

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Оптимізація логістичних процесів з використанням технологій
Інтернет речей
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи АКТАКІТ-20-3

Півень Є. І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)

Керівник доц. каф. КІТАР Чала О. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ АКТ
(назва)

Кафедра _____ КІТАР
(назва)

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Півень Єгору Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація логістичних процесів з використанням технологій Інтернету
Затверджена наказом університету від 03.06.2024 №544Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18.06.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Розмір пристрою, 400 мм × 100 мм × 80 мм; 3.2 Тип передачі даних: бездротова комунікація засобами стільникових мереж та супутникового зв'язку.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: Вступ; Аналіз логістичних процесів; Аналіз технологій Інтернету речей (IoT); Огляд сучасних рішень для покращення логістичних процесів; Огляд потреб та вимог до системи IoT для логістики; Розробка архітектури системи IoT для логістики; Вибір апаратних компонентів; Вибір програмних компонентів; Розробка схеми підключення та інтеграції компонентів; Розробка системи моніторингу та управління; Аналіз функціональних характеристик розробленого IoT-засобу; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 – 15 сторінок.
6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз логістичних процесів	10.05.2024-13.05.2024	Виконано
2	Аналіз технологій Інтернету речей (IoT)	13.05.2024-19.05.2024	Виконано
3	Огляд сучасних рішень для покращення логістичних процесів	20.05.2024-23.05.2024	Виконано
4	Огляд потреб та вимог до системи IoT для логістики	24.05.2024-26.05.2024	Виконано
5	Розробка архітектури системи IoT для логістики	26.05.2024-27.05.2024	Виконано
6	Вибір апаратних компонентів	28.05.2024-30.05.2024	Виконано
7	Вибір програмних компонентів	01.06.2024-02.06.2024	Виконано
8	Розробка схеми підключення та інтеграції компонентів	03.06.2024-07.06.2024	Виконано
9	Розробка системи моніторингу та управління	08.06.2024-11.06.2024	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	12.06.2024-14.06.2024	Виконано
11	Подання роботи на рецензію	14.06.2024-16.06.2024	Виконано
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.06.2024-18.06.2024	Виконано
13	Подання атестаційної роботи в ЕК	19.06.2024-20.06.2024	Виконано

Дата видачі завдання 9 травня 2024р.

Студент _____
(підпис)

Півень С. І.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. каф. КІТАР Чала О. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

14.06.2024

A handwritten signature in black ink on a light blue rectangular background. The signature is stylized and appears to be 'S. I. Pivnyy'.

Півень Є. І.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 99 с., 34 рис., 3 дод., 64 джерел.

ЛОГІСТИКА, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МІЖНАРОДНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ,
ЛОГІСТИЧНИЙ СУПРОВІД, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, GPS, GSM.

Об'єктом розробки є покращення процесів збору та передачі даних щодо умов транспортування товарів.

Предмет розробки – автономний комунікаційний засіб віддаленого моніторингу параметрів транспортного контейнера.

Мета кваліфікаційної роботи – покращення логістичних процесів шляхом розробки IoT-засобу логістичного супроводу вантажів.

У роботі проведено:

- проведено огляд загальної характеристики Інтернету-речей у логістиці;
- визначено актуальні напрямки щодо покращення логістичних процесів із застосуванням IoT;
- сформовано архітектуру програмно-апаратного комплексу логістичного супроводу;
- наведено особливості реалізації та розроблюваного програмно-апаратного комплексу;
- сформовано рекомендації щодо аналізу функціональних характеристик розробки.

Розроблений засіб логістичного супроводу може знайти застосування при організації міжнародних перевезень важливих для замовника вантажів та є доцільним у логістичному ланцюжку харчових продуктів та лікарських засобів.

ABSTRACT

Explanatory note: 99 pages, 34 figures, 3 app, 64 sources.

LOGISTICS, INTERNET OF SPEECHES, INTERNATIONAL TRANSPORTATION, LOGISTICS SUPPORT, QUALITY CONTROL, GPS, GSM.

Research Object: Automation of data collection and transmission processes regarding the conditions of goods transportation.

Research Subject: Autonomous communication means for remote monitoring of transport container parameters.

The aim of the qualification work is to optimize logistics processes by developing an IoT tool for logistical support of cargo.

The work includes:

- an overview of the general characteristics of the Internet of Things in logistics;
- identification of current directions for optimizing logistics processes using IoT;
- development of the architecture of the hardware and software complex for logistical support;
- outlining the features of the implementation and the developed hardware and software complex;
- providing recommendations for analyzing the functional characteristics of the development.

The developed logistical support tool can be applied in the organization of international transportation of goods that are important to the customer and is advisable in the logistics chain of food products and pharmaceuticals.

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Аналіз особливостей застосування технологій інтернету-речей у логістиці ..	12
1.1 Загальна характеристика Інтернету-речей	12
1.1.1 Огляд IoT.....	12
1.1.2 Архітектура IoT.....	13
1.1.3 Бездротові комунікаційні технології в IoT	15
1.1.4 Бездротові сенсорні мережі	21
1.2 Інтернет-речей у логістиці	27
1.2.1 Логістичні процеси	27
1.2.2 Роль IoT в логістиці	29
1.2.3 IoT у вантажних перевезеннях.....	31
1.3 Визначення напрямків подальшої роботи	34
2 Формування архітектури програмно-апаратного комплексу розроблюваного пристрою логістичного супроводу вантажів.....	36
2.1 Блок керування.....	36
2.1.1 Платформа ESP32	36
2.1.2 Блок живлення пристрою.....	38
2.2 Датчики та додаткові елементи	41
2.2.1 Датчики.....	41
2.2.2 Модуль супутникового зв'язку Iridium 9602	45
2.2.3 Мобільний комунікатор Quectel BG77	47
2.3 Методи комунікації складових комплексу.....	51
2.3.1 Програмне середовище Eagle	51
2.3.2 Структурна схема системи.....	51

2.3.3 Підключення зарядного модуля	51
2.3.4 Підключення модуля ESP32	52
2.3.5 Підключення модуля Iridium 9602	56
2.3.6 Підключення модуля Quectel BG77	58
2.3.7 Підключення датчиків	59
2.4 Розрахунок показників стійкості	60
3 Реалізації розроблюваного комплексу ІОТ-моніторингу	63
3.1 Реалізація програмної складової комплексу	63
3.1.1 Протокол даних	63
3.1.2 Особливості реалізації програми.....	66
3.2 Розміщення обладнання	71
3.2.1 Реалізація друкованих плат.....	71
3.2.2 Корпус пристрою	72
3.3 Аналіз функціональних характеристик розроблюваного засобу логістичного ІоТ-моніторингу	74
3.4 Охорона праці	75
Висновки	79
Перелік джерел посилань	81
Додаток А Схема електрична підключення компонентів приладу.....	90
Додаток Б Код програми	91
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВМ – власник мережі;
- ВП – власник програми;
- ПВ – власник платформи;
- АТТ – протокол атрибутів;
- ВSS – базовий набір послуг;
- DS – система розподілу;
- ЕАТТ – розширений протокол атрибутів;
- GPS – глобальна система позиціонування;
- GSM – глобальний стандарт мобільної комунікації;
- IBSS – незалежний базовий набір послуг;
- IoT – Інтернет речей;
- ISP – провайдер послуг Інтернету;
- LR-WPAN – WPAN з низькою швидкістю;
- LTE – довгострокова еволюція;
- MAC – контроль доступу до медіа;
- M2M – концепція «Від машини до машини»;
- OGC – відкритий геопросторовий консорціум;
- OSWA – відкрита сенсорна веб-архітектура;
- PAN – персональна мережа;
- QoS – якість обслуговування;
- RFD – пристрій зниженої функціональності;
- RFID – радіочастотна ідентифікація;
- SOA – сервісно-орієнтована архітектура;
- SWE – веб-ввімкнення сенсора;
- UMTC – універсальна система мобільного зв'язку;
- WiMAX – всесвітня сумісність для мікрохвильового доступу;
- WPAN – бездротова персональна мережа.

ВСТУП

Актуальність теми роботи зумовлена щорічним зростанням вимог щодо підтримки спеціальних умов у ході міжнародних транспортних перевезень. Так, актуальними є гарантії того, що товари надходять у найкращій якості та в цілості, що особливо важливо для продуктів харчування і лікарських засобів. Тож, вирішення поточних задач перспективним є моніторинг якості здійснення логістичних послуг за допомогою пристроїв Інтернету речей. Останні мають бути поміщеними в транспортні контейнери. Це дозволить контролювати специфічні умови, що сприяють зміні якості товарів, наприклад зміни вологості або температури. А відповідні інтелектуальні пристрої можуть контролювати умови та завчасно сповіщати вантажовідправників про погіршення якості умов транспортування товарів, для подальшого усунення невідповідних чинників, та для використання засобу, як незалежного джерела логістичної інформації.

Метою роботи є покращення логістичних процесів шляхом розробки IoT-засобу логістичного супроводу вантажів.

Розроблюваний пристрій має відповідати декільком специфічним вимогам, таким як необхідність доступності з'єднання з мінімально можливим енергоспоживанням, точне позиціонування, а також вимірювання вибраних значень за допомогою датчиків і їх передача на віддалений сервер. Так, він має визначати положення контейнера, контролювати температуру, вологість і тиск, виявляти наявність води, контролювати статус доступу до вантажу за допомогою магнітного контакту дверей, а також фіксувати удари контейнера.

Об'єктом розробки є методи та засоби підвищення ефективності виконання логістичних операцій із застосуванням технологій Інтернету речей.

Предметом розробки є автономний комунікаційний засіб віддаленого моніторингу параметрів транспортного контейнера.

У контексті поточної роботи, інтерес полягає у тому, щоб визначити особливості використання функціональних можливостей бездротового пристрою IoT для покращення логістичних операцій, з подальшим використанням даних, зібраних відповідним пристроєм, для покращення взаємодії з клієнтами.

Загалом, Інтернет швидко розвивається, і технології IoT широко використовуються також у логістичних процесах. У цій галузі проведено багато нових досліджень, але зростаюча популярність і постійна поява нових застосувань технології IoT залишає багато питань, що потребують подальшого дослідження.

Дослідження проводиться шляхом літературного вивчення останніх статей і специфікацій залучених технологій. Виявлено та зосереджено увагу на комунікаційних технологіях, які використовуються бездротовими пристроями IoT і логістичними системами. Обговорюються можливі покращення та обмеження. Так, одним з основних питань роботи є визначення того, де в ланцюжку постачання від виробника пристрою до клієнта є оптимізаційний потенціал у контексті здійснення логістичних операцій та супутнього інформаційного супроводу.

Дана кваліфікаційна робота була виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також, керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ-РЕЧЕЙ У ЛОГІСТИЦІ

1.1 Загальна характеристика Інтернету-речей

1.1.1 Огляд IoT

Концепція Інтернету речей бере свій початок у роботі дослідників Массачусетського технологічного інституту (MIT) у 1999 році. Цю ідею виклав Ніл Герешенфельд з MIT Media Lab у своїй книзі «When Things Start to Think». Колишній керівник Auto-ID Center у тому ж інституті, Кевін Ештон, цитується як перша людина, яка використала термін «Інтернет речей» у назві своєї презентації, яку він зробив у Procter & Gamble у 1999 році [4].

Автори [5] описують парадигму IoT на відміну від старішої та ширшої концепції зв'язку між машинами (англ. M2M) у такий спосіб: «На відміну від M2M, IoT також стосується підключення таких систем і датчиків до ширшого Інтернету, а також використання загальних Інтернет-технологій. У довгостроковій перспективі передбачається, що з'явиться екосистема Інтернету речей, схожа на сучасний Інтернет, що дозволить речам і об'єктам реального світу з'єднуватися, спілкуватися та взаємодіяти один з одним так само, як це роблять люди сьогодні через Інтернет».

Концепція повсюдне обчислення, тісно пов'язана з Інтернетом речей, є парадигмою «повсюдних обчислень». Термін, введений Вайзером у 1991 році, описує явище, коли людське усвідомлення комп'ютерів зникає через безперервну інтеграцію комп'ютерів у світ загалом, на відміну від персональних комп'ютерів. Коли мова йде переважно про взаємодію між машинами, повсюдне обчислення (UbiComp), відоме як «всеохоплююче обчислення», також використовується в літературі подібно до Інтернету речей [6].

1.1.2 Архітектура IoT

Немає єдиної уніфікованої архітектури для програм IoT. Було запропоновано різні моделі, і вже існує безліч практичних рішень.

Автори [7] поділяють IoT на три компоненти, які забезпечують безперебійне повсюдне обчислення:

а) апаратне забезпечення – складається з датчиків, виконавчих механізмів і вбудованого апаратного забезпечення зв'язку;

б) проміжне програмне забезпечення – інструменти зберігання та обчислення на вимогу для аналізу даних;

в) презентації – нові прості для розуміння інструменти візуалізації та інтерпретації, які можуть бути широко доступні на різних платформах і які можуть бути розроблені для різних програм». Крім того, вони визначають найважливіші базові технології для IoT, такі як радіочастотна ідентифікація (англ. RFID), бездротові сенсорні мережі (БСМ або англійською WSN), схеми адресації, зберігання та аналітика даних, візуалізація.

Подібні трирівневі узагальнені описи приймають багато форм у літературі, із застосуванням у верхній частині, з'єднаним певним проміжним програмним забезпеченням із фізичним рівнем, який часто називають «речами», «об'єктами» або «пристроями», що виконують функцію ідентифікації, сприйняття та комунікації.

Для проміжного програмного забезпечення IoT набирає популярності підхід до сервісно-орієнтованої архітектури (англ. SOA). Прийняття принципів SOA дозволяє розкладати складні та монолітні системи на програми, що складаються з екосистеми простіших і добре визначені компоненти.

Відповідно до [8], «Набір загальних інтерфейсів і стандартних протоколів дає горизонтальне уявлення про корпоративну систему. Таким чином, розвиток бізнес-процесів, що підтримується SOA, є результатом процесу проектування робочих потоків узгоджених сервісів, які в кінцевому підсумку пов'язані з діями об'єктів (рис. 1.1). Це полегшує взаємодію між

частинами підприємства та дозволяє скоротити час, необхідний для адаптації до змін, викликаних еволюцією ринку. Підхід SOA також дозволяє повторно використовувати програмне та апаратне забезпечення, оскільки він не нав'язує конкретну технологію для реалізації сервісу».

Для загальної архітектури проміжного програмного забезпечення, яке намагається охопити всі функціональні можливості, що вирішують проблеми, яких не мали попередні запропоновані моделі: абстрагування функціональних можливостей пристроїв і можливостей зв'язку, надання загального набору послуг і середовища для композиції сервісів, є ключовими напрямками.



Рисунок 1.1 – Архітектура на основі SOA
для програмного забезпечення IoT [9]

Ще одне бачення перспектив для архітектури в умовах підприємства, відповідно до [10], підтримує твердження, що зазначені архітектури розглядаються як сервіс-орієнтовані. Таким чином, нова функціональність буде представлена шляхом об'єднання служб у міжрівневій формі, тобто послуги, що покладаються на корпоративну систему, на саму мережу та на рівні пристроїв, будуть об'єднані.

Нові сценарії інтеграції можна застосувати, організувавши служби відповідно до сценарію. Крім того, складні сервіси можуть бути створені на будь-якому рівні (навіть на рівні пристроїв) з урахуванням і лише на основі наданої функціональності інших об'єктів, які можуть надаватися як послуга. Паралельно динамічне відкриття та одноранговий зв'язок дозволять оптимально використовувати функціональні можливості певного пристрою. Зрозуміло, що ми відходимо від ізольованих автономних апаратних і програмних рішень до більш кооперативних моделей».

1.1.3 Бездротові комунікаційні технології в IoT

Інтернет речей використовує різні комунікаційні технології. Більшість комунікацій в IoT є бездротовими. Технологія дальнього радіусу дії включає глобальний стандарт мобільної комунікації (англ. GSM), універсальна система мобільного зв'язку (англ. UMTS, довгострокова еволюція (англ. LTE) (стільникові мережі), всесвітню сумісність для мікрохвильового доступу (англ. WiMAX) і наземне транкінгове радіо (англ. TETRA). Супутники також використовуються в глобальній системі позиціонування (англ. GPS) і цифровому відеомовленні – зворотний канал через супутник (англ. DVB-RCS).

Розробка мітки радіочастотної ідентифікації (RFID) (рис. 1.2) – це те, з чого почався IoT, і він залишається найбільш використовуваною технологією IoT сьогодні.

Технологія RFID дозволяє розробляти мікрочіпи для бездротової передачі даних через радіохвилі. Порівняно зі своїми попередниками, штрих-кодом і магнітною смугою, він має перевагу в тому, що при ідентифікації не потрібно мати прямий візуальний або фізичний контакт. Залежно від типу чіпа, він може бути лише для читання, одноразового запису, багаторазового читання або читання та запису. Зв'язок також може бути зашифрований. Мітка RFID може бути активною, пасивною, напівпасивною або напівактивною [11].



Рисунок 1.2 – Сфери застосування RFID-міток [11]

Пасивні RFID-мітки не живляться від батареї, вони використовують потужність запитувального сигналу зчитувача для передачі ідентифікатора зчитувача RFID. Активні RFID-мітки живляться від батарейок, мають одну або кілька антен, один або більше транспондерів і можуть працювати на різних частотах. Вони також мають більшу робочу відстань до 200 м. З основне застосування активних RFID-міток – це портові контейнери для моніторингу вантажу. Напівпасивні RFID-мітки мають вбудоване джерело для живлення контролера або мікрочіпа та можуть містити додаткові пристрої, наприклад датчики. Напівактивні RFID-мітки мають активний (з живленням) приймач і їх можна використовувати на великих відстанях або в середовищах із значними перешкодами [12].

Bluetooth – це промислова технологія передачі даних засобами бездротової персональної мережі (англ. WPAN). Вона забезпечує стандартний, економічний і безпечний спосіб обміну інформацією між різними пристроями через радіочастоту малого радіусу дії. Специфікація Bluetooth була розроблена

з основною метою отримання низького енергоспоживання, малого радіусу дії (1-100 м залежно від класу пристрою) і недорогого виробництва для сумісних пристроїв. Протокол Bluetooth працює на частотах 2,45 ГГц і використовує стрибкоподібні зміни частоти, щоб протистояти проблемам перешкод.

Пристрій Bluetooth здатний шукати інші пристрої Bluetooth, охоплені радіосигналом, у радіусі кількох десятків метрів. Існують версії (Bluetooth Low Energy (LE), Bluetooth версії 4.0+ або Bluetooth Smart), які розроблені для використання Інтернету речей і характеризуються значно меншим енергоспоживанням, ніж попередні версії (з тим самим трафіком), що особливо важливо для мобільних IoT-застосувань (рис. 1.3). Так, значну частину збереженої енергії можна отримати за рахунок використання режиму сну з дуже низьким енергоспоживанням, коли пристрій можна досить швидко «розбудити», якщо це необхідно. Bluetooth LE також використовує інші канали та іншу модуляцію, порівняно з Bluetooth «Classic», але вони можуть використовувати ту саму антену. Реалізація програмного радіо забезпечує сумісність з Bluetooth LE і попередніми версіями, але периферійні пристрої зазвичай підтримують лише один визначений варіант.



Рисунок 1.3 – Елементи концепції Bluetooth IoT [13]

Bluetooth SIG офіційно представила Bluetooth 5.1 21 січня 2019. Тут відмінністю від попередніх версій є те, що у користувачам надано можливість визначати місцезнаходження та напрямок з максимальною точністю. А 31 грудня 2019 було опубліковано специфікації найновішої версії Bluetooth 5.2.

Додаткові можливості нової специфікації є наступними:

- LE Audio;
- розширений протокол атрибутів (англ. EATT), що є покращеною версією Attribute Protocol (англ. ATT);
- LE Power Control;
- LE Isochronous Channels.

Bluetooth може створювати бездротові локальні мережі з меншим розсіюванням енергії та меншою вартістю апаратного забезпечення порівняно з Wi-Fi. Однак, оскільки Bluetooth орієнтований на процедуру з'єднання, перед обміном даними необхідно встановити головне та підлегле з'єднання. Головні (або «центральні») пристрої сканують інші пристрої, а підлеглі (або «периферійні») пристрої сповіщають і чекають підключення. Ця проста мережа «одного стрибка» називається пікомережею і може включати до семи активних підлеглих пристроїв, підключених до одного головного. Немає обмежень щодо максимальної кількості підлеглих пристроїв, підключених до одного головного пристрою, але лише сім із них можуть бути активними одночасно, інші мають бути у так званому «стані паркування». Головний блок пікомережі контролює трафік в її межах шляхом опитування підлеглих пристроїв відповідно до будь-якого бажаного алгоритму [13].

Wi-Fi – це телекомунікаційна технологія, яка дозволяє кінцевим користувачам підключатися один до одного через локальну бездротову мережу (WLAN) на основі стандарту IEEE 802.11 (рис. 1.4).

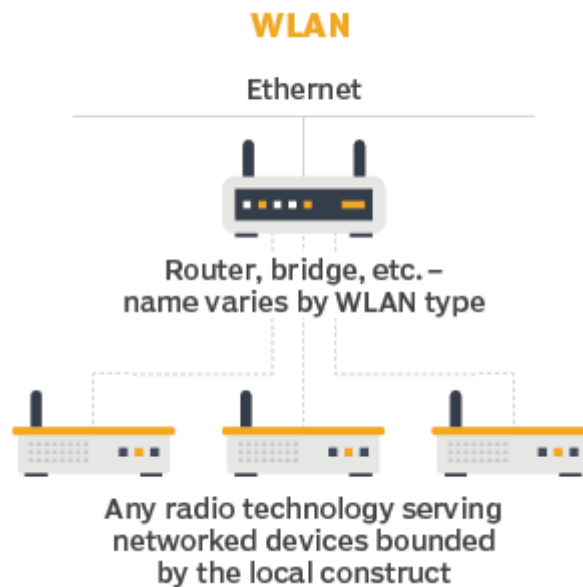


Рисунок 1.4 – Мережа WLAN [14]

Wi-Fi розроблено для забезпечення високошвидкісної передачі з великим радіусом (100 м). Щоб мати можливість покрити потрібну територію, кілька точок доступу (і пов'язане покриття стільникового зв'язку) з'єднані разом у локальній мережі, хоча їх також можна з'єднати бездротовим способом із втратою спектральної ефективності системи. Локальна мережа може бути підключена до Інтернету через маршрутизатор, використовуючи всі послуги підключення, які пропонує Інтернет-провайдер (англ. ISP). Основна комірка мережі Wi-Fi (рис. 1.5) реалізується базовим набором послуг (BSS), який являє собою набір мобільних або фіксованих станцій. Вони можуть бути з'єднані з іншими BSS через архітектурний компонент, званий системою розподілу (англ. DS), щоб сформувати мережу довільного розміру та складності з розширеним набором послуг (англ. ESS), яку часто називають інфраструктурною мережею [15].

Конфігурація незалежного базового набору послуг (англ. IBSS) дозволяє станціям Wi-Fi спілкуватися безпосередньо без будь-якої точки доступу. Цей тип локальної мережі часто формується без попереднього планування лише на той час, який є необхідним. Цей тип роботи часто називають тимчасовою мережею [15].



Рисунок 1.5 – Мережа Wi-Fi [14]

Стандарт ZigBee відповідно до IEEE 802.15.4 визначає специфікації для WPAN з низькою швидкістю (англ. LR-WPAN) для підтримки простих пристроїв, які споживають мінімальну кількість енергії та зазвичай функціонують у межах персонального робочого простору (англ. POS) – 10 м.

ZigBee забезпечує самоорганізовану, багатопрохідну та надійну сітчасту мережу з тривалим терміном служби батареї. Елементи інфраструктури даної технології наведено на рис. 1.6. У мережі LR-WPAN можуть брати участь два різні типи пристроїв: повнофункціональний пристрій (англ. FFD) і пристрій зі зниженою функціональністю (англ. RFD). Так, FFD може працювати в трьох режимах: координатор персональної мережі (англ. PAN), координатор або пристрій. У свою чергу, FFD може спілкуватися з RFD або іншими FFD, тоді як RFD комунікує лише з FFD. Також, RFD призначений для дуже простих застосувань, таких як вимикач світла або пасивний інфрачервоний датчик. Їм не потрібно надсилати великі обсяги даних і вони можуть асоціюватися лише з одним FFD одночасно. Отже, RFD доцільно реалізувати з використанням мінімальних ресурсів і обсягу пам'яті [16].

Після того, як FFD активується вперше, він йому доступним є створення власної мережі, де слугувати у якості координатора PAN.

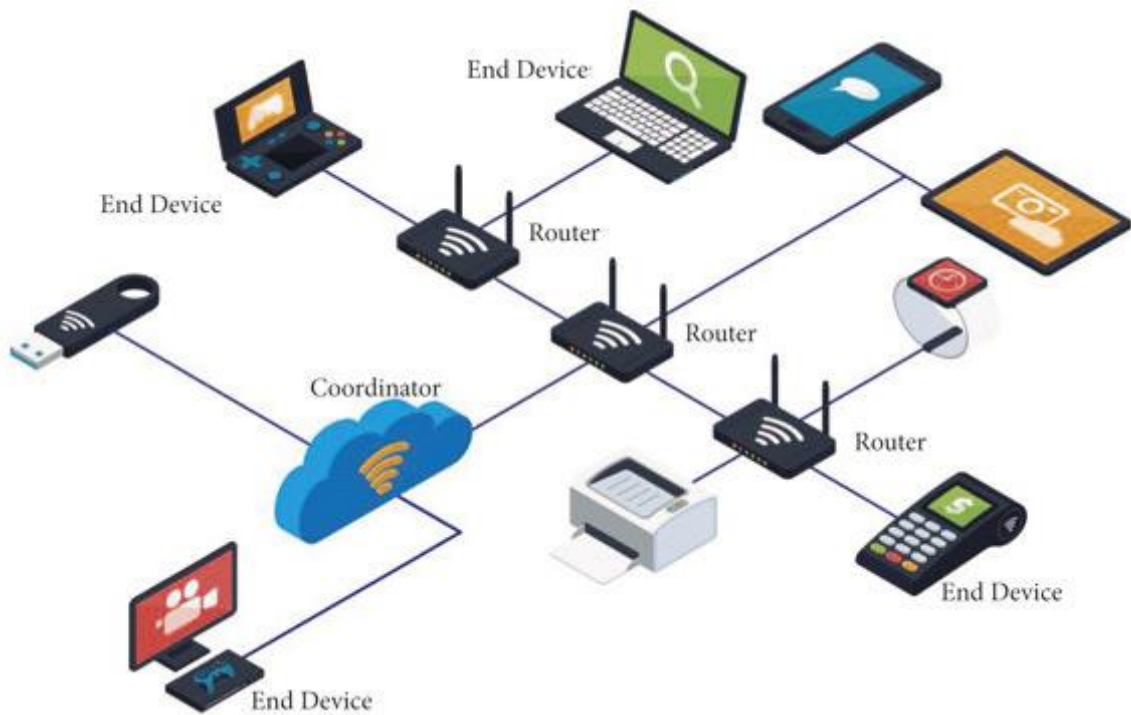


Рисунок 1.6 – Елементи інфраструктури ZigBee [17]

Після вибору ідентифікатора PAN, координатор PAN дозволяє іншим пристроям приєднатися до його мережі, а RFD підключається до мережі дерева кластерів як вихідний вузол у кінці гілки, оскільки він має змогу асоціюватися лише з одним FFD одночасно. Так, будь-який із FFD діє як координатор і надає послуги синхронізації іншим пристроям або іншим координаторам. Лише один із цих координаторів виступає у якості загального координатора PAN, який має більші обчислювальні ресурси, ніж будь-який інший пристрій у мережі [16].

1.1.4 Бездротові сенсорні мережі

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) – це мережа пристроїв, які збирають дані з навколишнього середовища та передають їх для подальшої обробки та зберігання. Зазвичай вони характеризуються розподіленою архітектурою, де пристрої функціонують відносно автономно. Вони утворюють ієрархічну або однорідну топологію. В однорідній топології вузли пристроїв забезпечують однакову функціональність, а в ієрархічній топології спеціалізовані вузли

виконують специфічні функції. Такий поділ виконується у тих випадках, коли деякі вузли спеціалізуються на обробці та маршрутизації, тоді як інші здійснюють моніторинг і збір даних.

Ієрархічна топологія дає перевагу щодо оптимізації вузлів для окремих завдань (наприклад, можливості обробки даних і споживання енергії). Перевагами однорідної топології є стійкість мережі та легкість заміни вузла.

Часто зустрічається кластерна структура – гібридна топологія, де завдання вузла залежать від його просторового та топологічного розташування. Так, БСМ поділяють на динамічні та статичні мережі залежно від того, чи можуть вузли довільно переміщатися чи ні, а також на централізовані чи розподілені залежно від розподілу завдань між вузлами. Наприклад, базова станція відповідає за обробку даних у централізованій мережі [17].

Нижче наведено компоненти мережі моніторингу БСМ [18].

1) Апаратне забезпечення БСМ. Зазвичай вузол (основне апаратне забезпечення БСМ) містить інтерфейси датчиків, блоки обробки, блоки прийомо-передавача та джерело живлення. Майже завжди, вони складаються з кількох аналого-цифрових перетворювачів для взаємодії датчиків, а більш сучасні сенсорні вузли мають можливість обмінюватися даними за допомогою однієї смуги частот, що робить їх більш універсальними.

2) Комунікаційний стек БСМ. Очікується, що вузли будуть розгорнуті спеціальним способом для більшості програм. Розробка відповідної топології, маршрутизації та рівня ідентифікатора контролю доступу до медіа (англ. MAC) має вирішальне значення для масштабованості та довговічності розгорнутої мережі. Вузли в БСМ повинні обмінюватися даними між собою, щоб передавати дані в одному або кількох «стрибках» на базову станцію. Відключення вузлів і, як наслідок, зниження ефективності функціонування мережі не є виключеннями. Також, комунікаційний стек на вузлі приймача повинен мати можливість взаємодіяти із зовнішнім світом через глобальну мережу, щоб діяти як шлюз до підмережі БСМ та Інтернету.

3) Проміжне програмне забезпечення БСМ. Механізм поєднання кіберінфраструктури з сервісно-орієнтованою архітектурою (SOA) і сенсорними мережами для надання доступу до гетерогенних сенсорних ресурсів у спосіб, незалежний від розгортання. Це засновано на ідеї ізоляції ресурсів, які використовуються кількома програмами. Потрібне незалежне від платформи проміжне програмне забезпечення для розробки сенсорних додатків, наприклад відкрита сенсорна веб-архітектура (англ. OSWA). Так, OSWA розгортається на основі уніфікованого набору операцій і стандартних представлень даних, як це визначено в методі веб-ввімкнення сенсора (англ. SWE) від відкритого геопросторового консорціуму (англ. OGC).

4) Безпечна агрегація даних. Ефективний і безпечний метод агрегації даних потрібен для продовження терміну служби мережі, а також для забезпечення надійності даних, зібраних із відповідних датчиків. Так, збої вузлів є загальною характеристикою БСМ, тому топологія мережі повинна мати здатність до самовідновлення. Забезпечення безпеки є критично важливим фактором, оскільки система автоматично підключається до приводів, і захист систем від зловмисників стає дуже важливим фактором [19].

Існує ряд технологічних стандартів, які використовуються для формування бездротових сенсорних мереж. Нижче наведено список деяких із найбільш актуальних із викладом основних характеристик.

1) 6LoWPAN – це бездротова персональна мережа з низьким енергоспоживанням на основі інтернет протокола IPv6, що розроблена для додатків із пристроями з низькою швидкістю передачі даних, які потребують підключення до Інтернету [20].

2) IEEE 802.15.3 – це стандарт фізичного та MAC-рівня для WPAN з високою швидкістю передачі даних, призначений для підтримки мультимедійної потокової передачі аудіо та відео в реальному часі. Стандарт використовується в таких пристроях, як портативна відеоелектроніка, бездротові колонки та бездротове підключення для ігор, телевізори, бездротові телефони та принтери [20].

3) IEEE 802.15.4 визначає контроль доступу до середовища та фізичний рівень для низькошвидкісних бездротових персональних мереж (LR-WPAN). Додатки бездротових датчиків, які використовують IEEE 802.15.4, включають промисловий, житловий і навколишній моніторинг, автоматизацію та керування, зосереджуючись на низькій складності, низькій вартості розгортання та низькому енергоспоживанні. Пристрої в топології «зірка» взаємодіють із центральним контролером, тоді як у одноранговій топології можуть створюватися спеціальні та самоконфігуруючі мережі [16].

4) ISA100.11a орієнтований на ринок моніторингу та контролю промислової обробки, де втрата даних може дорого коштувати операторам. Поведінка мережі має бути передбачуваною, надійною та стійкою до радіочастотних перешкод і складних умов навколишнього середовища. Він пропонує як сітчасту, так і зіркоподібну топології мережі [17].

5) WirelessHART – це мережева технологія бездротових датчиків, заснована на одному з найпопулярніших промислових протоколів, що використовуються (протокол віддаленого перетворювача з адресною магістраллю), який розроблено для підтримки сітчастої, зіркоподібної та комбінованої мережевої топології. Сумісність із встановленими застарілими та новими дротовими пристроями HART є основною причиною його використання [21].

6) ZigBee націлено насамперед на ринок автоматизації дому та офісу з миттєвим і легким налаштуванням мережі та доступними радіопроцесорами, як ключовими властивостями. Пристрої ZigBee можуть утворювати сітчасті мережі, з'єднуючи разом до тисяч пристроїв. Пристрої споживають дуже мало енергії та можуть працювати від батарейок протягом багатьох років, і завдяки цим факторам це, ймовірно, найбільш використовувана технологія у реалізації БСМ наразі [16].

7) Bluetooth більш відомий своїм використанням для підключення периферійних пристроїв до споживацьких пристроїв, для яких він спочатку був розроблений. Орієнтація підключення раніше була перешкодою для

формування БСМ з попередніми версіями Bluetooth. Так, сенсорні мережі на базі Bluetooth із використанням BTnodes підходять для додатків, які активні протягом обмеженого періоду часу з кількома непередбачуваними сплесками трафіку. BTnodes можуть досягти високої пропускної здатності, однак вони споживають багато енергії навіть у простої. Обслуговування з'єднання дороге, і для підтримки маршрутизації з кількома стрибками потрібні подвійні радіостанції [22].

У свою чергу, використання нового типу мережевої топології може усунути потребу у двох радіостанціях для вузла. Кілька пікомереж, з'єднаних одна з одною, називають мережею розсіювання. Так, Scatternet складається з двох або більше пікомереж із спільним підлеглим вузлом [23]. Підлеглий вузол не може одночасно підключатися до кількох головних, але здатен перемикатися між двома з них. У такій гібридній топології зіркоподібної та сітчастої топологій кожна пікомережа автономно здійснює зв'язок між пікомережами. Результиуюче споживання електроенергії в мережі менше, ніж у більш поширеній мережі Zigbee, коли вузли Bluetooth LE використовуються таким описаним чином. Bluetooth LE також підключається швидше, ніж Zigbee, і набирає популярності як опція для БСМ [23].

Багатосторонні бездротові сенсорні мережі є новою технологією. Це інфраструктура, що складається з кількох адміністративних доменів або сторін, які зацікавлені в тих самих даних датчиків. На даний момент у більшості рішень треті сторони мають доступ лише до сховища даних, наданого власником БСМ, але в майбутньому третім сторонам може бути надано прямий доступ до вузлів. Тоді власник БСМ може стягувати плату за цю послугу. БСМ також є багатопрограмним середовищем, оскільки вони зазвичай не мають єдиного призначення. БСМ також вважаються динамічними середовищами, оскільки змінюються як вузли, так і програми, які їх використовують. Вузли зникають і з'являються нові, створюються нові програми та оновлюються старі [24].

З метою забезпечення безпечного способу спільного використання БСМ розробники проміжного програмного забезпечення SecLooCI WSN [25], пропонують рольову модель для багатосторонніх БСМ, які можна використовувати для розробки проміжного програмного забезпечення у підтримці спільного використання вузлів.

Нижче наведено характеристику описуваної моделі за ролями.

1) Власник програми (ВП), який хоче використовувати БСМ для виконання активації або збору даних датчиків. Додатки вимагають від датчика певних ресурсів вузла, як-от можливості зондування та зберігання. Використання спільних ресурсів може бути відшкодовано з ВП та ПВ.

2) Власник платформи (ПВ) є власником платформ сенсорних вузлів. ПВ може швидше окупити інвестиції в розгортання БСМ від інших сторін, які будуть платити за використання послуг, що надаються вузлами.

3) Власник мережі (ВМ) керує бездротовою мережею. Роль ВМ полягає у забезпеченні можливостей мережі та Інтернету для локальних вузлів, приблизно так само, як зараз Wi-Fi-з'єднання надаються відвідувачам організаціями в певних локаціях.

Зв'язок між зазначеними ролями учасників інфраструктури БСМ пояснюється схемою за рис. 1.7.

Спонуванням для ВП використовувати багатокористувацький БСМ є уникнення витрат на розгортання власного БСМ. У свою чергу, ПВ та ВМ можуть отримувати дохід від використання їхніх послуг або отримувати послуги інших сторін у відповідь.

Автори [26] наводять приклад того, як відповідні ролі також можуть бути в руках однієї організації. Так, кожна сторона може виконувати одну чи декілька з цих ролей залежно від ситуації. Наприклад, у контексті перевезення вантажів ПВ, ймовірно, також є ВП, оскільки він матиме програму, яка стежить за поточним станом вантажу.

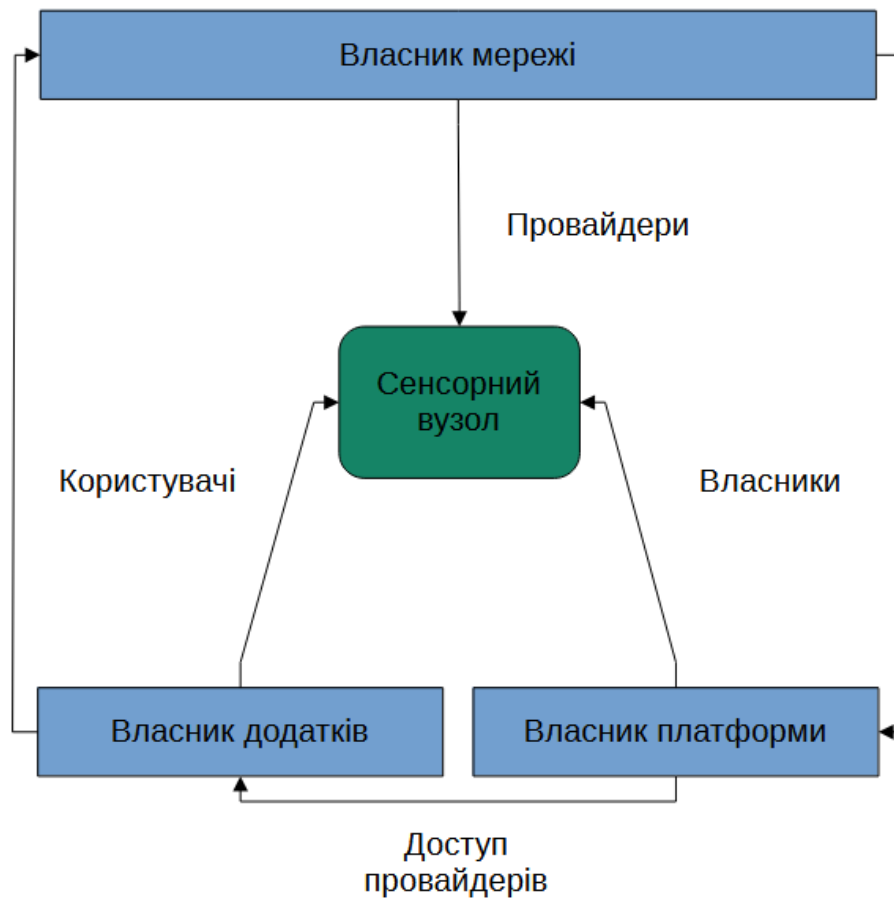


Рисунок 1.7 – Учасники інфраструктури БСМ

Адміністрація фірми-перевізника, швидше за все, виконує всі три ролі одночасно – забезпечує мережеві зв'язки з усіма транспортними засобами, які зараз знаходяться в БСМ (ВМ). Тож вони мають певну статичну інфраструктуру вузлів, щоб, наприклад, підтримувати служби локалізації (ПВ), і вони мають програму моніторингу, що працює на своїх та іноземних вузлах для відстеження всіх вантажів, які знаходяться у логістичних локаціях (ВП).

1.2 Інтернет-речей у логістиці

1.2.1 Логістичні процеси

Термін «логістика» з'явився в літературі ще в 1898 році в контексті французьких військових процесів, а пізніше був прийнятий у діловому вжитку,

пов'язаним переважно з переміщенням та передачею товарів, послуг та інформації.

Так, відповідно до [27], логістика визначається як орієнтація та структура планування, яка прагне створити єдиний план для потоку продуктів та інформації через бізнес. На рис. 1.8 наведено основні складові логістичної інфраструктури організацій. Фокус у логістиці, як правило, знаходиться в межах однієї компанії, хоча він також керує потоками між компанією та її постачальниками і клієнтами. Вхідна та вихідна логістика включені в концепцію ланцюга створення вартості Портера, як основні види діяльності, що відповідають за формування вартості. Портер не описує що цінність створюється зазначеними видами діяльності, але, згідно з [28], функція логістики бере участь у створенні вартості за допомогою восьми міжфункціональних процесів, визначених глобальним ланцюгом поставок. Останній включає: управління взаємовідносинами з клієнтами, управління відносинами з постачальниками, управління обслуговуванням клієнтів, управління попитом, виконання замовлень, управління виробничими потоками, розробка продукту та комерціалізація і управління поверненням.



Рисунок 1.8 – Складові логістичної інфраструктури [29]

1.2.2 Роль IoT в логістиці

Галузь логістики є ключовим «гравцем», який отримує користь від розвитку Інтернету речей. Логістика – це типова фрагментовано та низькорентабельна галузь із десятками тисяч різних постачальників із різними робочими стандартами для місцевих, внутрішніх і міжнародних операцій. Будучи таким мережевим бізнесом, необхідно буде налаштувати цілі мережі перед впровадженням нових рішень, що означає суттєві інвестиції для будь-яких розробок. Однак удосконалення транспортування та логістики принесе користь усім видам економічної діяльності, які залежать від доставки товарів і надійності та ефективності ланцюгів постачання.

Незважаючи на витрати, пов'язані з інвестиціями, галузь логістики першою запровадила технології Інтернету речей, і сьогодні багато транспортних засобів логістики вже наповнені датчиками, вбудованими процесорами та бездротовим підключенням. Запровадження маркування палет або товарів на рівні RFID чи іншої недорогої технології є центром багатьох застосувань IoT [28].

У свою чергу, компанії DHL і Cisco бачать наступні рушійні напрямки для постачальників логістичних послуг, які прискорюють впровадження IoT [30]:

Складські операції:

- інтелектуальне керування запасами можливо, коли всі запаси позначено мітками;
- виявлення пошкоджень за допомогою сканування палет засобами відеокамер, підключених до Інтернету речей;
- відображення в режимі реального часу рівнів і умов запасів, запобігання ситуацій відсутності на складі та управління якістю матеріалів, що зберігаються;
- точний контроль запасів можливий, коли вихідний шлюз сканує та гарантує, що правильні елементи в правильному порядку залишають сховище;

- оптимальне використання активів стає можливим завдяки машинам і транспортним засобам, підключеним до Інтернету речей;
- прогнозне технічне обслуговування стає можливим завдяки датчикам, які вимірюють фізичне навантаження машин у транспортних системах;
- покращення охорони здоров'я та безпеки можна досягти шляхом зменшення кількості аварій через зіткнення з транспортними засобами;
- задіяна робоча сила може отримати вигоду від взаємодії доповненої реальності з машинами та носимими пристроями, сканерами і смартфонами, підключеними до системи IoT. Працездатність і самопочуття людини також можна аналізувати та покращувати;
- розумне управління енергоспоживанням складу стає можливим, коли освітлення та пристрої можна вимикати, коли вони не потрібні, що призводить до економії ресурсів.

Вантажні операції:

- моніторинг розташування та стану, така інформація, як температура, вологість, світло, удар, збирається і може надати багато інформації про поточний стан відправлення;
- запобігання крадіжкам через чітке бачення руху товарів дозволяє швидко реагувати і запобігає втратам через затримку інвентаризації та вартості вкрадених товарів;
- управління автопарком і активами дозволяє аналізувати час простою та оптимізувати використання активів;
- переваги для здоров'я та безпеки можна отримати, попереджаючи водіїв про необхідність відпочинку;
- прогнозне управління життєвим циклом активів, коли вантажівка може самостійно стежити за пошкодженнями, і технічне обслуговування, дають можливість підвищити термін експлуатації транспортних засобів;
- наскрізне управління ризиками ланцюга постачання отримує переваги від даних, зібраних системою, які можна аналізувати, щоб забезпечити

автоматичну реакцію на такі події, як стихійні лиха та невиконання службових обов'язків робітниками.

Операції доставки:

– оптимізований транспортний збір стає можливим завдяки розумним поштовим скринькам, які інформують кінцевого клієнта та постачальника логістики про доставку та умови відправлення;

– автоматичне поповнення та попереднє відправлення скорочують час виконання замовлення. Так, автоматичне поповнення потребує моніторингу рівня запасів у роздрібному магазині. А попередня доставка скорочує час очікування доставлення, переміщуючи товари ближче до клієнта, аналізуючи дані клієнта перед підтвердженням покупки;

– монетизація та оптимізація повернення замовлення шляхом з'єднання кур'єрів і транспортних засобів із людьми, яким можуть знадобитися послуги доставки та пакування;

– наглядність продуктів наступного покоління можлива шляхом моніторингу товарів протягом усього періоду доставки, наприклад, для цілісності холодового ланцюга швидкопсувних продуктів.

1.2.3 IoT у вантажних перевезеннях

Відповідно до [31], майже 90% світової торгівлі реалізується засобами транспортування вантажів у контейнерах, які доставляються різними видами транспорту, включаючи вантажівки, кораблі та потяги. Контейнерна торгівля стикається з багатьма проблемами, включаючи відстеження контейнерів, моніторинг у режимі реального часу та виявлення вторгнень, механізм звітування про крадіжки в режимі реального часу та звітування про стан відправлень. Для вирішення цих завдань використовуються різні рішення IoT [32].

У свою чергу, процес відстеження контейнера може супроводжуватись певними труднощі зв'язку, при використанні радіосигналів GPRS, коли

контейнер транспортується судном. Так, перешкоди від інших сигналів і вмісту контейнера та змінні відстані і кути до базової станції, роблять такий тип з'єднання досить ненадійним. Більшість запатентованих систем встановлювалися лише на дверцятах контейнера без моніторингу внутрішньої його частини.

Автори [33] запропонували ієрархічну систему для вирішення зазначеної проблеми. У їхній моделі внутрішньо контейнерні вузли БСМ, які називаються внутрішніми моніторами, функціонуватимуть як сенсорні вузли та підключатимуться до контейнерного монітора. На кожному контейнері встановлено один внутрішній монітор, і вони мають підключення засобами GSM та GPS, які використовуються для підключення безпосередньо до глобальної мережі зв'язку. А за можливістю, підключаються до основного монітора. Де останній – це вузол інфраструктури на транспортному засобі. Через нього проходить більшість енергоємних комунікацій.

Архітектура системи БСМ відстеження вантажів наведена на рис. 1.9.

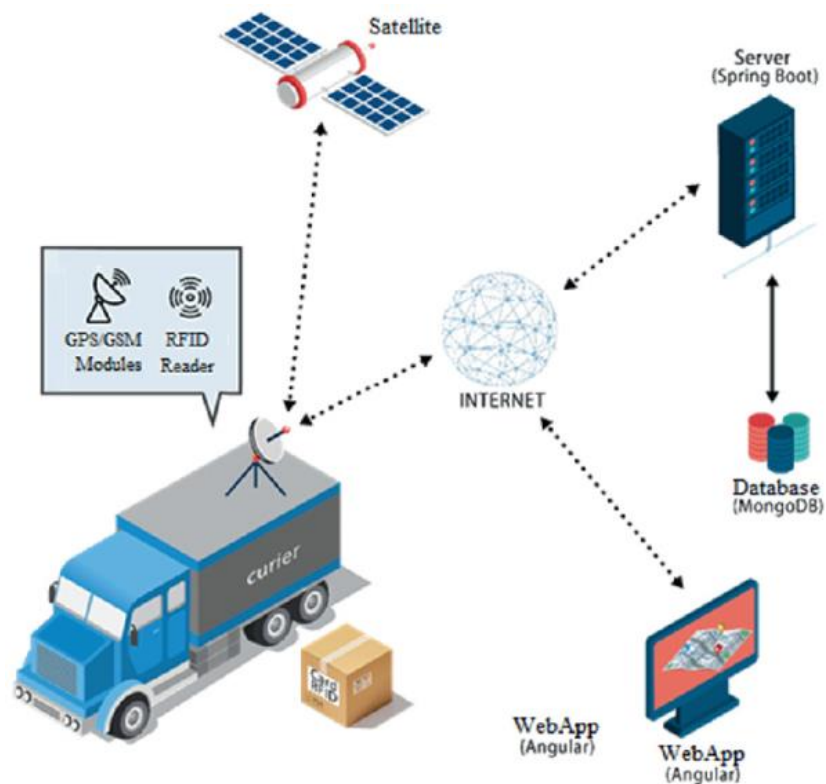


Рисунок 1.9 – Загальна архітектура системи БСМ відстеження вантажів [33]

У роботі [34] досліджується приклад використання рольової моделі багатосторонньої БСМ, описаної в попередніх пунктах. Тут, реалізація демонструє повторне використання існуючих датчиків для різних цілей різними сторонами в контексті логістики.

Так, наприклад, постачальники послуг логістики встановлюють у свої контейнери досить потужний датчик ваги з продуктивністю, подібною до смартфона, для моніторингу ланцюга поставок, з меншими датчиками та приводами по всьому контейнеру. Ці датчики дозволяють відслідковувати стан контейнера для всіх учасників ланцюга постачання, припускаючи, що постачальники логістичних послуг надають спільний доступ до даних вузла датчика.

За описуваним сценарієм, багато сторін виявлятимуть бажання взаємодіяти з датчиками контейнерів:

а) власники товарів хочуть знати місцезнаходження контейнерів і гарантувати, що товари транспортуються належним чином (відсутність ударів та екстремальних температур тощо);

б) власники порту та митниці вимагають доступу до вузла, щоб уможливити локалізацію, контролювати доступ до контейнерів і забезпечити правильну обробку товарів;

в) уряди вимагають доступ до даних про температуру і місцезнаходження з міркувань безпеки, коли для легкої митної обробки необхідно довести цілісність контейнера та забезпечити видимість ланцюга постачання, як, наприклад, сертифікат Європейського уповноваженого економічного оператора [35].

Усі зазначені сторони віддають перевагу «живим даним», щоб забезпечити свіжість, цілісність товарів, і можливість негайно реагувати на потенційні проблеми. Отримання цих даних асимілюється в мережі датчиків, щоб забезпечити актуальність даних, що вимагає розгортання спеціальних конфігурацій і багатостороннього прямого доступу до вузла.

1.3 Визначення напрямків подальшої роботи

У ході виконання поточного аналізу визначено, що основними напрямками подальшого опрацювання є перспективні технології IoT, що використовуються для відстеження в логістичних процесах, а також можливості щодо реалізації потенціалу бездротових пристроїв IoT для взаємодії з системами логістичного моніторингу.

Як зазначалося вище, Інтернет речей дуже широко використовується в логістичних процесах, що підтверджується відповідними звітами компаній DHL і Cisco [30]. Так, відстеження за допомогою IoT починається з використання доступних RFID-міток або інших бездротових засобів на рівні товару чи палети. Склади, логістичні центри, контейнери та транспортні засоби часто можуть бути оснащені бездротовою мережею датчиків для моніторингу таких змінних, як температура, вологість, освітленість та механічні удари. Принаймні інформація про місцезнаходження вантажу зазвичай ділиться між залученими сторонами, і розробляються додаткові варіанти використання для інших мереж датчиків даних. Системи, які використовуються для відстеження, як правило, пропрієтарні та дуже різноманітні. Відсутність світових стандартів наразі дещо обмежує прогрес у цій сфері.

Бездротовий пристрій IoT здатен взаємодіяти з системою відстеження власного процесу доставки. Основна вимога для цього полягає в тому, щоб пристрій використовував ті самі стандарти зв'язку, які використовує постачальник логістичних послуг. Оскільки основна ідентифікація в здійснюється за допомогою пасивних RFID-міток, найкращим напрямком робіт є взаємодія з бездротовими сенсорними мережами. БСМ можуть бути присутні на складах і в логістичних центрах (порт, митниця тощо). Навіть усередині контейнера може бути розгорнута певна БСМ.

Таким чином, Bluetooth LE і ZigBee є найбільш перспективними технологіями зв'язку для обговорюваних задач, з огляду на їх низьке

енергоспоживання під час використання БСМ і широке застосування з цієї причини. Однак архітектура програмного забезпечення також має бути сумісною.

Також важливим питанням є визначення зацікавлених сторін та функціонал розроблюваного пристрою. Так, залежно від властивостей БСМ пристрій можна розглядати як окремий сенсорний вузол у ширшій сенсорній мережі або такий, що утворює сенсорну мережу підключення власнику локальної мережі. Мотивація для взаємодії пристрою з певною частиною логістичної системи полягає в основному в тому, щоб отримати доступ до Інтернету для доставки власних даних від датчиків для відстеження в режимі реального часу власником пристрою.

2 ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ РОЗРОБЛЮВАНОГО ПРИСТРОЮ ЛОГІСТИЧНОГО СУПРОВОДУ ВАНТАЖІВ

2.1 Блок керування

2.1.1 Платформа ESP32

Блок управління є центральним компонентом всього комплексу, оскільки він обробляє виміряні дані від вхідних периферійних пристроїв і готує їх для подальшої відправки. Серед головних вимог до цього модуля, перш за все, низьке енергоспоживання. Цій вимозі відповідає модуль ESP32 китайської компанії Espressif Systems. Ця компанія займається виробництвом мало енергетичних, але потужних мікроконтролерів з Wi-Fi і Bluetooth. Модуль ESP32, разом зі своїм попередником, ESP8266, є одним із найвідоміших IoT-продуктів. Модуль ESP32 доступний у кількох версіях, які відрізняються багатьма аспектами та призначені для різних видів використання. Останнім часом нові моделі цього чіпа також виходять на перший план, а саме версії ESP32-S2, S3 і ESP32-C.

Основною причиною, чому для вирішення задач поточної роботи був обраний модуль ESP32, є його режим глибокого сну, коли споживання модуля падає до порядку мкА (що відповідає вимогам роботи щодо мінімізації споживання). Також важливими факторами є низька закупівельна ціна і висока доступність обладнання.

ESP32-WROOM-32 – це найпоширеніша і відома версія ESP32, яка була випущена на ринок як одна з перших версій цього модуля. Останній випуск цієї версії (ESP32-WROOM-32E [36] (рис. 2.1), 4 MB Flash) використовується як частина робочого рішення.

Технічна характеристика WROOM-32E є наступною:

– напруга живлення від 3 В до 3,6 В (зазвичай 3,3 В);

- логіка напруги зазвичай 3,3 В;
- 240 МГц двоядерний мікроконтролер Xtensa LX6;
- 448 кБ ROM;
- 520 кБ SRAM;
- 16 кБ RTC;
- до 16 МБ Flash;
- Wi-Fi з підтримкою стандартів IEEE 802.11 b/g/nv діапазону 2,4 ГГц;
- Bluetooth (класичний і з низьким енергоспоживанням);
- 34 контакти GPIO (підтримка таких інтерфейсів, як UART (3×), SPI, I2C, I22; A/D і D/A-перетворювачі, сенсорні датчики).



Рисунок 2.1 – Модуль ESP32-WROOM-32E [36]

Для живлення модуля ESP32 необхідно, щоб вхідна напруга була в діапазоні від 3 В до 3,6 В. З цієї причини вхідна напруга повинна бути стабілізована до попередньо вибраного рівня. Для цього був обраний стабілізатор напруги TLV75733PDBVR [37] від Texas Instruments, який стабілізує вхідну напругу до рівня 3,3 В. Вихідна напруга від цього стабілізатора також використовується як вхідна напруга на плату з модулем Quectel BG77 і як джерело напруги для підключених датчиків.

Основні параметри регулятора напруги:

- діапазон вхідної напруги від 1,45 В до 5,5 В;

- вихідна напруга 3,3 В;
- мінімальна різниця напруг IN/OUT 100 мВ (при споживаному струмі 300 мА);
- максимальний вихідний струм до 1 А.

2.1.2 Блок живлення пристрою

Через особливості пристрою він повинен працювати від акумулятора. Одна лише батарея змогла б жити пристрій протягом певного періоду часу, але потім вона розрядилася б і пристрій потрібно було б зарядити вручну. З цієї причини до акумулятора підключається ланцюг зарядки, за допомогою якого він буде заряджатися. Джерелом енергії в цьому випадку буде сонячна панель.

В якості основного джерела енергії була обрана Li-Ion акумуляторна батарея. Зокрема, був обраний доступний акумулятор ICR18650-26F від Samsung (рис. 2.2).

Основні параметри акумулятора:

- номінальна ємність 2600 мАг;
- номінальна напруга 3,7 В (діапазон 2,75 - 4,2 В);
- кількість циклів зарядки 350;
- максимальний зарядний струм 2,6 А;
- максимальний струм розряду 5,2 А;
- діапазон температур від 0 до +45 °С (зарядка), від -20 °С до +60 °С (розрядка);
- розміри 18 мм х 65 мм (ш х г).

Оскільки акумулятор у базовій версії не забезпечений жодним захистом від перезаряду, недозаряду та короткого замикання, його використання може бути небезпечною. З цієї причини була обрана версія з інтегрованою схемою захисту, яка усуває вищезазначені недоліки. Розмір батареї, таким чином, на

кілька міліметрів більше, тому потрібно це враховувати при виборі відповідного тримача.



Рисунок 2.2 – Літій-іонний акумулятор Samsung ICR18650-26F [38]

Загалом, більша частина ємності батареї вичерпується приблизно в той момент, коли напруга батареї падає до рівня 3,6 В. У даному випадку ця напруга береться за межу і акумулятор не повинен розряджатися нижче цього рівня протягом тривалого часу, інакше в цьому випадку він може бути пошкоджений. Це досягається за допомогою програмної реалізації, коли напруга акумулятора вимірюється нижче 3,6 В, пристрій переходить у режим сну, доки акумулятор не буде заряджено вручну. Однак цій проблемі запобігає використання сонячної батареї, тому зазначена проблема не має виникнути.

Схема зарядки буде така, для акумуляторних батарей був обраний чіп BQ24074 [38] від Texas Instruments. Він працює за принципом відключення і підключення акумулятора, що зберігає йому термін служби. Якщо енергія, що постачається джерелом, достатньо велика, щоб покрити споживання всього пристрою, акумулятор від'єднується, і пристрій живиться лише від зовнішнього джерела (у даному випадку сонячної панелі). Якщо подається потужність більша, ніж споживає пристрій, залишок заряджає акумулятор. Якщо споживання пристрою починає збільшуватися, чіп зменшить зарядний струм, щоб покрити споживання пристрою. Таким чином, покриття споживання пристрою має пріоритет над заряджанням акумулятора. У

випадку, якщо подається недостатньо енергії або присутнє раптове збільшення споживання, схема може негайно підключити батарею, яка замінить джерело.

Основні параметри зазначеної схеми:

- максимальна вхідна напруга 10,2 В;
- вихідна напруга 4,4 В або напруга акумулятора;
- максимальний вхідний струм 1,6 А;
- максимальний зарядний струм 1,5 А;
- максимальний вихідний струм 5 А (з акумулятором).

В якості відповідної сонячної панелі, яка може витримувати зовнішні умови та здатна постачати достатню кількість електроенергії, зберігаючи прийнятний розмір, прийнято панель компанії Voltaic серії P124 [39] (рис. 2.3).

Це монокристалічна сонячна панель з обробкою поверхні ETFE, що робить сонячну панель дуже довговічною та надає здібність витримувати несприятливі зовнішні умови.

Основні параметри сонячної панелі:

- ступінь захисту IP67;
- стійкість до УФ-випромінювання (5-7 років);
- ефективність 22+%;
- максимальна напруга 6,07 В;
- максимальний струм 0,2 А;
- максимальна потужність 1,22 Вт;
- розміри 66 мм × 113 мм × 2,6 мм (ш×в×г).

При заявленій ефективності та максимальному коефіцієнті потужності панель повинна видавати приблизно 260 мА, однак це значення залежить від багатьох факторів, будь то орієнтація панелі відносно сонця, сила сонячного випромінювання або, останнє, але не менш важливе – чистота поверхні самої панелі.

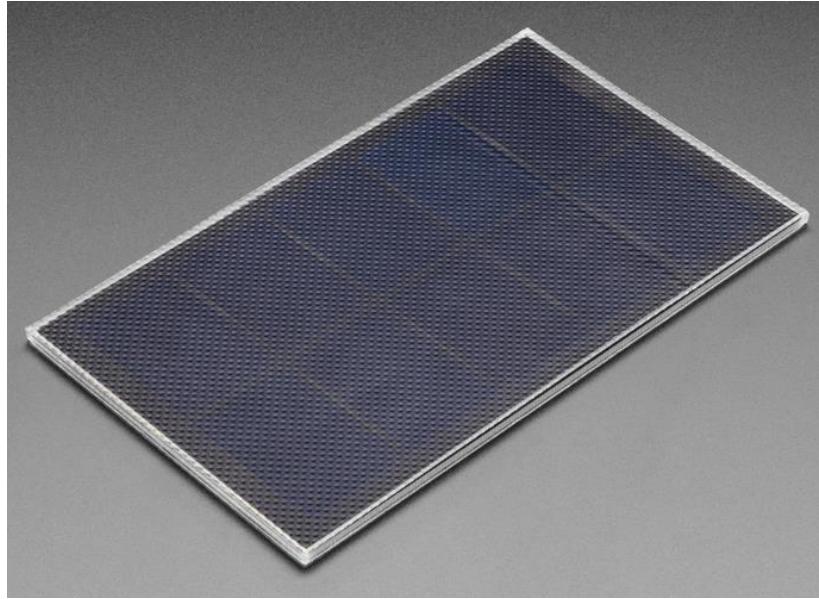


Рисунок 2.3 – Сонячна панель Voltaic P124 [40]

Відповідно до задач поточної роботи, передбачається, що пристрій буде ввімкнено лише на кілька хвилин або десятків хвилин на день, тому цієї панелі цілком достатньо для поповнення втрат ємності акумулятора.

2.2 Датчики та додаткові елементи

2.2.1 Датчики

Однією з вимог роботи є здатність пристрою вимірювати такі величини, як температура, вологість та тиск. На ринку представлений широкий асортимент таких датчиків, які відрізняються один від одного параметрами, вимірюваними величинами, точністю їх вимірювання, діапазоном, величиною напруги живлення, енергоспоживанням та ціною.

Було кілька варіантів на вибір, але остаточним вибором є датчик BME280 [41] від Bosch (рис. 2.4), що поєднує в собі можливість вимірювання температури, вологості і, крім того, тиску.

Параметри датчика:

- вимірювання температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- вимірювання вологості від 0 до 100% ($\pm 2\%$);

- вимірювання тиску від 300 ГПа до 1100 ГПа ($\pm 1,4$ гПа);
- робоча напруга від 1,71 В до 3,6 В;
- енергоспоживання мкА;
- протокол зв'язку I2C або SPI.



Рисунок 2.4 – Датчик температури, вологості та тиску BME280 [9]

Датчик можна знайти в декількох варіантах. Перший з них – це варіант чистого чіпа, для якого необхідно створити схему, щоб використовувати датчик. Другий варіант – це вже готова плата, яка містить усі необхідні компоненти для нормального функціонування. Оскільки ці плати містять непотрібні компоненти, такі як LDO-регулятор і перетворювач логічного рівня, до конструкції самої плати підійшли, в основному, з міркувань енергозбереження.

Ще однією вимогою роботи є розробка механізму, який виявляє затоплення певної території водою або підвищений рівень у ній. В даному випадку найпростішим і ефективним варіантом є використання механічного вимикача, який реалізується за допомогою двох роз'єднаних в нормальних умовах провідників. Якщо рівень води підвищиться, контакти з'єднаються за рахунок її провідності і мікроконтролер зафіксує зміну стану напруги на виводі GPIO.

Також в системі передбачено магнітний вимикач (геркон), який використовується для визначення зміни стану відкривання або закривання

дверей контейнера (рис. 2.5). Загалом, це простий механічний перемикач, який управляється магнітним полем. Геркон складається з двох феромагнітних елементів, які поміщені в скляну герметично закриту трубку. Якщо на перемикач починає діяти досить сильне магнітне поле, феромагнітні виступи намагнічуються, що призводить до притягування один одного. Таким чином створюється провідне з'єднання. Якщо магнітне поле прибрати, контакти знову розмикаються. Цей принцип поширюється на тип контакту «нормально відкритий (NO – Normally open)». Тип контакту «нормально замкнутий (NC)» працює навпаки. Без прикладеного магнітного поля вимикач замкнутий, а коли магнітне поле прикладене, вимикач розімкнений.



Рисунок 2.5 – Магнітний вимикач типу 1NO+1NC, RE11-SA03 [42]

В роботі використовується контакт типу NC, так як бажано, щоб при закритих дверях через вимикач не проходив струм (на виступи діє магнітне поле). В момент, коли двері відкриваються, струм починає протікати по ланцюгу, і контакт GPIO модуля ESP32 здатний виявити зміну напруги та реагувати відповідно.

Не менш важливий пристрій має бути здатним реагувати на зовнішні подразники, такі як різкі рухи, падіння або вібрації. Після ретельного пошуку можливих рішень було обрано найпростіший варіант, а саме використання датчика вібрації, який здатний виявити згадані явища. Датчик складається з

двох проводів (рис. 2.6). Навколо головного (центрального) провідника обмотується пружина (другий провід). За нормальних умов пружина знаходиться в стані спокою і не торкається центрального провідника, тому ланцюг розімкнений. Коли до датчика прикладається зовнішня сила, пружина коливається і торкається основного провідника. У цей момент ланцюг замикається, по ньому починає протікати струм і модуль ESP32 фіксує зміну стану напруги.

Був вибір між трьома варіантами чутливості, кожен з яких відрізняється силою пружини (чим чутливіші рухи, які реєструються, тим тонша пружина). На рис. 2.6 наведено зовнішній вигляд відповідного датчика. Це «швидкий» варіант, який міститься в герметичному корпусі. Цей варіант здатний сприймати навіть найтонші поштовхи, такі як легке натискання пальцем. Вибраний датчик є ненаправленим, тому неважливо, з якого боку діє сила.



Рисунок 2.6 – Датчик вібрації SW-18010P [43]

У засобах, що працюють від акумулятора, корисно мати контроль стану акумулятора. Оскільки відповідний стан не можна виміряти безпосередньо, його необхідно визначити опосередковано за значенням напруги, виміряної на акумуляторі. Так, вимірювання напруги батареї реалізовано за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача модуля ESP32. Перетворювач має перемикатись на діапазон напруги, в якому він може здійснювати вимірювання. Його максимальне значення становить 3,3 В. Оскільки максимальна напруга акумулятора може досягати рівня до 3,6 В, необхідно

використовувати дільник напруги. Точність конвертера вибирається в діапазоні від 9 біт до 12 біт, але в даному випадку для більш точних результатів використовується 12-бітна роздільна здатність. Щоб уникнути непотрібних втрат ємності батареї, напруга подається на дільник напруги лише тоді, коли потрібно здійснити вимірювання.

2.2.2 Модуль супутникового зв'язку Iridium 9602

Для передачі даних по супутниковій мережі був обраний модуль Iridium 9602 [44] (рис. 2.7). Це продукт американської компанії Iridium Communications. Назва компанії походить від хімічного елемента іридію з протонним числом 77, що мало означати кількість супутників компанії на орбіті Землі. Зрештою, однак, лише 75 супутників цієї компанії обертаються навколо Землі, із них 66 супутників активні, 9 служать резервними одиницями на випадок надзвичайної ситуації, а ще 6 супутників розміщено на землі. Загалом кількість супутників Iridium становить 81.



Рисунок 2.7 – Модуль супутникового зв'язку Iridium 9602 [44]

Супутники обертаються навколо Землі по шести орбітах (6×11 супутників) на рівні низької орбіти, приблизно на висоті 780 км. Вони здатні обігнути Землю приблизно за сто хвилин, тому їх швидкість становить

приблизно 27 000 км/год. Полозицію супутників можна відстежувати в Інтернеті [45]. Супутникова мережа Iridium унікальна тим, що вона охоплює всю планету Земля у будь-який момент часу, включаючи океани, полярні регіони та повітряні маршрути.

Мережа Iridium пропонує багато послуг, включаючи дані та голос. Одним із них є Iridium Short Burst Data (SBD), який використовується для надсилання та отримання даних малого розміру. Цей сервіс підтримується модулем Iridium 9602 і використовується в даній роботі. Зв'язок між кінцевими станціями на Землі і супутниковою мережею здійснюється на частотах в діапазоні від 1616 МГц до 1626,5 МГц. Ці частоти потрапляють у так званий діапазон L (1-2 ГГц). Тоді зв'язок між окремими супутниками та центральними станціями на Землі відбувається в діапазоні K (на певних частотах у діапазоні 18-27 ГГц).

Нова версія модуля – це версія 9603, яка має чверть обсягу порівняно з попередником і займає половину початкової площі. Що стосується функції з версії 9602 суттєво не відрізняється, тому було обрано старішу версію, яка є доступнішою.

Параметри модуля Iridium 9602:

- робоча напруга 5 В;
- напруга логіки 3,3 В;
- піковий струм при передачі даних 1,5 А;
- 1×UART для зв'язку за допомогою AT-команд.

DC/DC перетворювач.

Для коректної роботи супутникового модуля Iridium 9602 необхідне джерело, здатне забезпечити напругу 5 В і силу струму до 1,5 А (для покриття піків струму при передачі даних). Оскільки акумулятор здатен забезпечити максимум 4,2 В, необхідно використовувати перетворювач напруги. Як перетворювач напруги обрано інтегральну схему TPS61032PWP [46] від компанії Texas Instruments.

Параметри перетворювача напруги:

- діапазон вхідної напруги від 1,8 В до 5,5 В;
- вихідна напруга 5 В;
- максимальний вихідний струм до 3,2 А (при вхідній напрузі 4,8 В);
- ефективність до 96%.

Перетворювач вмикається лише тоді, коли необхідно передати дані за допомогою модуля Iridium 9602.

В якості антени для підключення до мережі Iridium була обрана пасивна антена компанії Pulse Larsen Antennas з позначенням W3228 [47] (рис. 2.8). Вона має підключатись до пристрою за допомогою кабелю.



Рисунок 2.8 – Антена Pulse W3228 для зв'язку з мережею Iridium [48]

Основні параметри антени:

- діапазон частот від 1617 МГц до 1625 МГц;
- основна частота 1621 МГц;
- поляризація RHCP;
- номінальний опір 50 Ом;
- пікове посилення 1,8 дБі;
- ефективність 84%.

2.2.3 Мобільний комунікатор Quectel BG77

В якості блоку мобільного зв'язку обрано модуль Quectel BG77 [49] від однойменної компанії Quectel (рис. 2.9). Модуль вийшов на ринок у 2020 році. Він є низькоенергетичним, який використовується для передачі даних за

технологією LTE-M або NB-IoT. Перевагою цього модуля є підтримка сервісу GNSS, який використовується для позиціонування по всьому світу. Ця функція також використовується в поточній роботі.

Основні параметри комунікатора:

- напруга живлення від 2,6 В до 4,8 В (зазвичай 3,3 В);
- напруга логіки 1,8 В;
- стек протоколів NB-IoT відповідно до редакції 14 3GPP;
- швидкість передачі LTE категорії NB2 до 127 кбіт/с DL, до 158,5 кбіт/с UL;
- підтримка протоколів TCP, UDP, FTP(S), HTTP(S), PING;
- підтримка системи GNSS – GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS;
- 1×USB 2.0;
- 3×UART для зв'язку за допомогою AT-команд.

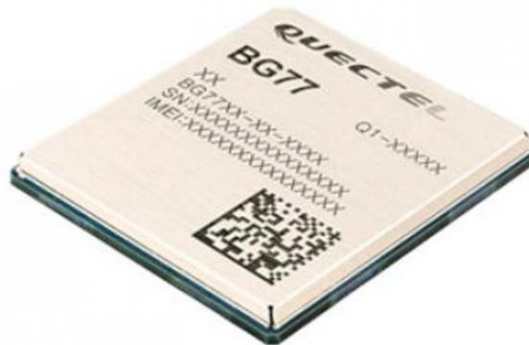


Рисунок 2.9 – Мобільний комунікатор Quectel BG77 [49]

Під час розробки використовувалася технологія NB-IoT. Ця технологія також набула значного поширення у світі [50].

Оскільки ESP32 працює з напругою логіки 3,3 В, а Quectel BG77 – з відповідною напругою у 1,8 В, існує необхідність конвертації між цими рівнями. Для цього був обраний перетворювач логічного рівня TXS0108EPWR [51] від Texas Instruments. Це 8-бітний двонаправлений перетворювач, який підходить для перетворення між різними рівнями напруги інтерфейсу UART.

Основні параметри перетворювача:

- діапазон вхідної напруги (канал А) від 1,4 В до 3,6 В;
- діапазон вхідної напруги (канал В) від 1,65 В до 5,5 В.

Для коректної роботи описаного вище перетворювача необхідний джерело живлення з напругою 1,8 В. Для цього використовується обраний стабілізатор напруги TPS7A0318DBVR [52] від Texas Instruments.

Основні параметри регулятора напруги:

- діапазон вхідної напруги від 1,5 В до 6 В;
- вихідна напруга 1,8 В;
- мінімальна різниця напруг IN/OUT 50 мВ.

Оскільки для роботи технології NB-IoT потрібна SIM-карта, її необхідно підключити до модуля Quectel. В рамках роботи був обраний тримач microSIM TE 2199337-5 [53].

В якості антени для підключення до мережі NB-IoT була обрана антена Linx Technologies з маркуванням ANT-B20-CW-QW-SMA [54] (рис. 2.10). Ця антена налаштована на діапазон LTE.



Рисунок 2.10 – Антена ANT-B20-CW-QW-SMA
для зв'язку з мережами NB-IoT [54]

Основні параметри антени:

- діапазон частот від 790 МГц до 870 МГц;
- основна частота 826 МГц;
- поляризація лінійна;
- номінальний опір 50 Ом;
- пікове посилення 1,6 дБі;
- ефективність 63%.

Антенa підключається зовнішнім кабелем, поза контейнером.

В якості антени для підключення до мережі GPS була обрана пасивна антенa Taoglas CGGP.25.4.E.02 [55], яка підключається до пристрою за допомогою кабелю (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – GPS антенa CGGP.25.4.E.02 [55]

Основні параметри GPS-антени:

- діапазон частот від 1574,4 МГц до 1576,44 МГц;
- основна частота 1575,42 МГц;
- поляризація лінійна;
- номінальний опір 50 Ом;
- пікове посилення 5,39 дБі;
- ефективність 88,02%.

2.3 Методи комунікації складових комплексу

2.3.1 Програмне середовище Eagle

Для проектування принципової схеми пристрою доцільно використовувати програмне середовище Eagle [56], розроблене Autodesk.

2.3.2 Структурна схема системи

На рис. 2.12 наведено блок-схему, що демонструє, як з'єднані окремі частини пристрою.



Рисунок 2.12 – Спрощена блок-схема підключення

2.3.3 Підключення зарядного модуля

Підключення ланцюга зарядки здійснюється за стандартною схемою, вказаною виробником. Схема містить два світлодіоди стану, за допомогою яких можна контролювати стан вхідної напруги (вивід PGOOD) і стан зарядки (вивід CHG) (рис. 2.13). Якщо вхідна напруга вища за напругу акумулятора, загоряється світлодіод PGOOD. Світлодіод CHG світиться, коли акумулятор заряджається. Як тільки діод згасне – зарядка завершена.

Номинал резистора R1 використовується для встановлення струму зарядки (вивід ISET). Його значення вибрано рівним 4,3 кОм, що відповідає максимальному струму зарядки приблизно 0,2 А.

Резистор R2 служить для обмеження величини вхідного струму (вивід ILIM). Його номінал становить 3 кОм, що відповідає струму приблизно 0,5 А. Як вхідний роз'єм, в який буде підключатися сонячна панель, використовується 2,1 мм DC jack.

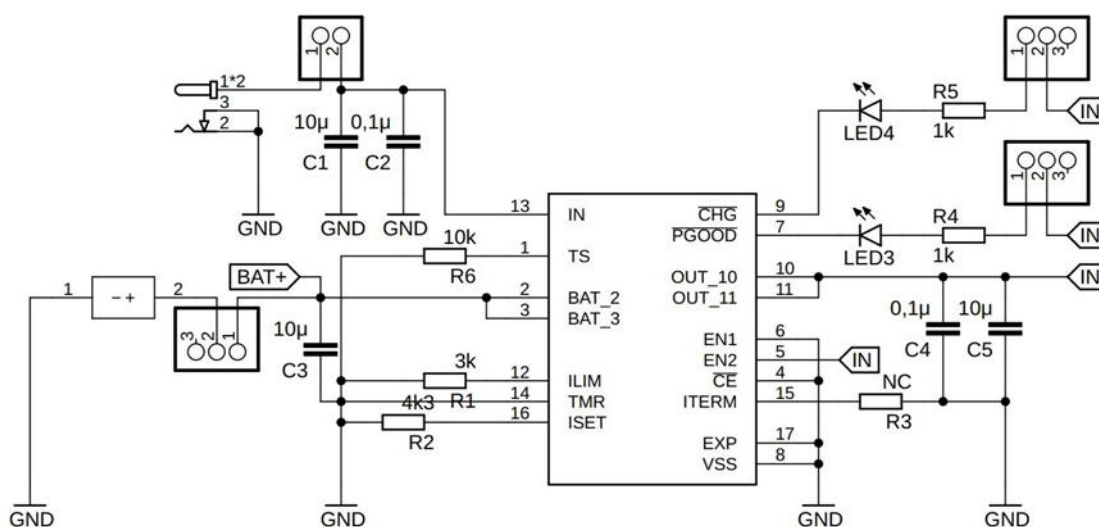


Рисунок 2.13 – Схема підключення зарядного модуля

2.3.4 Підключення модуля ESP32

Модуль ESP32 підключається за допомогою стабілізатора напруги з виходу схеми зарядки, до вихідної напруги 3,3 В (рис. 2.14).

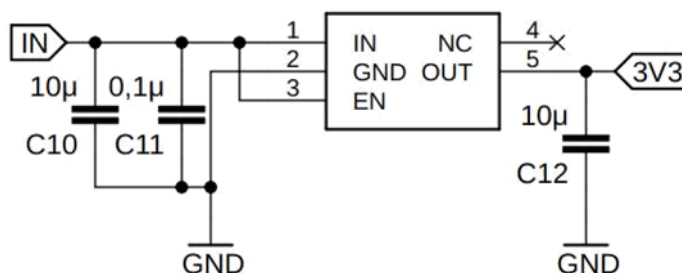


Рисунок 2.14 – Схема підключення стабілізатора 3,3 В

Також, два керамічних конденсатора підключені між контактом 3V3 модуля ESP32 і землею. Перший з них – блокуючий конденсатор 0,1 мкФ. Другий конденсатор – 22 мкФ використовується для покриття піків струму.

Для потреб зв'язку з пристроєм, будь то для завантаження прошивки, її налагодження або введення вхідних параметрів під час роботи програми, необхідно мати можливість встановити з'єднання з ним через комп'ютер. Це досягається використанням послідовної лінії модуля ESP32. Сучасні комп'ютери більше не пропонують можливість прямого підключення послідовної лінії, тому необхідно використовувати конвертер USB/UART.

Одним з таких конвертерів є, наприклад, WaveShare [57] (рис. 2.15), що містить інтегральну схему CP2102, яка зазвичай використовується в наборах розробки ESP32-DevKitC.



Рисунок 2.15 – Конвертер WaveShare з IC CP2102 [57]

Для зв'язку між комп'ютером і пристроєм потрібні три контакти: TX (передавання даних), RX (отримання даних) і GND (земля). Перетворювач також пропонує опцію джерела живлення (можна змінювати між 3,3 і 5 В). У даному випадку цей варіант не використовується, на платі присутні лише три вищезазначених виводу, які використовуються для її підключення. На рис. 2.16 можна побачити підключення лінії UART. Вивід ESP32_TX підключений до виводу TX модуля ESP32, подібно до виводу RX. Для забезпечення зв'язку

з комп'ютером до цих контактів підключається вже згаданий USB/UART конвертер.

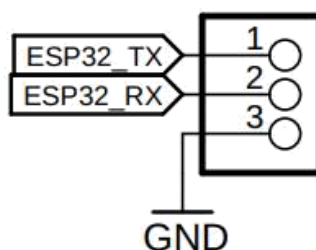


Рисунок 2.16 – Схема підключення UART

Розглянемо процес підключення кнопок.

На платі передбачено дві кнопки. Перша – це кнопка увімкнення. У випадку, коли кнопка не натиснута, на контакті EN модуля ESP32 є підтягуючий резистор. При натисканні кнопки контакт EN заземлюється і пристрій вимикається. Таким чином, цю кнопку можна використати для перезапуску модуля (натиснувши її короткочасно) (рис. 2.17).

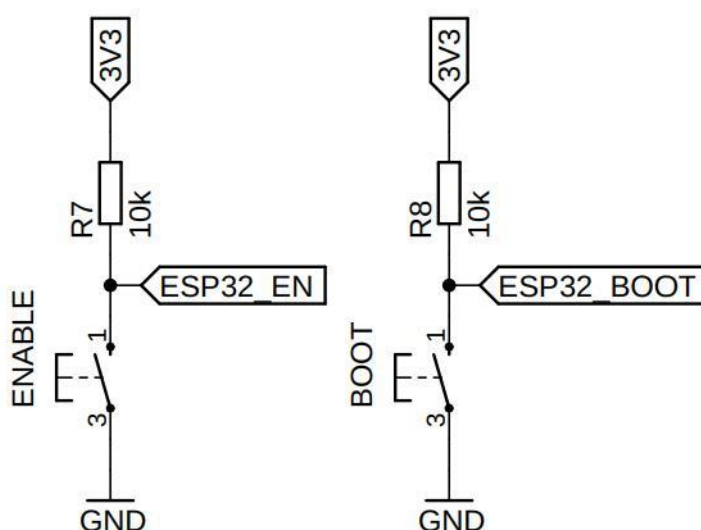


Рисунок 2.17 – Схема підключення кнопок ENABLE і BOOT

Друга кнопка призначена для переведення модуля ESP32 в режим програмування. Напряга знову подається на вивід GPIO0 за допомогою

підтягуючого резистора, який підтримує вивід у стані HIGH. Коли контакт GPIO0 підключено до землі за допомогою кнопки та пристрій переходить у режим програмування.

Процес з'єднання комутаційних ланцюгів контролю акумулятора.

Щоб уникнути непотрібних втрат ємності батареї, використовується відповідна схема комутації (рис. 2.18). Ця функція забезпечується комбінацією N-канальних і P-канальних транзисторів MOSFET, якими керує вихідний контакт GPIO модуля ESP32. У випадку, коли вихід виводу GPIO встановлений як логічний нуль, транзистори закриті і напруга на вихід не подається (нульове споживання). У момент, коли стан GPIO змінюється, транзистори відкриваються, таким чином певні частини отримують напругу і починають працювати.

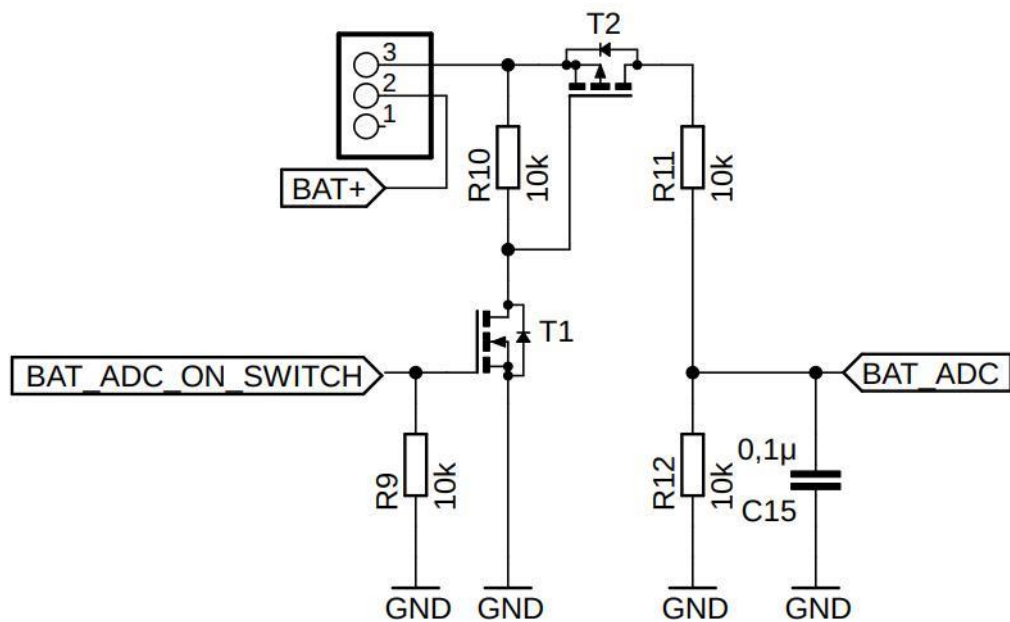


Рисунок 2.18 – Схема комутації для вимірювання стану батареї

Так, схема використовується для вимірювання напруги акумулятора. Як зазначалося раніше, вимірювання стану джерела реалізовано за допомогою ділника напруги. Цей ділник складається з двох резисторів. Це гарантує, що максимальний рівень напруги акумулятора (4,2 В) зменшується вдвічі для цілей вимірювання, досягаючи максимуму 2,1 В, що знаходиться в межах

діапазону аналого-цифрового перетворювача (3,3 В максимум). Потім напруга акумулятора обчислюється як вимірне значення, з подальшим помноженням на 2. Крім того, між виводом A/D модуля ESP32 і загальною землею паралельно підключений конденсатор ємністю 100 нФ, що служить для підвищення точності результатів вимірювань.

2.3.5 Підключення модуля Iridium 9602

Вся частина супутникового модуля разом з перетворювачем напруги підключається до схеми комутації (рис. 2.19). Це економить заряд батареї, оскільки модуль вмикається лише тоді, коли потрібно передати дані. Коли комутаційна схема включена, вихідна напруга зарядної схеми подається на перетворювач напруги, який потім живить супутниковий модуль. Напруга подається на загалом три контакти, два живлення та один контакт ON/OFF, які можна використовувати для керування статусом увімкнення та вимкнення модуля. У конструкції цей контакт жорстко підключений до лінії живлення, тому модуль вмикається щоразу, коли до нього подається напруга (вмикання та вимикання модуля контролюється схемою перемикачів).

Даний модуль також містить контакти, які можна використовувати для вказівки стану, коли модуль живиться (подається напруга живлення) і коли супутниковий модуль підключений до мережі Iridium. Ці контакти виводяться на плату і можуть бути через перемички підключені до світлодіодів, які і вказують на даний стан. Для мінімізації споживання енергії використовуються перемички. Зв'язок між модулем ESP32 і модулем Iridium 9602 здійснюється за допомогою трипровідної послідовної лінії (TX, RX, GND). Модуль Iridium використовує ті самі рівні напруги для послідовного зв'язку, що й модуль ESP32, тобто 3,3 В. Тому конвертер рівня напруги не потрібен.

Вивід TX модуля Iridium (модуль Iridium отримує дані) підключений до виводу TX модуля ESP32. У випадку з контактом RX аналогія така ж, контакт RX (модуль Iridium надсилає дані) підключений до контакту RX модуля

ESP32. Для підключення антени внутрішній роз'єм модуля (ANT) з'єднується з роз'ємом SMA, винесеним на плату (IRIDIUM ANT).

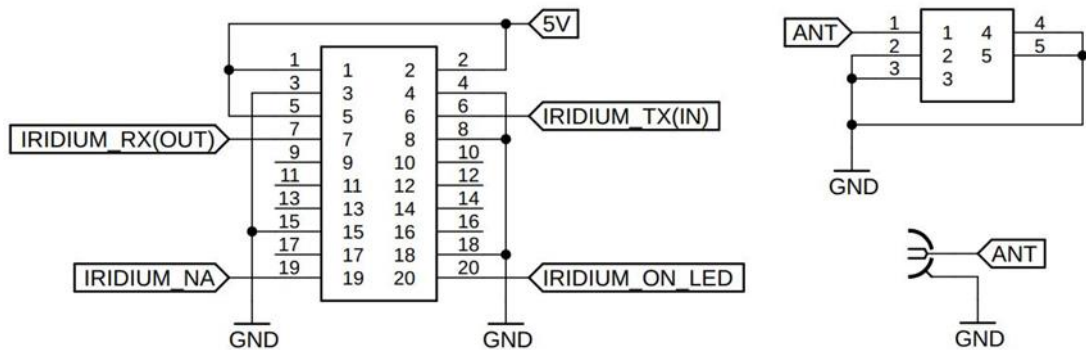


Рисунок 2.19 – Схема підключення модуля Iridium 9602

Підключення DC/DC перетворювача.

Схема має індуктивність L1, через яку проходить струм схеми перетворювача (рис. 2.20). Потрібний номінал обирається відповідно до рекомендацій виробника. Крім того, до перетворювача підключено електролітичний конденсатор C9, який використовується для покриття піків напруги модуля Iridium 9602.

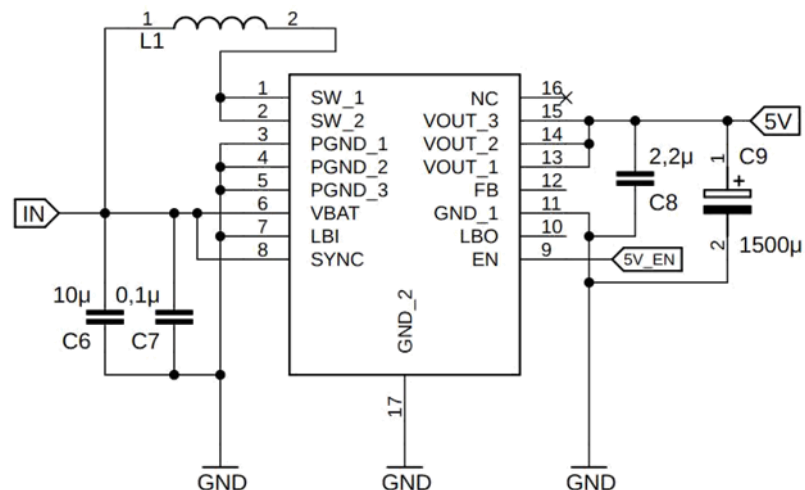


Рисунок 2.20 – Схема підключення DC/DC перетворювача

Перетворювач має можливість працювати в режимі енергозбереження. Цей режим встановлюється за допомогою контакту SYNC, заземлення

контакту активує цей режим. У схемі контакт SYNC підключений до вхідної напруги, головним чином тому, що режим енергозбереження не потрібен, оскільки перетворювач буде вмикатися та вимикатися лише через певні короточасні проміжки часу. Одна з комутаційних схем підключена до контакту EN для вмикання та вимикання перетворювача.

2.3.6 Підключення модуля Quectel BG77

Модуль Quectel живиться від стабілізатора напруги на 3,3 В. Виводи послідовного зв'язку підключені до перетворювача логічного рівня. Крім того, виводиться штифт STATUS, який використовується для сигналізації стану пристрою. Цей вивід з'єднаний разом з виводом NET_STATUS за допомогою перемичок зі світлодіодами, які виводяться на плату. Інший контакт цього модуля – це PWRKEY, який використовується для вмикання та вимикання пристрою. Також є можливість підключення зовнішніх антен для мереж NB-IoT і GPS.

Підключення MicroSIM.

Всього для підключення тримача microSIM використовуються чотири контакти модуля Quectel BG77 (рис. 2.21).

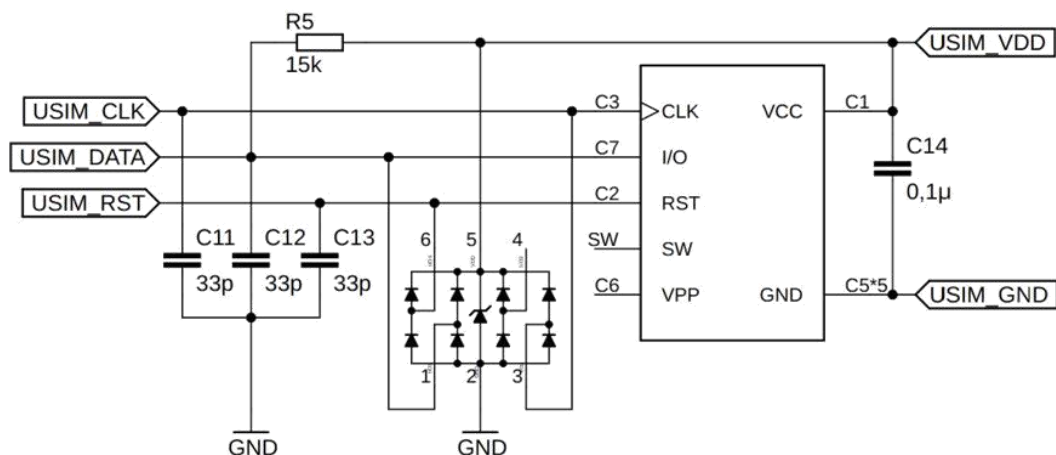


Рисунок 2.21 – Схема підключення тримача SIM-картки

Перший контакт – це живлення USIM_VDD, лінія даних USIM_DATA, джерело синхронізації USIM_CLK і скидання картки USIM_RST.

2.3.7 Підключення датчиків

Підключення датчика BME280.

Вихід GPIO модуля ESP32 використовується як вивід живлення датчика BME280. Вивід GPIO може видавати на виході струм до 40 мА, чого цілком достатньо для потреб цього датчика. При такому способі підключення досягається мінімізація споживання, враховуючи, що датчик вмикається лише в момент вимірювання.

Підтягувальні резистори розміщені між входом напруги та виводами SCL і SDA. Вони є необхідними для коректної роботи послідовної шини I2C.

Пін SDO використовується для вибору шістнадцяткового ідентифікатора пристрою (рис. 2.22).

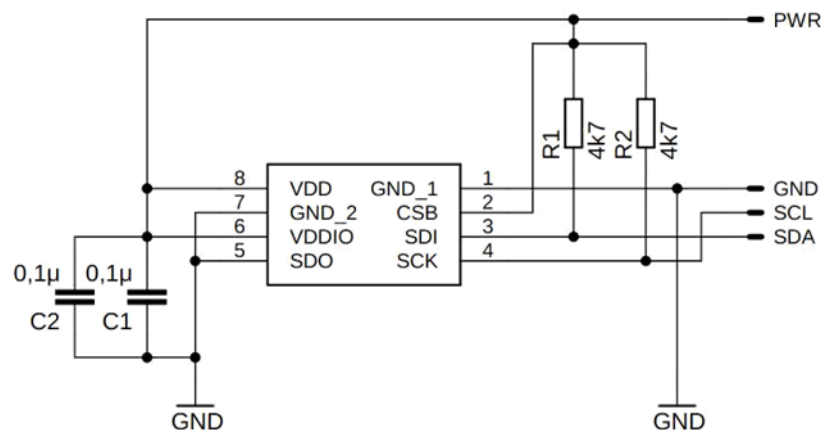


Рисунок 2.22 – Схема підключення датчика BME280

Підключення датчиків виявлення.

Всі три датчики виявлення підключені однаково. Одна сторона уявного перемикача підключена до вихідної напруги 3,3 В стабілізатора LDO, інша сторона підключена до контакту GPIO модуля ESP32 і в той же час він підключений до землі за допомогою підтягуючого резистора.. Коли стан

змінюється, перемикач замикається, а вивід GPIO виявляє логічну одиницю. Оскільки модуль ESP32 повинен мати можливість виявляти зміни стану, навіть коли він перебуває в режимі сну, необхідно підключити ці датчики за допомогою контактів RTC GPIO (контактів, які можуть працювати навіть у режимі сну).

Датчик удару передбачено розташувати безпосередньо на платі, але для датчиків води і магнітного контакту на плату виведені лише роз'єми для їх підключення, так як зазначені датчики мають підключатися зовні.

2.4 Розрахунок показників стійкості

Показники стійкості будуть розраховані для передавальної функції системи, яка включає платформу ESP32, датчики та інші компоненти. Під час розрахунку цих показників враховується вплив кожного компоненту на загальну стійкість системи.

Припустимо, що передавальна функція ESP32 може бути виражена як:

$$W_{ESP32}(s) = \frac{1}{(0,1s + 1)}.$$

Припустимо, що регулятор напруги має передавальну функцію ПІ-регулятора:

$$W_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \text{ де } K_p = 2,0, K_i = 0,5.$$

Передавальна функція блоку живлення може бути виражена як:

$$W_{Power}(s) = \frac{1}{(0,2s + 1)}.$$

Передавальна функція акумулятора:

$$W_{Battery}(s) = \frac{1}{(0,3s + 1)}.$$

Припустимо, що передавальна функція датчиків є:

$$W_{Sensors}(s) = \frac{1}{(0,4s + 1)}.$$

Загальна передавальна функція системи може бути виражена як добуток передавальних функцій всіх компонентів:

$$W_{system}(s) = W_{ESP32}(s) \cdot W_{PI}(s) \cdot W_{Power}(s) \cdot W_{Battery}(s) \cdot W_{Sensors}(s).$$

Об'єднуємо всі передавальні функції для отримання загальної передавальної функції:

$$W_{system}(s) = \frac{(2,0s + 0,5)}{(s \cdot (0,1s + 1) \cdot (0,2s + 1) \cdot (0,3s + 1) \cdot (0,4s + 1))}.$$

Характеристичне рівняння системи можна отримати, прирівнявши знаменник передавальної функції до нуля:

$$s \cdot (0,1s + 1) \cdot (0,2s + 1) \cdot (0,3s + 1) \cdot (0,4s + 1) = 0.$$

Розв'язуємо рівняння:

$$s \cdot (0,1s + 1) \cdot (0,2s + 1) \cdot (0,3s + 1) \cdot (0,4s + 1) = 0.$$

Розв'язок рівняння дає корені:

$$s = 0, -10, -5, -3,3, -2,5.$$

Для оцінки стійкості системи всі корені характеристичного рівняння повинні бути негативними або мати негативні дійсні частини. В даному випадку система має один нульовий корінь і кілька негативних коренів, що вказує на потенційну маргінальну стійкість.

Для додаткової перевірки стійкості системи можна застосувати критерій Гурвіца. Складемо матрицю для коефіцієнтів характеристичного рівняння і знайдемо визначники Гурвіца:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 3,33 & 0 \\ 0 & 0 & 2,5 & 0 \end{vmatrix}.$$

Якщо всі визначники Гурвіца більше за нуль, система є стійкою.

3 РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЮВАНОВОГО КОМПЛЕКСУ ІОТ-МОНІТОРИНГУ

3.1 Реалізація програмної складової комплексу

Нижче наведено опис реалізації програми розроблюваного пристрою логістичного супроводу вантажів. Розробку програми передбачено на мові C++ з використанням фреймворку Arduino для пристроїв ESP32. Написання коду є доцільним в середовищі Visual Studio Code [58] із розширенням PlatformIO.

3.1.1 Протокол даних

Щоб надіслані дані могли бути оброблені на відповідному сервері GINA [59], пристрій повинен надіслати їх у попередньо узгодженому форматі та довжині. З огляду на те, що супутникові мережі також можуть використовуватися для передачі даних, необхідно звернути увагу на довжину надісланого повідомлення, оскільки пересилання даних через ці мережі тарифікується відповідно до розміру надісланих даних. З цієї причини прийнято протокол зв'язку, орієнтований на мінімізацію довжини повідомлення.

Зрештою, мінімізація довжини повідомлення досягається за допомогою двійкового протоколу, який кодує отримані дані в узгоджений формат, щоб мінімізувати їх. Цей же протокол використовується для передачі через мобільні та супутникові мережі. Довжина одного повідомлення становить 31 байт.

Це значення вказує на версію протоколу зв'язку. При розробці враховується, що протокол зв'язку може змінюватися з часом. Тому для підтримки зворотної сумісності додано значення версії, щоб окремі з них можна було відрізнити одна від одної та з ними можна було далі працювати.

Для цього значення зарезервовано 8 біт (1В), а його значення за умовчанням встановлено на 1, тобто 0x01. Значення зберігається в полі «version».

Значення довжини зберігається в полі «len», розмір якого становить 8 біт (1В). Містить кількість байтів усієї структури. Основною метою є полегшення аналізу невідомих версій, але це також може служити для перевірки того, що всі дані було доставлено.

Іншим значенням є рівень заряду акумулятора, який зберігається в полі «batteryLevel». Він виражається за допомогою 8 біт (1В). Значення 0 вказує на розряджену батарею (у випадку використовуваного акумулятора, рівень встановлюється на рівні 3,6 В), значення 100 вказує на заряджену батарею (4,2 В).

Це значення використовується для сигналізації про певні події, які можуть відбутися. Для них зарезервовано 8 біт (1В). Значення зберігається в полі «flags».

Для окремих прапорців зарезервовані один біт:

- 1) 1b – DOOR_OPEN (логічна 1, якщо двері відкриті);
- 2) 2b – CARGO_SHAKING (логічна 1, якщо датчик вібрації виявляє активність);
- 3) 3b – WATER_INTRUSION (логічна 1, якщо датчик води виявляє її наявність);
- 4) 4b – LAST_KNOWN_GPS_POSITION (логічна 1, якщо поточне положення GPS невідоме).

Решта 4 біти зарезервовані для майбутнього використання.

За допомогою цього значення записується позначка часу. Значення зберігається в полі «timestamp». Оскільки це значення представляє 64-розрядний час Unix, для цього значення зарезервовано 8 В.

Температура зберігається в полі «temperature» і має довжину 16 біт (2В). Вона може приймати значення від $-128\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0x0000) до $+127\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0xFFFF).

Вологість знаходиться в полі «humidity» і має довжину 16 біт (2В). Вона вказується значеннями від 0 (0x0000) до 100% (0xFFFF).

Тиск зберігається в полі «pressure» і має довжину 16 біт (2В). Він може приймати значення від 0 ГПа (0x0000) до 6553,6 ГПа (0xFFFF).

Географічне положення у просторі записується з використанням трьох значень, кожне з яких має довжину 32b (4В), загалом 12В. Це поля «latitude», «longitude» і «height».

Останнім полем повідомлення є значення горизонтального зниження точності (англ. HDOP), що зберігається в полі «HDOP», яке сигналізує про точність позиціонування супутника GPS. Розмір цього поля становить 8b (1В) і сигналізує значення від 0 (0x00) до 256 (0xFF).

Визначення структури повідомлення в C++.

Структура відповідного повідомлення наведена нижче.

```

1 typedef struct __attribute__(( packed )) {
2     uint8_t version;
3     uint8_t len;
4     uint8_t batteryLevel;
5     uint8_t flags;
6     uint64_t timestamp;
7     uint16_t temperature;
8     uint16_t humidity;
9     uint16_t pressure;
10    int32_t latitude;
11    int32_t longitude;
12    int32_t altitude;
13    uint8_t HDOP;
14 } Payload.
```

3.1.2 Особливості реалізації програми

На рис. 3.1 наведено спрощену схему виконання програми. Окремі частини програми описані в наступних пунктах. Після запуску програми виконується етап ініціалізації, де відбуваються початкові налаштування. Далі слідує фаза вимірювання даних від датчиків і отримання даних від GPS. Після вимірювання даних здійснюється спроба надіслати їх за допомогою мобільної або супутникової мережі. Після успішної чи невдалої спроби надіслати дані пристрій переходить у режим сну на час, вибраний на етапі ініціалізації. Починаючи з цього етапу, пристрій можна сканувати за допомогою зовнішніх датчиків.

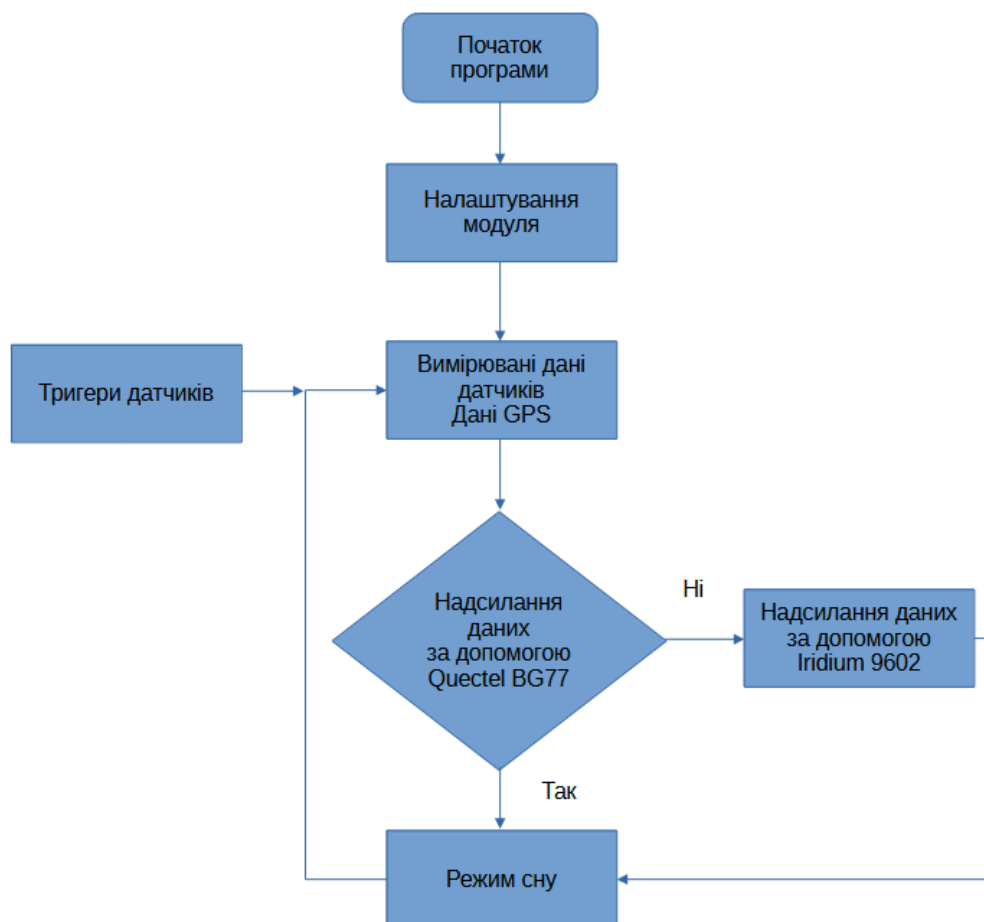


Рисунок 3.1 – Блок-схема програми роботи пристрою логістичного супроводу

Після запуску пристрою настає ініціалізаційна фаза. Ця фаза виконується лише один раз, коли пристрій запускається вперше. У цьому

розділі заданий користувачем інтервал вимірювання встановлюється за допомогою послідовної лінії. Крім того, встановлюються параметри модулів Iridium 9602 і Quectel BG77.

Зв'язок з окремими модулями відбувається через послідовну лінію за допомогою AT-команд [60]. Команди AT – це короткі послідовності символів, починаючи з рядка «AT» і закінчуючи послідовністю «\r\n». Зв'язок із модулями обробляється функцією «sendATCommand()», яка фіксує введену AT-команду, відповідь і максимальний час очікування як вхідні параметри до потрібної відповіді. Останній параметр – це вибір послідовного рядка, з яким має відбутися зв'язок (одна і та ж функція використовується для обох модулів). У разі, якщо модуль ESP32 отримує очікувану відповідь до закінчення максимального часу очікування у відповідь функція повертає «truth», у зворотному випадку – «falsity».

Функції для обробки команди AT наведені нижче.

```

1 sendATCommand (const char command [],
2   const char awaitedReply [],
3   uint32_t maxWaitTime,
4   HardwareSerial & refSer).
```

Перед налаштуванням модуль Iridium 9602 вмикається встановленням виводу «SwitchPinIridium» у стан HIGH (вивід 5V_BOOST_ON_SWITCH на схемі, Додаток А). У свою чергу, модуль Quectel вмикається за допомогою контакту «SwitchPinQuectel» (PCIE_SLOT_QUECTEL_PWRKEY), який потрібно утримувати протягом 900 мс. Після закінчення цього часу контакт потрібно перемкнути назад у стандартний стан LOW. Якщо програма визначить, що один із модулів не під'єднано, пристрій переходить у режим сну, доки модулі не будуть підключені та пристрій не буде перезапущено вручну.

Модуль Iridium 9602 налаштовується за допомогою наступних AT-команд.

- 1) ATE0 – дезактивація функції «local echo». Ця команда гарантує, що модуль на виході послідовної лінії не буде повторювати введену команду.
- 2) AT&D0 – вимкнення сигналу DTR.
- 3) AT&K0 – дезактивація функції «flow control».
- 4) AT&W0 – збереження конфігурації в профілі номеру 0.
- 5) AT&Y0 – встановлення номера профілю, який завантажується при включенні модуля.

Модуль Quectel BG77 налаштовується за допомогою AT-команд, що наведені нижче.

- 1) AT+IFC=0,0 – дезактивація функції «контроль потоку».
- 2) AT+GSN – повернення IMEI модуля.
- 3) AT+CFUN=0 – дезактивація радіочастини.
- 4) AT+QCFG=«nwscanseq» – команда оптимізації, яка служить для прискорення пошуку мережі NB-IoT.
- 5) AT+QCFG= «iotopmode» – команда оптимізації.
- 6) AT+CFUN=1 – активація радіочастини.
- 7) AT+QICSGP=1,1 – налаштування APN.
- 8) AT&W0 – встановлення активної конфігурації за замовчуванням.

Після завершення налаштування обидва модулі вимикаються. Модуль Iridium 9602 за допомогою команди AT*F і модуль Quectel BG77 за допомогою команди AT+QPOWD. Модуль Iridium 9602 також вимикається апаратно. Це досягається шляхом переміщення виводу «SwitchPinIridium» в LOW. При цьому, також вимикає DC/DC-перетворювач.

Наступним кроком програми є перевірка датчиків виявлення. На початку виконання програми значення їх стану зберігаються в змінних. Потім ці значення порівнюються всередині функції «getSensorValues()» і, якщо необхідно, встановлюються певні прапорці. Якщо модуль сканується датчиком виявлення, він може записати номер даного контакту. Це

використовується для порівняння як запобіжник у випадку, якщо модуль ESP32 читає помилку після пробудження, навіть якщо даний датчик справді вивів його з режиму сну.

Після перевірки датчиків виявлення настає етап отримання значень від датчика BME280. За це відповідає функція «getBME280Values()». Щоб увімкнути датчик, необхідно встановити вивід «SwitchPinBME280» (BME280_ON_SWITCH) у значення HIGH. Після встановлення відповідного виводу відбувається перевірка підключення датчика. Якщо так, то вимірюються всі необхідні значення, які згодом налаштовуються на форму, необхідну для надсилання, відповідно до вже згаданого протоколу даних. В іншому випадку ці значення залишаються встановленими за замовчуванням на 0. Датчик вимикається як після успішних, так і після невдалих вимірювань.

Останнім значенням, виміряним модулем ESP32, є стан заряду батареї. Перед вимірюванням цього показника контакт «SwitchPinBatteryADC» (BAT_ADC_ON_SWITCH) повинен бути встановлений на HIGH. Цей крок замикає ланцюг перемикачів та подає напругу акумулятора на дільник. Значення батареї вимірюється за допомогою контакту АЦП модуля ESP32.

Після зворотного розрахунку напруги батареї слідує контрольна умова, яка відповідає за переведення пристрою в режим постійного сну, якщо напруга батареї нижче 3,6 В. Однак конструкція пристрою розроблена таким чином, що ця умова не виконується. У такому випадку акумулятор потрібно буде зарядити вручну та перезапустити пристрій. Якщо ця умова не виконується, виміряне значення перетворюється у придатну форму для надсилання. Після вимірювання значення для контакту «SwitchPinBatteryADC» встановлено значення LOW. Це від'єднає батарею від дільника напруги.

Останнім кроком перед фактичним надсиланням даних є отримання даних із GPS. Це виконується шляхом запуску функції «getPosition()». Після увімкнення модуля Quectel BG77 та активації його частини GNSS (команда AT+QGPS=1) команда AT+QGPSLOC=0 використовується для визначення того, чи було отримано положення GPS. Команда виконується протягом

циклу, який триває максимум 60 секунд. Якщо місцезнаходження GPS отримано, дві AT-команди надсилаються модулю Quectel BG77, який повертає речення NMEA. Ці речення містять більш детальну інформацію GPS, ніж сама команда AT+QGPSLOC=0.

Існує кілька типів речень NMEA, які відрізняються один від одного своїм змістом. Для розбору окремих речень використовується бібліотека «TinyGPSPlus.h». Проаналізовані дані належним чином налаштовуються у форму, готову до надсилання. Перетворення мітки часу з отриманих даних GPS реалізується за допомогою бібліотеки «TimeLib.h». Якщо дані GPS не були отримані, для прапорця LAST_KNOWN_GPS_PO встановлюється значення біта 1.

Після завершення збору даних GPS частина GNSS модуля Quectel BG77 вимикається. Це пояснюється тим, що апаратне забезпечення модуля спільно використовує певні частини, і модуль не може надсилати дані через мобільні мережі, якщо частину GNSS увімкнено.

Надсилання даних поділяється на дві функції. Перша – це функція «sendDataQuectel()», тому пристрій завжди спочатку намагається надіслати дані за допомогою модуля Quectel BG77.

Передача даних через мобільну мережу виконується за пунктами, що наведені нижче.

- 1) Очікування реєстрації в мережі (максимум 60 секунд).
- 2) Активація протоколу пакетних даних.
- 3) Відкриття підключення до сервера (значення за замовчуванням у коді).
- 4) Надсилання даних.
- 5) Очікування підтвердження сервером отримання даних.
- 6) Припинення підключення до сервера.

Якщо будь-який із наведених етапів завершується невдачею, активується функція «sendDataIridium()». У цій функції спочатку заповнюється вихідний буфер модуля Iridium 9602. На наступному кроці

очікується доступність мережі Iridium (максимум 60 секунд). Коли ця мережа стає доступною, пристрій намагається надіслати дані. У деяких випадках надсилання даних може бути невдалим, тому ця функція налаштовується на спробу надіслати дані з трьох спроб (максимум 180 секунд). Вибір кінцевого сервера та порту здійснюється за допомогою запиту, надісланого до Iridium.

Після завершення відправки даних (навіть у разі збою) модуль переходить до режиму сну на час, вказаний користувачем. З цього режиму модуль можна вивести за допомогою датчиків виявлення, про які зазначалось раніше. Після пробудження модуля всі виміряні дані скидаються, і цикл починається заново.

3.2 Розміщення обладнання

3.2.1 Реалізація друкованих плат

Після проектування та розробки загальної схеми з окремих компонентів, що використовуються у пристрої, слід виконати проектування друкованих плат. У зв'язку з тим, що на платах має бути багато компонентів, які складно з'єднати лише на одному шарі, на самому слід використати двошарову технологію виконання.

Окремі компоненти потрібно логічно розташувати так, щоб вони займали якомога менше місця на платі через розмір кінцевого продукту, який повинен бути якомога меншим. Розмір корпусів вибирається з урахуванням зручності ручного паяння, за винятком плати для модуля NB-IoT і датчика BME280, які є у заводському виконанні.

Усі друковані плати мають розроблятися з урахуванням їх довжини, щоб мінімізувати електричний опір. Ширина окремих трас має обиратись пропорційно до максимальної величини струму, який може пройти через них, щоб зменшити можливе нагрівання провідників.

Основна плата повинна мати орієнтовні габарити 200 мм x 100 мм (ШxВ). Всього на платі передбачено вісім монтажних отворів, які забезпечують її нерухомість і стійкість до вібрацій навіть у несприятливих умовах. На головній платі розміститься роз'єм mini PCI-E з гніздом для підключення плати з модулем Quectel BG77. Ця плата має розмір стандартної mini PCI-E, тому її розміри становлять 30 мм x 50,95 мм (ШxВ).

Плата з датчиком BME280 розробляється останньою. На платі передбачено два отвори для кріплення. А розмір має бути в межах 35 мм x 15 мм (ШxВ).

Після того, як окремі друковані плати виконуються у програмному середовищі Eagle [61], слід перейти до їх фізичного виконання, для чого доцільно скористатися послугами компаній, що мають відповідне технологічне обладнання.

3.2.2 Корпус пристрою

З огляду на передбачувану характеристику експлуатації, пристрій потрібно помістити у відповідний корпус, який здатен витримувати зовнішні впливи. Через нетипові розміри розробленого пристрою, одним із варіантів є моделювання та друк корпусу. Для моделювання доцільно використати безкоштовне програмне забезпечення Blender [62]. Відповідна модель має складатись із двох частин: коробки та кришки. Розмір надрукованої моделі разом з кришкою має становити 400 мм x 100 мм x 80 мм (ШxВxГ).

Розмір усіх різьб всередині коробки обрано для гвинтів розміру М4. Ці різьби вплавляються в пластик, щоб запобігти їх скрученню. Корпус також повинен містити чотири отвори для кріплення до стінки контейнера. Ці різьби мають бути сумісними з гвинтами М6.

У випадку, коли немає жорстких обмежень щодо компактності отриманого пристрою, доцільно скористатись заводським рішенням – розмістити електроніку в пластиковому герметичному корпусі (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Корпус для електроніки герметичний

Для підключення антен Iridium і GPS додатково потрібно надрукувати упори, в які будуть вставлятися антени. Ці упори нахилені під кутом 45° . Так гарантується, що при вертикальному з'єднанні корпусу зі стінкою контейнера антени будуть спрямовані до гори.

На торцях корпусу слід виконати два отвори для виведення антени мереж NB-IoT і для виведення кабелів для підключення зовнішніх датчиків. Більший з отворів, який використовується для виходу кабелів із корпусу, займається кабельним виводом PG7, який відповідає стандарту IP67 [63]. У меншому з отворів, яке використовується для підключення антени NB-IoT, має бути встановлено роз'єм SMA, який фіксується до стінки корпусу за допомогою гумових ущільнювальних кілець.

На кришці корпусу має бути тримач для сонячної панелі. Тут також потрібно надрукувати направляючі під 45° , щоб під час роботи панель була спрямована до неба [64]. З цього тримача отвір веде назад до корпусу, який використовується для підключення сонячної панелі до плати. Сонячна панель на корпусі має фіксуватись пазово-клеєвим з'єднанням, щоб забезпечити надійну фіксацію та герметичність.

Уздовж всієї кришки присутня канавка (див. рис. 3.2), в якій розміщений гумовий ущільнювач, що служить для кращої герметичності корпусу. Завдяки

вищезазначеним характеристикам пристрій має відповідати ступеню захисту IP65 (повна пилонепроникність, стійкість до струменів води – три хвилини з відстані трьох метрів).

3.3 Аналіз функціональних характеристик розроблюваного засобу логістичного IoT-моніторингу

Останньою частиною поточної роботи є формування рекомендацій щодо тестування розроблюваного засобу. Так, при тестуванні всіх зазначених функцій необхідно врахувати характер комунікаційних та експлуатаційних обмежень, характерних для морського виду транспорту.

Тестування передбачено із застосуванням GINA Software [59]. На стороні програмного забезпечення GINA надіслані дані аналізуються та зберігаються відповідно до ідентифікатора IMEI, який є частиною вхідного пакету. У разі надсилання даних модулем Iridium 9602 IMEI є частиною заголовка пакета, у випадку модуля Quectel BG77 IMEI вставляється як частина корисного навантаження. Таким чином, програма може визначити, чи надійшли дані через мобільну чи супутникову мережу.

Під час тестування пристрій потрібно розмістити зверху транспортного засобу та рухатись близько години. Інтервал пробудження пристрою слід встановити на одну хвилину. Потрібно слідкувати, щоб не було втрати зв'язку під час надсилання даних, коли пристрій перебуває у русі. Якщо стільникове покриття на території тестування буде на відповідному рівні, то першочергово всі дані відправлятимуться за допомогою мережі NB-IoT, модулем Quectel BG77.

У програмі GINA Software, можна побачити місце розташування пристрою та, за необхідності, контрольовані параметри (рис. 3.3).

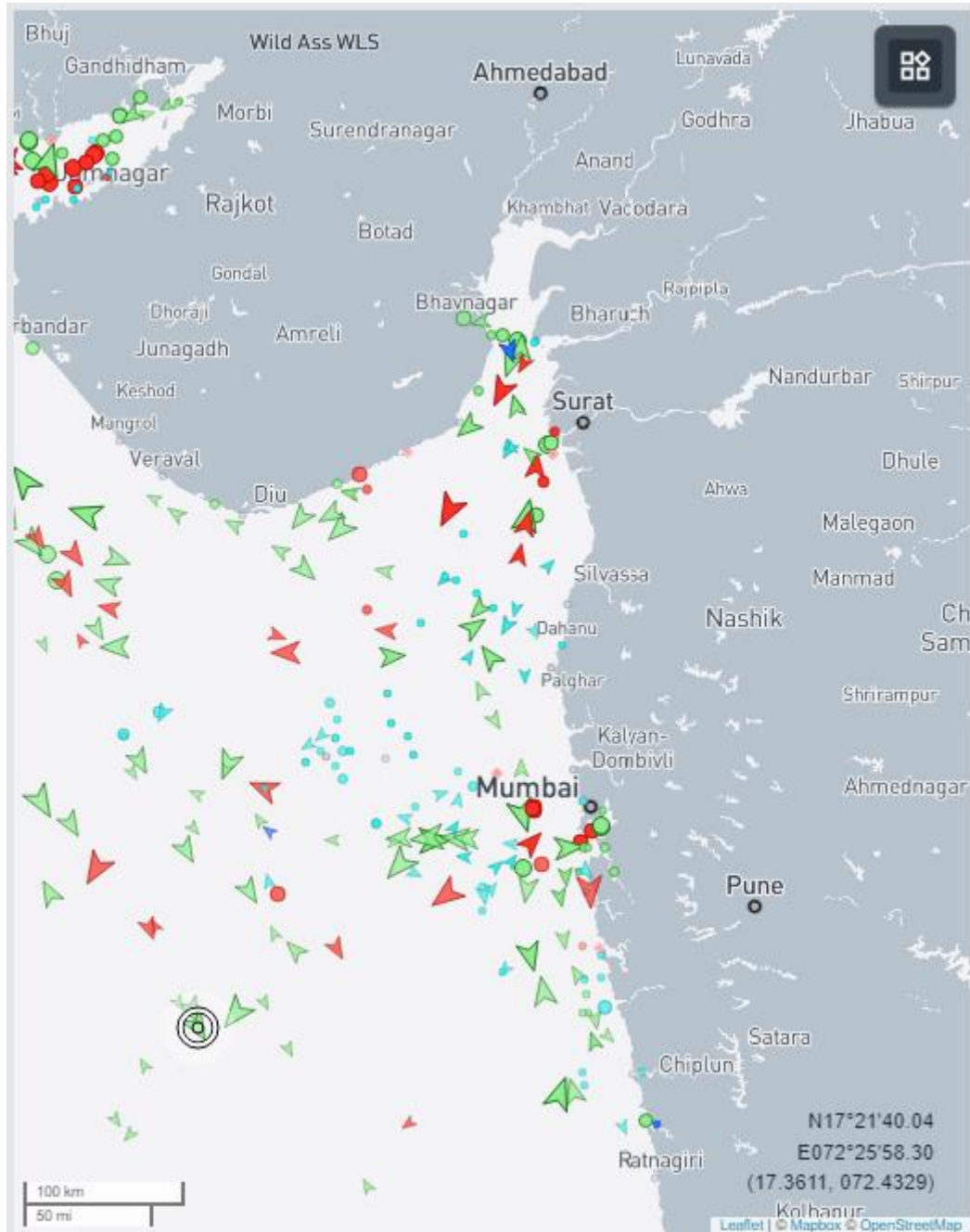


Рисунок 3.3 – Відстеження вантажу в програмі GINA Software

За можливості тестування також слід провести на території без стільникового покриття, щоб визначити, дані були дані успішно передані за допомогою мобільного та супутникового комунікатора.

Таким чином, якщо після відповідного налаштування системи будуть доступними для відображення покази датчиків та дані щодо локації пристрою, тестування слід вважати успішним.

3.4 Охорона праці

При розробці та впровадженні IoT-засобів у логістичних процесах особливу увагу необхідно приділяти питанням охорони праці. Впровадження сучасних технологій Інтернету речей у логістичних процесах несе з собою низку потенційних ризиків для працівників, які займаються та їхньою експлуатацією обслуговуванням. Основні небезпеки пов'язані з впливом електромагнітного випромінювання, можливістю ураження електричним струмом, а також психофізіологічними навантаженнями через тривалу роботу з електронними пристроями.

Для забезпечення безпечної роботи з ПК та скорочення негативного впливу на здоров'я користувача, потрібно дотримуватись норм, визначених у наступних документах [65]:

- Закон України “Про охорону праці”;
- НПАОП 0.00-7.15-18 “Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями”;
- ДСанПІН 3.3.2.007-98 “Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин”;
- НПАОП 40.1-1.21-98 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів”;
- НАПБ А.01.001-2004 “Правила пожежної безпеки в Україні”.

Розробка та впровадження IoT-засобів передбачає використання різноманітних електронних компонентів, таких як модулі GPS, GSM, сенсори температури, вологості, тиску та інші. Робота з цими пристроями потребує дотримання суворих заходів безпеки. Важливо приділяти особливу увагу заходам з охорони праці, щоб забезпечити безпеку працівників і запобігти виникненню нещасних випадків та професійних захворювань. Це стосується як етапу проектування, так і етапу експлуатації. Основні вимоги до охорони праці охоплюють кілька ключових аспектів.

Електробезпека є важливим елементом, який включає належне заземлення всіх електронних компонентів та обладнання, встановлення систем заземлення з використанням заземлювальних контурів і регулярну перевірку їхнього стану. Пристрої захисного відключення повинні бути встановлені на всіх електричних ланцюгах для автоматичного відключення живлення у випадку аварійної ситуації. Важливим є також використання ізольованих проводів і кабелів з високим рівнем стійкості до механічних пошкоджень і електричних перевантажень.

Для захисту від електромагнітного випромінювання необхідно встановлювати екрани для зниження рівня електромагнітного випромінювання від електронних пристроїв. Ці екрани повинні бути виготовлені з матеріалів, що мають високий коефіцієнт поглинання електромагнітних хвиль. Регулярне вимірювання рівня електромагнітного випромінювання в робочих приміщеннях має проводитись за допомогою спеціалізованих приладів.

Система вентиляції повинна забезпечувати ефективне видалення шкідливих хімічних речовин, які можуть виділятися під час роботи з друкованими платами та іншими електронними компонентами. Використання фільтруючих установок для очищення повітря від пилу та хімічних забруднень є обов'язковим. Засоби індивідуального захисту включають захисні окуляри для запобігання ураженню очей, респіратори при роботі з хімічними речовинами та пилом, а також антистатичний одяг для запобігання статичному електричному заряду.

Організаційні заходи безпеки передбачають проведення початкового інструктажу з охорони праці для всіх працівників перед початком роботи з IoT-засобами та організацію регулярних навчань і тренінгів з безпечної експлуатації електронних пристроїв та обладнання. Медичний контроль включає попередні медичні огляди для визначення придатності працівників до роботи з електронними компонентами та регулярні медичні огляди для виявлення професійних захворювань на ранніх стадіях. Регламентація режиму

роботи та відпочинку, встановлення чітких регламентів для запобігання перевтомі та стресу у працівників, а також організація психологічної підтримки для працівників, які зазнають стресових ситуацій під час роботи з електронними компонентами, є важливими аспектами психофізіологічного контролю.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно встановлювати автоматичні системи пожежогасіння в робочих приміщеннях, де зберігаються або використовуються електронні компоненти, а також розміщувати вогнегасники у легкодоступних місцях та регулярно перевіряти їхній стан та працездатність. Системи сигналізації та сповіщення повинні включати димові датчики для своєчасного виявлення загоряння та активації системи сповіщення, а також пожежні сигналізації для швидкого інформування працівників про виникнення пожежі. Розробка та розміщення на видних місцях планів евакуації у випадку пожежі або інших надзвичайних ситуацій та проведення регулярних тренувань з евакуації для всіх працівників, щоб забезпечити швидке і безпечне залишення приміщення у разі виникнення небезпеки, є невід'ємною частиною заходів пожежної безпеки.

Загалом, комплексний підхід до питань охорони праці при розробці та впровадженні IoT-засобів у логістичних процесах забезпечує створення безпечних умов праці, зниження ризиків виробничого травматизму та професійних захворювань, а також мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Ці заходи сприяють підвищенню ефективності роботи, покращенню морального та фізичного стану працівників, а також забезпечують відповідність сучасним стандартам безпеки.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено пристрій моніторингу для логістичного супроводу вантажів.

У роботі було визначено, що вантажні перевезення, а особливо контейнерні, надзвичайно важливі для світової торгівлі. Так, щоб запобігти втраті якості товарів і пов'язаним з цим витратам, для транспортованих товарів повинні бути дотримані особливі умови. Одним із рішень цієї проблеми є пристрої Інтернету речей, які дозволяють детально контролювати відповідні параметри і за допомогою передачі інформації вчасно попереджати перевізника про погіршення умов транспортування, де останній має можливість вчасно відреагувати та запобігти значним фінансовим втратам, пов'язаним з пошкодженням перевезених вантажів.

Визначено, що відповідний засіб повинен мати можливість точно вимірювати ряд параметрів та локацію контейнера, мати можливість поєднувати супутникову та мобільну мережі для передачі даних, оскільки на частині маршрутів мобільна мережа недоступна. Також актуальною є орієнтація на мінімальне енергоспоживання, оскільки транспортування може тривати від кількох днів до місяців.

Таким чином, у даній роботі виконується розробка пристрою стеження, призначеного для логістичного супроводу вантажів. Залежно від вимог пристрій поєднує супутникове та мобільне з'єднання і визначає положення контейнера, контролює температуру, вологість, тиск і наявність води, перевіряє магнітний контакт і таким чином може визначити, відкритий чи закритий контейнер, а також виявляє удари контейнера.

Виконання зазначених функцій передбачено з низьким рівнем витрати енергії. Для зарядки має використовуватись сонячна панель і літій-іонний акумулятор. Практична частина роботи включає опис конструкції схеми підключення окремих частин пристрою, а також формування рекомендацій

щодо виготовлення друкованих плат та корпусу пристрою. Так, відповідний корпус може бути виготовленим виготовлена за допомогою 3D-друку, або прийнятий шляхом підбору за найближчою за габаритами моделлю герметичного боксу для електроніки. Також у роботі наведено особливості просторової орієнтації антен та сонячної панелі у просторі.

Програмна частина роботи описує особливості налаштування та експлуатації розроблюваного засобу. А відповідний комунікаційний протокол передбачає мінімізацію довжини інформаційних повідомлень, що важливим є з точки зору тарифікації супутникової передачі даних, яка залежить від довжини повідомлення.

Завершальним етапом виконання роботи є формування рекомендацій щодо перевірки функціональних характеристик розроблюваного засобу.

Підсумовуючи, слід зазначити, що у ході виконання роботи опрацьовано всі раніше сформовані задачі дослідження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипченко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.
4. Гнилянська О., Карий О. (2023). Ефективне використання інтернету речей (іот) в адміністративному менеджменті: завдання та можливості для організацій у сучасному бізнес-середовищі. Підприємництво і торгівля. 58-66. 10.32782/2522-1256-2023-39-06.
5. Chauhan, Sanket & Papat, Kalpesh. (2023). The Important Role of Industry Data Connectivity Using M2M and IoT Applications for Processing and Analysis. 10.1007/978-981-99-3761-5_9.
6. Maia, Rainara & Andrade, Rossana & Oliveira, Káthia. (2022). Catalog of invisibility correlations for UbiComp and IoT applications. Requirements Engineering. 27. 10.1007/s00766-021-00364-2.
7. Тименко А., Шкарупило В., Смолій В. (2021). Нейромережева модель контролю апаратної сумісності компонентів іот-системи. Visnyk of

Zaporizhzhya National University Physical and Mathematical Sciences. 52-59. 10.26661/2413-6549-2020-2-07.

8. Zoraja, Ivan & Trlin, Goran & Matijević, Marko. (2013). Monitoring SOA Applications with SOOM Tools: A Competitive Analysis. *Business Systems Research*. 4. 21-35. 10.2478/bsrj-2013-0003.

9. Giao, Joao & Nazarenko, Artem & Luis-Ferreira, Fernando & Gonçalves, Diogo & Sarraipa, João. (2022). A Framework for Service-Oriented Architecture (SOA)-Based IoT Application Development. *Processes*. 10. 1782. 10.3390/pr10091782.

10. Tiburski, Ramão & Amaral, Leonardo & de Matos, Everton & Hessel, F.. (2015). The Importance of a Standard Security Architecture for SOA-based IoT Middleware. *IEEE Communications Magazine*. 53. 20 - 26. 10.1109/MCOM.2015.7355580.

11. Резнік Н., Іванець І. (2022). ВИКОРИСТАННЯ RFID-ТЕХНОЛОГІЇ В ОБЛАСТІ ЛОГІСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАЧАНЬ. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ. *Молодий вчений*. 76-81. 10.32839/2304-5809/2022-2-102-15.

12. Хазанович Ю., Моспан А., Киричук Ю., Назаренко Н. (2023). ОГЛЯД СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES. 58-65. 10.31891/2219-9365-2023-73-1-9.

13. Tonkin, Sarah & Kezbers, Krista & Noble, Bishop & Cropsey, Karen & Kendzor, Darla & Oliver, Jason & Businelle, Michael. (2023). Comparison of the Bluetooth iCOquit, piCO, and Vitalograph for the Assessment of Breath Carbon Monoxide among Adults Initiating Smoking Cessation and Standardized Canisters. *Drug and Alcohol Dependence*. 250. 110902. 10.1016/j.drugalcdep.2023.110902.

14. Mohamed, Fawaz & Babikir, Sharief. (2023). Integration Evaluation of the Universal Integrated Wi-Fi Controller from Buildings to Agricultural Applications. 10.1007/978-3-031-26580-8_20.

15. Verma, Rahul & Kumar, Anubhav. (2021). WI-FI Reconfigurable Dual Band Microstrip MIMO Antenna for 5G and wI-FI WLAN Applications. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. 1. 10.15199/48.2021.07.13.
16. Choudhury, Nikumani & Matam, Rakesh & Deka, Vaskar. (2016). Priority based ZigBee routing protocol for LR-WPAN. 196-201. 10.1109/TechSym.2016.7872681.
17. Таршин В., Компанієць О., Ключніков І., Касаткін М. (2023). Оцінка безвідмовного функціонування літаючої сенсорної мережі на основі ймовірнісного підходу. Системи обробки інформації. 70-76. 10.30748/soi.2023.174.10.
18. Okechukwu, Ogochukwu. (2024). Applications and Challenges of Wireless Sensor Network (WSN) in Remote Sensing and Monitoring. 2. 1-10.
19. Машталір В., Жук О., Міненко Л., Артюх С. (2023). Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 47. 96-112. 10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112.
20. Vandervelden, Thibaut & Deac, Diana & Van Glabbeek, Roald & De Smet, Ruben & Braeken, An. (2023). Evaluation of 6LoWPAN Generic Header Compression in the Context of a RPL Network. Sensors. 24. 73. 10.3390/s24010073.
21. Luo, Fuyuan & Feng, Tao & Zheng, Lu. (2021). Formal Security Evaluation and Improvement of Wireless HART Protocol in Industrial Wireless Network. Security and Communication Networks. 2021. 1-15. 10.1155/2021/8090547.
22. Beutel, Jan & Kasten, O. & Mattern, F. & Römer, Kay & Siegemund, F. & Thiele, L.. (2004). Prototyping Wireless Sensor Applications with BTnodes.
23. Veluri, Ravi. (2021). Performance Metrics for Bluetooth Scatternet Scheduling Using Relays. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 9. 1996-2001. 10.22214/ijraset.2021.39673.
24. Kaur, Kirandeep & Kaur, Amandeep & Sarita, Kumari & Saini, Komal & Kour, Satveer & Kaur, Satinder. (2024). Emerging applications and ongoing

challenges in WSN assisted IoT networks. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 11. 501-507. 10.30574/wjaets.2024.11.2.0143.

25. Maerien, Jef & Michiels, Sam & Hughes, Danny & Huygens, Christophe & Joosen, Wouter. (2015). SecLooCI: A comprehensive security middleware architecture for shared wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*. 25. 141-169. 10.1016/j.adhoc.2014.09.018.

26. Junejo, Aisha & Breza, Michael & McCann, Julie. (2023). Threat Modeling for Communication Security of IoT-Enabled Digital Logistics. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 23. 10.3390/s23239500.

27. Круковська О. (2024). ЛОГІСТИКА ЯК ІНСТРУМЕНТ РИНКОВОЇ ЕКОНОМІКИ. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 69-76. 10.32782/2708-0366/2024.19.9.

28. Chandra, B. & Kumar, Krishan & Roy, Ajay & Chandra, I. (2024). Overview of Internet of Things-Based Smart Logistics Systems. 10.1007/978-981-97-0052-3_12.

29. Патора-Висоцька З., Крикавський Є. (2020). ЛАНЦЮГ ВАРТОСТІ ПОРТЕРА (КОНСТРУКЦІЯ, ДЕКОНСТРУКЦІЯ, РЕКОНСТРУКЦІЯ) ТА УПРАВЛІННЯ ЗА ЦІННОСТЯМИ.

30. Nozari, Hamed & Szmelter-Jarosz, Agnieszka. (2024). Special issue: Computational Approaches and Data Analysis in the Smart Supply Chain, with an Emphasis on AI, IoT and Big Data. 10.13140/RG.2.2.36516.28807.

31. Савченко М., Панасюк П., & Левченко О. (2022). Тенденції розвитку світового ринку морських контейнерних перевезень. *Adaptive Management Theory and Practice Economics*. 13. 10.33296/2707-0654-13(26)-02.

32. Shakyu, Santosh & Tripathi, Priyanka. (2024). Using light weight container a mesh based dynamic allocation task scheduling algorithm for cloud with IoT network. *International Journal of Information Technology*. 10.1007/s41870-024-01772-7.

33. Kumar Gupta, Piyush & Asbe, Chetana. (2023). Intra Cluster Communication of the Nodes with Artificial Intelligence Scheme for WSN Transportation System. 1-8. 10.1109/INDISCON58499.2023.10270144.
34. Qawasmeh, Sami. (2023). An Improved Genetic Algorithm for Scheduling Sensor Nodes in WSN. International Journal of Membrane Science and Technology. 10. 3762-3772. 10.15379/ijmst.v10i2.3230.
35. Перепьолкін С. (2021). ФОРМИ МИТНОГО ПРАВА ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ. New Ukrainian Law. 63-68. 10.51989/NUL.2021.5.9.
36. Cameron, Neil. (2023). ESP32 Microcontroller. 10.1007/978-1-4842-9376-8_1.
37. Lee, Cheng-Yen & Khatri, Sunil. (2023). A Digital Low Dropout (LDO) Voltage Regulator Using Pseudoflash Transistors. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. PP. 1-10. 10.1109/TVLSI.2023.3317414.
38. Haus, Benedikt & Mercorelli, Paolo. (2019). Polynomial Augmented Extended Kalman Filter to Estimate the State of Charge of Lithium-Ion Batteries. IEEE Transactions on Vehicular Technology. PP. 1-1. 10.1109/TVT.2019.2959720.
39. Sankaran, Durairaj & Pappan, Balakrishnan & Balakrishnan, Kirubakaran. (2023). Enhancing photo voltaic solar panel efficiency by using a combination of silica based and phase change material coating. Materials Research Express. 10. 10.1088/2053-1591/ad07cc.
40. Govindasamy, Dhanusiya & Kumar, Ashwani. (2023). Effect of composite phase-change materials on improving the efficiency of solar photovoltaic panels. Heat and Mass Transfer. 59. 1-22. 10.1007/s00231-023-03366-8.
41. Sari, Ida & Agung, Anak & Gunawan, Anak & Made, I & Wibawa, Satriya & Putra, Ii & Yusuf, Mahmud. (2023). Design of Radiosonde Based on Arduino Pro Mini Using BME280 Sensor. 10.9734/bpi/taier/v5/18576D.
42. Musham, Sai. (2021). Contactless Switching Using Arduino. SSRN Electronic Journal.

43. Alamsyah, Sultan & Melisa, Wery & Sari, Okta & Zahra, Raudhatul & Putra, Muhammad & Afif, Zafran & Azhim, Shalih & Yuliza, Elfi & Ekawita, Riska. (2023). DISTANCE RANGE TEST OF SW-420 SENSOR-BASED VIBRATION DETECTION SYSTEM. *Jurnal Kumparan Fisika*. 6. 177-184. 10.33369/jkf.6.3.177-184.
44. Liu, W. & Gao, Z. & Liu, S. & Tao, X. & Zhao, Y.. (2015). Remote monitoring network for soil moisture based on iridium communication technology. 46. 316-322. 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.043.
45. Moorhead, Simon. (2022). The Iridium Satellite Network. *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*. 10. 107-112. 10.18080/jtde.v10n1.557.
46. Asadi, Farzin. (2023). Voltage Regulators. 10.1007/978-981-99-3881-0_11.
47. Whytock, Robin & Suijten, Thijs & Deursen, Tim & Świeżewski, Jędrzej & Mermiaghe, Hervé & Madamba, Nazaire & Mouckoumou, Narcisse & Zwerts, Joeri & Pambo, Aurélie & Bahaa-El-Din, Laila & Brittain, Stephanie & Cardoso, Anabelle & Henschel, Philipp & Lehmann, David & Momboua, Brice & Makaga, Loïc & Orbell, Christopher & White, Lee & Iponga, Donald & Abernethy, Katharine. (2023). Real-time alerts from AI-enabled camera traps using the Iridium satellite network: A case-study in Gabon, Central Africa. *Methods in Ecology and Evolution*. 14. 10.1111/2041-210X.14036.
48. Penagos, Hernán & Rodríguez, Néstor. (2020). Electronic Device for Satellite Backup of Automatic Vehicle Location Equipment Using the Iridium Network. *Ingeniería*. 25. 437-451. 10.14483/23448393.17076.
49. Ewell, Jr & Garmany, Douglas & Kelly, Charles. (2015). Mobile communicator device including user attentiveness detector.
50. Hartini, Pri & Ibrahim, Ibrahim & Rahmadewi, Reni & Nurhuda, Tiara. (2023). Motorcycle Tracking System Using Telegram Integrated Quectel L80 GPS. *Sainteks: Jurnal Sains dan Teknik*. 5. 36-46. 10.37577/sainteks.v5i1.456.

51. Aprilianto, Rizky Ajie & Ariefianto, Rizki Mendung. (2023). Voltage-Mode Fuzzy Logic Controller for Enhancing Synchronous Buck Converter Operation. 127-132. 10.1109/ICT-PEP60152.2023.10351187.
52. Pothalaiah, S. & Lakshmaiah, Dayadi & Rao, B. & Rao, D. & Illiyas, Mohammad & Sekhar, G.. (2022). Design of a Low-Voltage LDO of CMOS Voltage Regulator for Wireless Communications. 10.1002/9781119865605.ch1.
53. Campoverde-Fordon, Mateo & Andersen, Birger. (2024). Analysis of LoRaWAN and NB-IoT for Critical and Massive Communication. 10.1007/978-3-031-53028-9_3.
54. Shen, Lingrong & Luo, Wei & Miao, Youming & Liu, Gui. (2024). Combined Shark-Fin Rooftop Antenna for LTE, WLAN and BeiDou Applications. Electronics. 13. 1324. 10.3390/electronics13071324.
55. Rao, Sisi & Wang, Yan. (2024). Shared-Aperture Design of the Cellular Antenna and Satellite Communication Antenna With Circular Polarization in S-Band for Metal-Bezel Smartphones. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. PP. 1-1. 10.1109/TAP.2024.3380371.
56. Fathoni, Khoirudin & Apriaskar, Esa & Salim, Nur & Sulistyawan, Vera & Satria, Rifki & Hidayat, Syahroni. (2023). Design of Brushless DC Motor Driver Based on Bootstrap Circuit. Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi. 23. 108. 10.55981/jet.563.
57. Baloola, Mohamed & Ibrahim, Fatimah & Mohktar, Mas. (2022). Optimization of Medication Delivery Drone with IoT-Guidance Landing System Based on Direction and Intensity of Light. Sensors. 22. 4272. 10.3390/s22114272.
58. Sole, Alessandro. (2021). Visual Studio Code Distilled: Evolved Code Editing for Windows, macOS, and Linux. 10.1007/978-1-4842-6901-5.
59. Poulicek, Zbynek & Prochazka, Boris & Bacikova, Petra. (2011). GINA (Geographical Information Assistant) Fresh Wind in Environmental Mapping. 10.1007/978-3-642-22285-6_15.
60. Asadi, Farzin. (2023). Serial Communication. 10.1007/978-1-4842-9600-4_5.

61. Islam, Engr. M. N.. (2022). Development of Eagle Multi-layer Printed Circuit Board with CAD and CAM.

62. Hosen, Md Saikat & Ahmmed, Shahed & Dekkati, Sreekanth. (2019). Mastering 3D Modeling in Blender: From Novice to Pro. ABC Research Alert. 7. 169–180. 10.18034/ra.v7i3.654.

63. Sayed, Mohamed. (2019). IP Rating for Electrical Enclosure Abbreviation of IP Rating.

64. Курак В., Андропова О., Мельник М. (2023). Моделювання впливу неоднорідності опромінення приймальної поверхні на параметри фотоелектричної панелі. Вісник Херсонського національного технічного університету. 25-32. 10.35546/kntu2078-4481.2023.1.3.

65. Охорона праці. Вимоги до робочого місця працівника // Сайт ГСС.
URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-praci-v-ofisi-vimogi-do-robochogo-miscya-ofisnogo-pracivnika/> (дата звернення: 01.06.2024).