);
```

Рисунок 4.7 – Лістинг серіалізації та відправки даних

4.2.3 Алгоритм резервного збереження даних

Згідно зі створеним алгоритмом, у випадку повної втрати зв'язку з мережею, розроблюваний пристрій має записати виміряні дані до внутрішнього сховища даних. У якості реалізації сховища даних був використаний модуль SD-карти. Реалізація файлового сховища була створена

з використанням вбудованих бібліотек Arduino для роботи з SD-картою. Лістинг функції наведений у додатку Е. У якості вхідних параметрів функція приймає вказівник на масив символів та його розмір. Таким чином, передбачається, що дану функцію буде легко використати з бібліотекою серіалізації стандартом MessagePack. У функцію був доданий лічильник, який обмежує кількість записів у одному файлі до п'ятдесяти. Зміна назви файлу відбувається динамічно й розраховується за останнім символом попереднього файлу.

Висновок до розділу 4

У рамках даного розділу було розроблена модель схеми об'єднаних елементів, та реалізований програмний застосунок, згідно з яким працює сенсорний пристрій. У результаті моделювання схеми підключення пристроїв була отримана схема макетної плати, яка у подальшому може бути використана для вироблення фізичного прототипу пристрою. Елементна база пристрою дала змогу розрахувати приблизний час роботи пристрою від одного заряду батареї ємністю 2000 мА, який склав 4 години. Була розроблена програмна реалізація алгоритмів роботи сенсорного пристрою. Задля реалізації протоколу LoRaWAN була використана бібліотека MCCI LoRaWAN LMIC library, яка адаптує фреймворк LMIC для використання з Arduino. Підключення інших компонентів систем також було виконано на основі зовнішніх бібліотек:

- барометр BME280 на основі Adafruit_BME280;
- GPS-модуль Neo-6m на основі TinyGpsPlus;
- модуль SD-карти на основі стандартної бібліотеки Arduino SD.

За результатами розробки програмної реалізації, було виявлено, що вбудованої Flash пам'яті розміром 32кбайт не вистачає для повного використання можливостей усіх вищеназваних бібліотек. З ціллю оптимізації

використання об'єму пам'яті ряд функцій бібліотеки MCCI LoRaWAN LMIC library була відключені.

ВИСНОВКИ

У рамках даної роботи було виконане дослідження питання розробки туристичної сенсорної мережі на базі протоколу LoRaWAN. Метою дослідження було визначено розробку проєкту апаратно-програмного комплексу вимірювальних пристроїв, які здатні обмінюватись даними в умовах віддаленості від постійного джерела енергії та стабільної мережі.

Першим кроком був виконаний огляд специфіки та особливостей умов у яких проходять туристичні походи. Згідно з дослідженням, найбільш вагомим питання при розробці туристичного пристрою – енергоефективність, незалежність від зв'язку та забезпечення високої мобільності. Був виконаний порівняльний огляд поширених засобів бездротової передачі даних, згідно з яким LoRa та протокол LoRaWAN є найбільш оптимальними рішеннями. Аналіз існуючих патентних та аналогічних рішень продемонстрував, що технологія LoRa не є широко розповсюдженою, але використовується для вирішення конкретних завдань: забезпечення енергоефективної мережі сенсорних пристроїв.

Згідно з виконаним аналізом літературних джерел інформації, були розроблені математичні моделі та алгоритми роботи пристроїв мережі. Розрахунки продемонстрували, що при використанні стандарту MessagePack й виміру даних кожні 5 хвилин, буде достатньо сховища об'ємом 512 кбайт.

Відповідно до розроблених математичних моделей та аналізу існуючих аналогів був виконаний огляд альтернативних апаратних компонентів, які можуть бути використані для побудови сенсорного пристрою з LoRa-модулем. У результаті огляду, у якості апаратної платформи був обраний Arduino Pro Mini(ATmega328) та LoRa-модуль RFM95. У зв'язку з тим, що даний модуль не підтримує LoRaWAN апаратно, реалізація специфікації протоколу була виконана програмно.

В останньому розділі роботи наводяться відомості щодо програмної реалізації алгоритмів роботи та створення схеми підключення компонентів. За результатами програмної реалізації було виявлено, що обрана множина бібліотек не може бути повністю використана на обраній платформі ATmega328, у зв'язку з обмеженнями пам'яті у 32 кбайт. Для вирішення даної проблеми була виконана оптимізація коду, а можливості бібліотеки MCCI LoRaWAN LMIC library були значно обмежені. Як результат виконання кваліфікаційної роботи, була отримана модель апаратного пристрою, здатного обмінюватись повідомленнями шляхом відправки LoRa сигналу відповідно специфікацій протоколу LoRaWAN.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Туристична карта Карпат з маршрутами та цікавими місцями. URL: <https://karpaty.rocks/map?keyword=%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B2#> (дата звернення: 08.02.2024).
2. 3G / 4G / 5G coverage - nPerf.com. URL: <https://www.nperf.com/en/map/UA/-/65222.Kyivstar-Mobile/signal/> (дата звернення: 08.02.2024).
3. MobUA.net - зведена карта покриття всіх 4G/3G операторів України, мобільний 4G та 3G інтернет | www.mobua.net. URL: <https://www.mobua.net/maps/?pos=48.564399,24.25606,12> (дата звернення: 08.02.2024).
4. Бланки туристської документації - ЦМКК Федерації спортивного туризму України. URL: <https://www.cmkk.com.ua/korisna-informacia/blanki-turistskoie-dokumentaciie.html> (дата звернення: 13.12.2023).
5. BLE протокол — IT Master - електроніка та програмування. URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/standarts/ble.html> (дата звернення: 08.02.2024).
6. LoRa та LoRaWAN: революція в під'єднанні до Інтернету речей - Jooby. URL: <https://jooby.eu/uk/blog/LoRa-ta-LoRaWAN-revolyuciya-v-pidyednanni-do-intetu/> (дата звернення: 12.12.2023).
7. Технологія LoRaWAN: опис, огляд трьох класів кінцевих пристроїв, швидкість передачі даних, безпека. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/66634.html> (дата звернення: 15.12.2023).
8. Огляд технології LoRaWAN. Мережа LoRaWAN що це? URL: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tekhnologii-LoRaWAN-ua/> (дата звернення: 12.12.2023).
9. Anastasiou A., Zinonos Z., Georgiades M. LoRa-Based Environmental Monitoring System for Commercial Farming. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. DOI: 10.1109/DCOSS-IOT58021.2023.00115. ISBN:

9798350346497.

https://www.researchgate.net/publication/374156130_LoRa-

[based_Environmental_Monitoring_System_for_Commercial_Farming](https://www.researchgate.net/publication/374156130_LoRa-based_Environmental_Monitoring_System_for_Commercial_Farming)

(дата

звернення: 14.01.2024).

10. Pasandi H. B., Haqiqat A., Moradbeikie A., Keshavarz A., Rostami H., Paiva S., Lopes S. I. Low-cost traffic sensing system based on LoRaWAN for urban areas. *EmergingWireless 2022 - Proceedings of the 1st International Workshop on Emerging Topics in Wireless, Part of CoNEXT*. 2022 DOI: 10.1145/3565474.3569069.

11. Saban M., Aghzout O., Medus L. D., Rosado A. Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN under Indoor and Outdoor Environments: Performance and Limitations. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54, № 4. Pages 159–164 DOI: 10.1016/J.IFACOL.2021.10.027.

12. Cuomo F., Catarinucci L., Klancar G., Nardello M., Barrios-Ulloa A., Ariza-Colpas P. P., Sánchez-Moreno H., Quintero-Linero A. P., La Hoz-Franco E. De, Co E. D. L. H. Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 5285.. DOI: 10.3390/S22145285.

13. Wearable electronic device and system for tracking location and identifying changes in salient indicators of patient health, пат. US11147459B2, Сполучені Штати Америки, опубл. 27.12.18.

14. Fire prevention and control system based on LoRa technologies, пат. CN106373318B, Китай, опубл. 27.10.16.

15. Ochoa M. N., Guizar A., Maman M., Duda A. Evaluating LoRa energy efficiency for adaptive networks: From star to mesh topologies. *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. 2017. Вип. 2017-October DOI: 10.1109/WIMOB.2017.8115793 ISBN: 9781538638392.

16. Adnan, Salam A. E. U., Arifin A., Rizal M. Forest Fire Detection using LoRa Wireless Mesh Topology. *Proceedings - 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology: Internet of Things for Industry, EIConCIT 2018*. 2018. Pages 184–187 DOI: 10.1109/EICONCIT.2018.8878488 ISBN: 9781538680483.
17. Griva A. I., Boursianis A. D., Wan S., Sarigiannidis P., Psannis K. E., Karagiannidis G., Goudos S. K. LoRa-Based IoT Network Assessment in Rural and Urban Scenarios. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 3 DOI: 10.3390/S23031695.
18. Zhang B., Srinivas V., Zhang Y., Dick R. P. LoRa Synchronized Energy-Efficient LPWAN. *IEEE International Conference on Communications*. 2023. Вип. 2023-May. Pages. 5383–5389 DOI: 10.1109/ICC45041.2023.10279767 ISBN: 9781538674628.
19. Yang N. Communication performance optimization of coal mine goaf LoRa AD hoc network sensor system based on tree topology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2625, № 1 DOI: 10.1088/1742-6596/2625/1/012059.
20. Kumar Biswal Obada Almallah A., Brambilla M. Analytical assessment of binary data serialization techniques in IoT context (evaluating protocol buffers, flat buffers, message pack, and BSON for sensor nodes). 2023.
21. LoRaWAN 1.0.3 specification. URL: <https://LoRa-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/LoRaWAN1.0.3.pdf> (дата звернення: 14.02.2024).
22. Барометр BME280 5В I2C (датчик температури, вологості, тиску) купити в Києві та Україні. URL: <https://arduino.ua/prod1930-bme280-5v-i2c-datchik-temperatyri-vlajnosti-davleniya> (дата звернення: 14.02.2024).
23. Coluccia A., Ricciato F., Ricci G. Positioning based on signals of opportunity. *IEEE Communications Letters*. 2014. Вип. 18, № 2. С. 356–359 DOI: 10.1109/LCOMM.2013.123013.132297.
24. Experiment: microSD Card Power Consumption & SPI Performance | Gough's Tech Zone. URL: <https://goughlui.com/2021/02/27/experiment-microsd-card-power-consumption-spi-performance/> (дата звернення: 14.02.2024).

25. Модуль microSD карти купити в Києві та Україні. URL: <https://arduino.ua/prod1601-modyl-micro-sdtf-card> (дата звернення: 14.02.2024).
26. Arduino Pro Mini 328 3.3В/8МГц від Sparkfun купити в Києві та Україні. URL: <https://arduino.ua/prod628-arduino-pro-mini-328-3-3v8mgc-vid-sparkfun> (дата звернення: 16.02.2024).
27. RN2483 | Microchip Technology. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/RN2483#> (дата звернення: 16.02.2024).
28. RFM95W - HOPERF - Reliable original manufacturer of IoT key components. URL: <https://www.hoperf.com/modules/LoRa/RFM95W.html> (дата звернення: 16.02.2024).
29. Conduit® IP67 200 Series Cellular Gateways. URL: <https://multitech.com/all-products/cellular/cellular-gateways/conduit-ip67-200-series/> (дата звернення: 16.02.2024).
30. GitHub - mcci-catena/arduino-lmic: LoRaWAN-MAC-in-C library, adapted to run under the Arduino environment. URL: <https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic> (дата звернення: 18.02.2024).
31. GitHub - mcci-catena/arduino-LoRaWAN: User-friendly library for using arduino-lmic with The Things Network and other LoRaWAN® networks. URL: <https://github.com/mcci-catena/arduino-LoRaWAN> (дата звернення: 18.02.2024).
32. GitHub - adafruit/Adafruit_BME280_Library: Arduino Library for BME280 sensors. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_BME280_Library (дата звернення: 18.02.2024).
33. GitHub - mikalhart/TinyGPSPlus: A new, customizable Arduino NMEA parsing library. URL: <https://github.com/mikalhart/TinyGPSPlus> (дата звернення: 18.02.2024).

ДОДАТОК А

ДОВІДКА

про перевірку на унікальність пояснювальної записки кваліфікаційної магістерської роботи

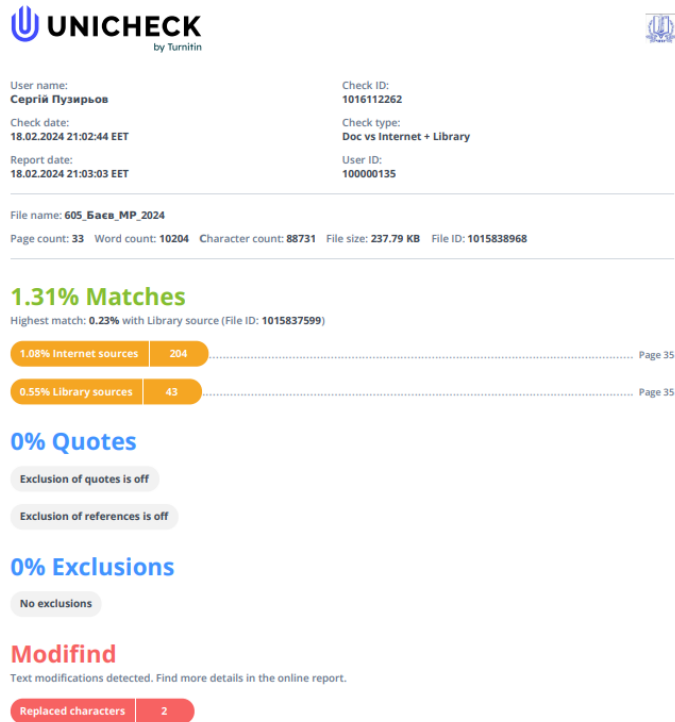
на тему: «Туристична сенсорна мережа на базі протоколу LoRaWAN»
студента спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», групи 605м

Баєва Віктора Олексійовича

прізвище, ім'я, по-батькові

Перевірку тексту здійснено сервісом: онлайн-сервіс Unicheck

Результат перевірки тексту кваліфікаційної роботи: схожість складає 1,31 %.



Студент:

Керівник:

доцент, канд. фіз.-мат.
наук

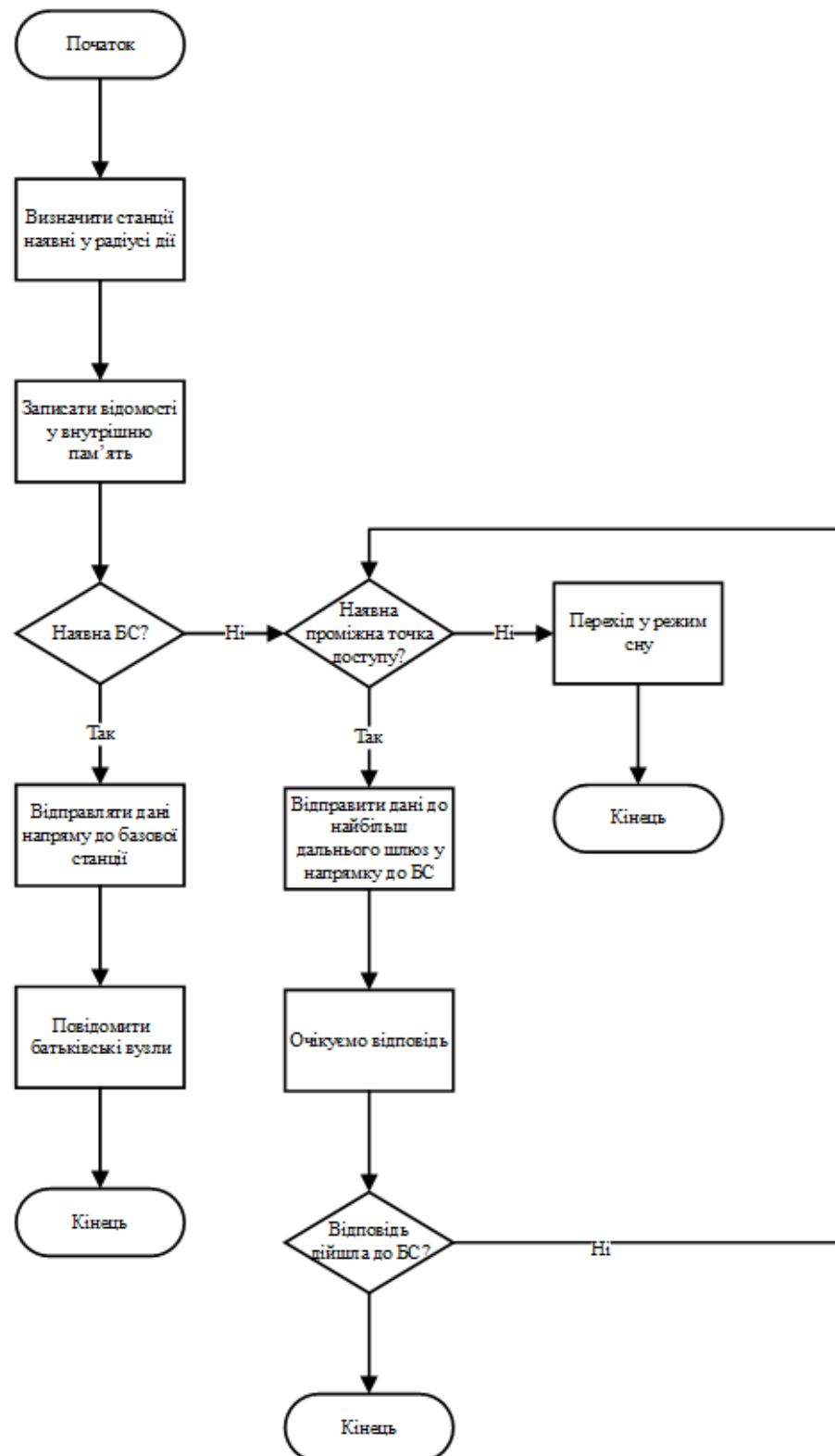
В. О. Баєв
підпис ініціали, прізвище

С. В. Пузирьов
підпис ініціали, прізвище

Дата: «___» _____ 2024 р.

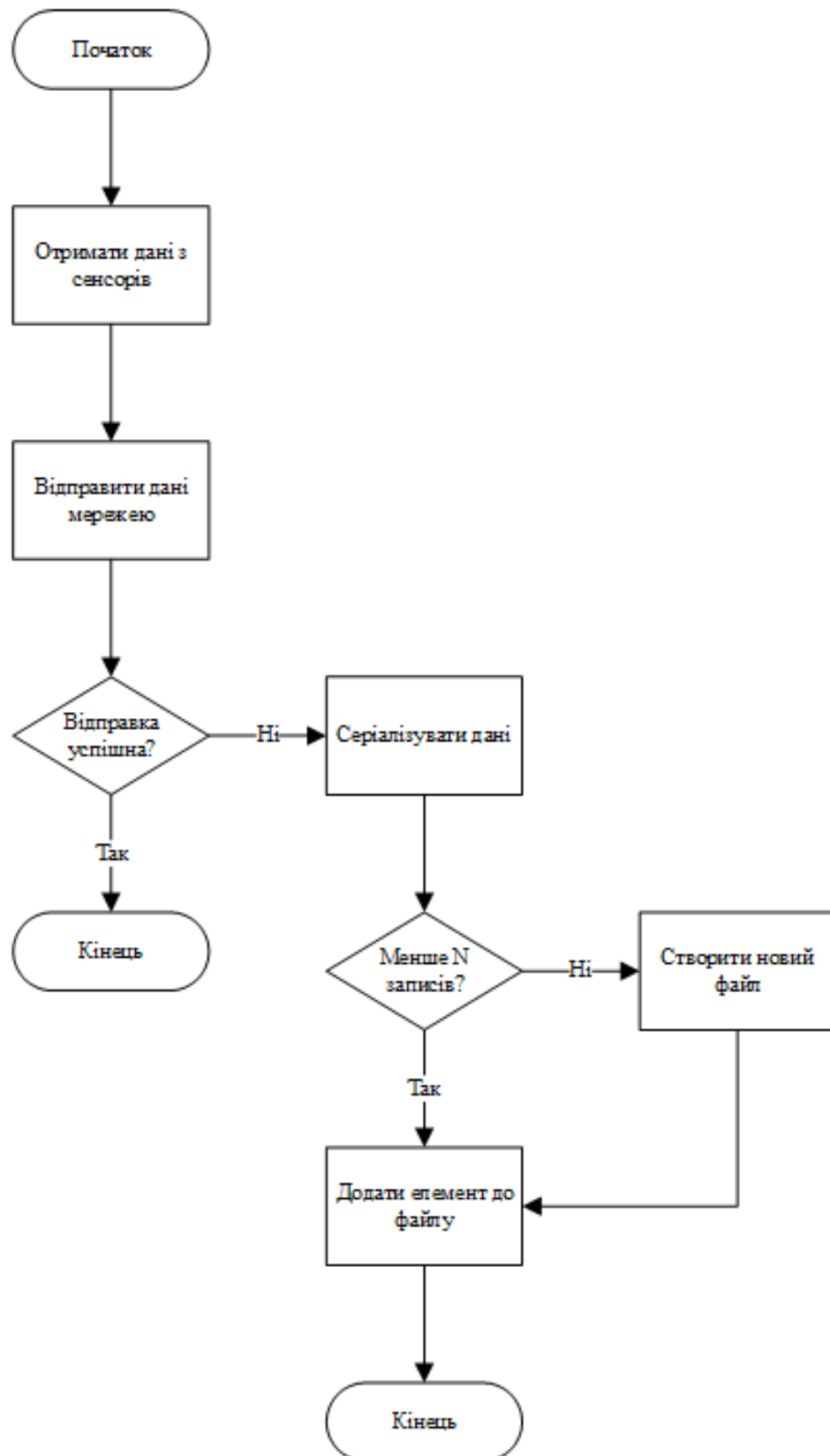
ДОДАТОК Б

Алгоритм побудови маршрутизації мережі



ДОДАТОК В

Алгоритм резервного збереження даних



ДОДАТОК Г

Алгоритм роботи пристрою класу А



ДОДАТОК Д

Лістинг функції реагування на подію

```
void onEvent(ev_t ev)
{
    Serial.print(os_getTime());
    Serial.print(": ");
    switch (ev)
    {
        case EV_JOIN_FAILED:
            Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
            break;
        case EV_REJOIN_FAILED:
            Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
            break;
        case EV_TXCOMPLETE:
            Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
            if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
                Serial.println(F("Received ack"));
            if (LMIC.dataLen)
            {
                Serial.println(F("Received "));
                Serial.println(LMIC.dataLen);
                Serial.println(F(" bytes of payload"));
            }
            os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime() + sec2osticks(TX_INTERVAL),
do_send);
            break;
        case EV_LOST_TSYNC:
            Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
            break;
        case EV_RXCOMPLETE:
            Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
            break;
        case EV_LINK_DEAD:
            Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
            break;
        case EV_LINK_ALIVE:
            Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
            break;
        case EV_TXSTART:
            Serial.println(F("EV_TXSTART"));
            break;
        case EV_TXCANCELED:
            Serial.println(F("EV_TXCANCELED"));
            break;
        case EV_JOIN_TXCOMPLETE:
            Serial.println(F("EV_JOIN_TXCOMPLETE: no JoinAccept"));
            break;
        default:
            Serial.print(F("Unknown event: "));
            Serial.println((unsigned)ev);
            break;
    }
}
```

ДОДАТОК Е

Лістинг функції відправки даних

```
void do_send(osjob_t *j)
{
    // Check if there is not a current TX/RX job running
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND)
    {
        Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
    }
    else
    {
        float altitude = bme.readAltitude(SEA_LEVEL_PRESSURE);
        float latitude = -1;
        float longitude = -1;
        if (gps.encode(gpsSerial.read()))
        {
            // If new data is parsed, retrieve latitude and longitude
            if (gps.location.isValid())
            {
                latitude = gps.location.lat();
                longitude = gps.location.lng();
            }
            else
            {
                Serial.println("Invalid GPS data!");
            }
        }
        MsgPack::Packer packer;
        packer.to_map("alt", altitude, "lat", latitude, "longit", longitude);
        Serial.write(packer.data(), packer.size());
        if (packer.size() > sizeof(payload))
        {
            Serial.print("Cutting data");
        }
        memcpy(payload, packer.data(), sizeof(payload) - 1);
        // prepare upstream data transmission at the next possible time.
        // don't request an ack (the last parameter, if not zero, requests an ack
        from the network).
        // acks consume a lot of network resources; don't ask for an ack unless you
        really need it.
        LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload) - 1, 0);
    }
}
```

ДОДАТОК Ж

Функція запису даних

```
void write(const uint8_t *data, size_t size)
{
    if (file_counter++ > 50)
    {
        uint8_t file_id = file_name[file_name.length() - 1] - '0';
        file_name[file_name.length() - 1] = String(++file_id)[0];
        dataFile = SD.open(file_name, O_WRITE);
    }
    else
    {
        dataFile = SD.open(file_name, O_APPEND);
    }
    if (!dataFile)
    {
        Serial.println("Error opening file for writing!");
    }
    dataFile.write(data, size);
    dataFile.write(",\n");
    dataFile.flush();
    dataFile.close();
}
```

ДОДАТОК 3

Публікація тез на конференції «Могилянські читання»

УДК 004.01

Бася В. О.,
магістрант,
Пузирьов С. В.,

канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії,
ЧНУ імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

ОРКЕСТРАЦІЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ СЕНСОРНОЇ ІОТ-МЕРЕЖІ НА БАЗІ BPNM

Одна з проблем під час розробки великої розподіленої програмної системи – документація можливостей проєкту та його мікросервісів. Окрім складності документування інтерфейсів складових частин програмної системи, виникає необхідність використання сервісів оркестрації. Оркестратор – це сервіс централізованого керування процесами мікросервісів. За допомогою оркестратора з'являється можливість автоматизувати створення, моніторинг та розгортання ресурсів у певному середовищі. Серед сервісів оркестрації найбільше поширення на даний момент мають:

- Kubernetes;

Могілянські читання–2023: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти.

- Docker Swarm;
- Rancher.

Обидві вищенаведені проблеми можуть бути вирішені шляхом використання системи нотації бізнес-процесів стандарту BPMN 2.0 у комбінації з сервісом-оркестратором, який вміє виконувати сценарії за наданими схемами. BPMN 2.0 – стандарт опису бізнес-процесів, яка була створена у 2011 році групою компаній OMG. Головна мета даного стандарту – надати можливість описувати процеси компаній мовою, яка могла б лаконічно й всебічно надати інформацію усім учасникам процесу (як розробникам, так і людям без технічного знання системи). Ціллю опису процесів компанії за даним стандартом можуть бути:

- опис. Така схема демонструє успішний шлях виконання бізнес-процесу. Тут застосовуються найпростіші елементи нотації, а сама діаграма навмисно максимально спрощується;
- аналіз процесу. Демонструє усі можливі варіанти виконання бізнес-процесу, з ціллю оптимізувати процеси та пришвидшити його виконання. Зазвичай створюється більш досвідченими розробниками та бізнес-аналітиками;
- виконувана схема. Створюється для запуску у BPMN-двигуні, який виконує роль оркестратора. У певній елементи такої схеми можуть бути включені скрипти, які будуть написані розробниками.

Доки BPMN 2.0 не набула широкого розповсюдження й готового рішення BPMN-двигуна не існувало, компанії розроблювали свої внутрішні рішення таких систем. На сьогоднішній день найбільшого розповсюдження має Camunda Engine. У стандарті BPMN 2.0 визначається декілька сутностей. Кожний процес описує набір дій відносно певної сутності, який у кінці виконання досягне конкретної поставленої мети. Стани сутності всередині процесу визначаються як події, які відбуваються із самим процесом протягом його виконання. В залежності від результату чи причини події, їх розділяють на типи:

- початкова подія;
- помилкова подія;
- подія, пов'язана з часом;
- подія-повідомлення;
- кінцева подія й т. і.;

Кожен бізнес-процес повинен мати початкову та кінцеву подію. Для переходу від однієї події до іншої, необхідно виконати якусь дію. Для позначення таких дій використовується сутність завдання. Розгалуження ходу процесу можливе за допомогою сутності шлюз. Вони спрямовують процес під час його виконання в залежності від певної умови. Задля розробки схеми опису або аналізу можуть бути використані візуальні інструменти (Draw.io, Microsoft Outlook тощо), але у випадку створення виконуваної схеми необхідно використовувати спеціальні програми-моделери, наприклад Camunda Modeler. Дані програми перетворюють візуальні елементи у xml-файл з розширенням .bpmn, який буде зчитуватись та оброблюватись BPMN-двигуном. На рис. 1 наведено примітивну схему оновлення даних з певного сенсору. Згідно зі схемою, на певній території наявні датчики температури, вологості та освітленості. Задачею процесу є збір і оновлення даних у центральну базу даних.

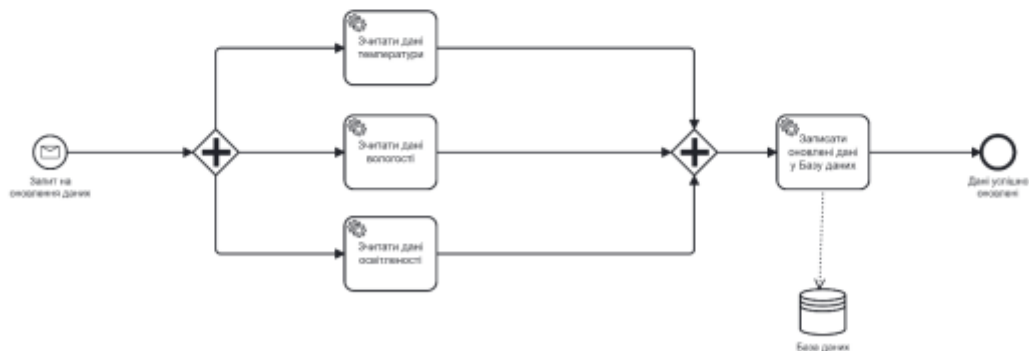


Рисунок 1 – Процес оновлення даних з сенсорів

Даний процес може бути використаний як підпроцес (за принципом функції, готового блоку коду) у більш складному процесі. Приклад наведено на рис. 2.

Тези доповідей

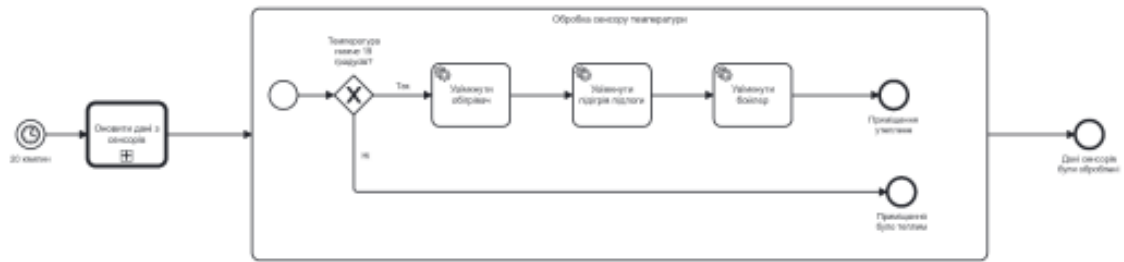


Рисунок 2 – Процес обробки та оновлення даних з сенсорів

Таким чином, за допомогою стандарту BPMN 2.0 була розроблена схема, яка може бути виконана BPMN-двигуном задля оркестрації складної системи мережі сенсорів та контролерів, й візуально демонструє поетапний хід процесу. BPMN-двигун самостійно контролює хід процесу та викликає певні частини системи задля виконання конкретної задачі, що економить час під час розробки сценаріїв роботи. Наявність візуальної схеми спрощує аналіз самого процесу, його побудову, та виконує роль певної документації тих чи інших процесів.

ДОДАТОК И

Тези опубліковані під час конференції «Інформаційні технології та інженерія»

Методи і засоби комп'ютерної інженерії

УДК 004.73:621.391.6

Баєв В. О., Пузирьов С. В.

*Чорноморський національний університет ім. Петра Могили,
м. Миколаїв, Україна*

ТУРИСТИЧНА СЕНСОРНА МЕРЕЖА НА БАЗІ LORAWAN

Після проходження певного туристичного маршруту у якості звіту та підтвердження факту проходження групою заявленого

маршруту, керівники туристичної групи повинен надати деталі маршруту, серед яких:

- фотознімки;
- особливості районів маршруту (рельєф, погодні умови тощо);
- стан учасників під час проходження маршруту.

На даний момент переважна більшість керівників ведуть паперові чи електронні щоденники походу. Виходячи з цього, були виконані дослідження можливості автоматизації виміру та збереження даних щодо проходження туристичного маршруту групою. Це дозволить більш точно відтворювати події та деталі проходження маршруту. Тож під час проходження маршруту керівник зможе більше зосередитись на успішному закінченні туристичного походу, замість ведення нотаток та запам'ятовуванні подій чи умов певної ділянки маршруту.

Згідно з виконаним оглядом технологій бездротової передачі, у якості способу передачі даних за основу було взято LoRaWAN. Згідно з дослідженнями, дана технологія надає змогу передавати дані на великих відстанях й забезпечує високу енергоефективність при використанні [1]. На даний час дана технологія отримує більшого розповсюдження у IoT-проектах, найбільшого розповсюдження має сфера сільського господарства [2]. На рис. 1 наведено принципову схему мережі сенсорів.

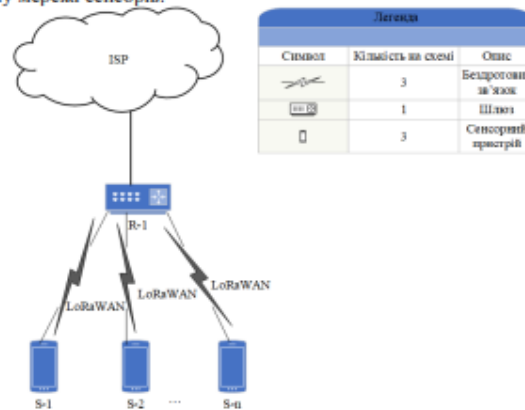


Рисунок 1 – Принципова схема сенсорної мережі

65

Як видно зі схеми рис. 1, передбачається, що кожен учасник туристичного походу буде мати свій власний портативний сенсорний пристрій. Кожний сенсорний пристрій шляхом LoRaWAN-технології передає дані до шлюзу мережі. Даний шлюз має підключення з мережею інтернет, що надає змогу передати отримані дані до центрального серверу, звідки отримані дані можна переглянути.

Таким чином, інформація щодо стану проходження маршруту може бути переглянута зв'язковим, який має доступ до стабільної мережі інтернет. Таким чином, розробка даного пристрою вирішує проблеми:

- контакту туристичної групи зі зв'язковим;
- контакту учасників групи між собою;
- збереження та відтворення даних проходження походу.

Окрім цього, можливість кращої комунікації похідної туристичної групи може зменшити кількість летальних випадків чи зниклих безвісти осіб.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Saban M., Aghzout O., Medus L. D., Rosado A. Experimental analysis of IoT networks based on LoRa/LoRaWAN under indoor and outdoor environments: Performance and limitations. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Is. 54, no. 4. P. 159–164. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.027.
2. Anastasiou A., Zinonos Z., Georgiades M. LoRa-based environmental monitoring system for commercial farming. *Proc. of the 19th Internat. Conf. on Distrib. Computing in Smart Syst. and the Internet of Things (DCOSS-IoT)*, 2023, Pafos, Cyprus, June 19–21, 2023. DOI: 10.1109/DCOSS-IoT58021.2023.00115.