

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ГАЛАСІС ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ

Мережа сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів /
Sensor network for monitoring moving objects

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 В.І.Галасіс

Науковий керівник :
к.т.н. доцент Б.О.Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ ____ ” _____ 2026р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Галасісу Василю Івановичу
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Мережа сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів / Sensor network for monitoring moving objects

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк

затверджені наказом по університету від "14" листопада 2025 р. №825

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Технічні характеристики та принципи роботи сенсорів, які можна використати для ідентифікації рухомих об'єктів.
2. Структура сенсорної мережі моніторингу рухомих об'єктів з використанням мікроконтролерів.
3. Характеристики сучасних мікроконтролерів

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Конкретизувати характеристики рухомих об'єктів, які можна використати для їх ідентифікації.
2. Огрунтувати вибір сенсорів моніторингу рухомих об'єктів.
3. Розробити структуру сенсорної мережі.
4. Проектування компонентів сенсорного вузла.
5. Програмно-апаратна реалізація сенсорного вузла з використанням протоколів передачі даних.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема сенсору моніторингу рухомих об'єктів.
2. Структурна схема мережі моніторингу рухомих об'єктів.
4. Електричні схеми апаратної реалізації проекту.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз систем безпеки	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Проектування компонентів сенсорного вузла.	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Програмно-апаратна реалізація сенсорного вузла	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

_____ Галасіс В.І.
(підпис)

Керівник роботи

_____ к.т.н., доц. Масляк Б.О.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Зростання потреб у дистанційному спостереженні за транспортними засобами, персоналом і вантажами зумовлює актуальність розробки надійних та масштабованих сенсорних мереж. Існуючі рішення є вузькоспеціалізованими або не забезпечують передачі даних у реальному часі, що підтверджує необхідність розробки уніфікованої IoT-системи моніторингу рухомих об'єктів.

Метою роботи є Розробка архітектури та програмно-апаратної реалізації мережі IoT-сенсорів для збору, передачі та відображення координатних і телеметричних даних рухомих об'єктів у режимі реального часу.

Об'єкт дослідження є процес збору та передачі даних про місцезнаходження рухомих об'єктів у розподіленій сенсорній мережі.

Предмет дослідження — методи побудови та алгоритми функціонування мережі IoT-сенсорів.

Розроблено архітектуру мережі з гібридним використанням протоколів LoRa та Wi-Fi, запропоновано алгоритм адаптивного опитування вузлів залежно від швидкості об'єкта, реалізовано веб-інтерфейс візуалізації маршрутів на картографічній основі.

Система орієнтована на застосування у логістиці, охороні периметрів та промисловому моніторингу. Модульна архітектура забезпечує масштабованість без суттєвих змін апаратної частини.

Ключові слова. ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ, АЦП, ДРОТОВИЙ ТА БЕЗДРОТОВИЙ ІНТЕРФЕЙС, СЕНСОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The growing need for remote monitoring of vehicles, personnel and cargo makes the development of reliable and scalable sensor networks urgent. Existing solutions are highly specialized or do not provide real-time data transmission, which confirms the need to develop a unified IoT system for monitoring moving objects. The purpose of the work is to develop the architecture and software and hardware implementation of an IoT sensor network for collecting, transmitting and displaying coordinate and telemetric data of moving objects in real time. The object of the study is the process of collecting and transmitting data on the location of moving objects in a distributed sensor network. The subject of the study is methods for constructing and algorithms for the functioning of an IoT sensor network. A network architecture with hybrid use of LoRa and Wi-Fi protocols has been developed, an algorithm for adaptive polling of nodes depending on the speed of the object has been proposed, and a web interface for visualizing routes on a map basis has been implemented. The system is focused on applications in logistics, perimeter security and industrial monitoring. Modular architecture provides scalability without significant changes to the hardware.

Keywords. MEASUREMENT, CONTROL, ADC, WIRED AND WIRELESS INTERFACE, SENSOR, MICROCONTROLLER, SOFTWARE SKETCH.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Аналіз методів моніторингу рухомих об'єктів	12
1.1. Особливості задач моніторингу рухомих об'єктів	12
1.2. Класифікація рухомих об'єктів та методи виявлення руху	14
1.3. Огляд існуючих систем моніторингу	20
1.4. Постановка задачі по ідентифікації рухомих об'єктів	23
Розділ 2. Проектування структури сенсорної мережі та її компонентів	25
2.1. Розробка структури системи	25
2.2. Обґрунтування вибору сенсорів та мікроконтролера	27
2.3. Оцінка невизначеності результатів вимірювань та ідентифікації рухомого об'єкту	35
Розділ 3. Програмне забезпечення системи та обґрунтування алгоритму збору даних	39
3.1. Алгоритм збору та обробки даних сенсорів	39
3.2. Налаштування програмного середовища та реалізація процесу збору інформації та її обробки	48
3.3. Реалізація мережі сенсорів моніторингу рухомих об'єктів	53
Висновки	58
Список використаних джерел	59

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Галасіс В.І.			Мережа сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів / Sensor network for monitoring moving objects	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	62	
Консульт.						ЗУНУ ФКІТ МТІР-41			
Н. Контр.		Масляк Б.О							
Затверд.		Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

IoT Internet of Things — Інтернет речей

LoRaWAN Long Range Wide Area Network — мережа широкого охоплення на основі LoRa

Wi-Fi Wireless Fidelity — стандарт бездротової локальної мережі

MQTT Message Queuing Telemetry Transport — протокол обміну повідомленнями для IoT

MCU Microcontroller Unit — мікроконтролерний пристрій

ADC Analog-to-Digital Converter — аналого-цифровий перетворювач

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — універсальний асинхронний приймач-передавач

SPI Serial Peripheral Interface — послідовний периферійний інтерфейс

I²C Inter-Integrated Circuit — міжмікросхемний інтерфейс

ПЗ Програмне забезпечення

АЦП Аналого-цифровий перетворювач

МК Мікроконтролер

ПК Персональний комп'ютер

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку інформаційного суспільства, цифровізації економіки та зростання рівня автоматизації виробничих і соціальних процесів особливої актуальності набуває задача моніторингу рухомих об'єктів у різноманітних середовищах. Це зумовлено необхідністю забезпечення безпеки, підвищення ефективності управління, оптимізації логістичних процесів, а також контролю стану складних динамічних систем. До рухомих об'єктів можуть належати люди, транспортні засоби, тварини, безпілотні системи, а також об'єкти військового або спеціального призначення, що функціонують у складних і часто невизначених умовах [1. 3].

Потреба у безпечному та ефективному моніторингу таких об'єктів значно зросла в умовах сучасних викликів, зокрема у сфері національної безпеки, транспортної інфраструктури та екологічного контролю. У практичних задачах часто виникає необхідність не лише визначення місцезнаходження об'єкта, але й його ідентифікації, прогнозування поведінки та оцінювання стану. При цьому традиційні підходи, що базуються на використанні окремих сенсорів або обмеженої кількості джерел інформації, не забезпечують необхідного рівня достовірності через вплив завад, обмежену інформативність сигналів та наявність похибок вимірювання.

Суттєвий прорив у розвитку систем моніторингу забезпечило впровадження концепції Інтернету речей. Відповідно до рекомендації International Telecommunication Union, «Інтернет речей є глобальною інфраструктурою для інформаційного суспільства, що забезпечує розширені послуги шляхом взаємозв'язку фізичних і віртуальних об'єктів на основі існуючих і нових інформаційно-комунікаційних технологій». Такий підхід дозволяє об'єднувати велику кількість сенсорів у єдину мережу, забезпечуючи безперервний збір, передачу та обробку даних у реальному часі.

Як зазначається у сучасних дослідженнях, IoT-системи широко застосовуються у транспорті, енергетиці, медицині, екології та інших сферах, де

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

необхідне оперативне отримання інформації та прийняття рішень. Водночас розвиток таких систем супроводжується низкою проблем, серед яких ключовими є забезпечення достовірності даних, узгодження інформації з різних джерел та мінімізація впливу похибок вимірювання.

У цьому контексті важливого значення набуває використання мультисенсорних систем. Як підкреслюється у наукових роботах, об'єднання даних з декількох сенсорів дозволяє отримати більш достовірні результати, ніж використання одного сенсора. Мультисенсорна обробка (sensor fusion) забезпечує зменшення невизначеності результатів, підвищення точності оцінювання параметрів та стійкість системи.

Разом із тим, інтеграція даних від різнорідних сенсорів створює нові виклики, пов'язані з необхідністю врахування їх метрологічних характеристик. Кожен сенсор має власні похибки, нестабільність та обмеження, що можуть суттєво впливати на результати обробки. Відповідно до міжнародних рекомендацій, «невизначеність вимірювання є параметром, що характеризує розсіювання значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині» [1]. Тому врахування невизначеності та надійності сенсорів є необхідною умовою побудови ефективних систем моніторингу.

Актуальність даної роботи також підсилюється розвитком бездротових сенсорних мереж, які дозволяють реалізувати розподілені системи збору даних із великої кількості вузлів. Як показують сучасні дослідження, такі мережі забезпечують високу масштабованість, гнучкість і адаптивність, що є важливим для задач моніторингу рухомих об'єктів у складних умовах експлуатації.

Метою даної бакалаврської роботи є розробка концепції та створення прототипу мультисенсорної мережі для моніторингу рухомих об'єктів, яка забезпечує підвищену достовірність їх ідентифікації за рахунок інтеграції даних від різних сенсорів та врахування їх метрологічних характеристик. Досягнення цієї мети передбачає комплексний підхід, що поєднує аналіз сучасних технологій, розробку архітектури системи, створення алгоритмів обробки даних та проведення експериментальних досліджень.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У рамках роботи передбачається вирішення низки взаємопов'язаних задач. Перш за все здійснюється аналіз існуючих систем моніторингу рухомих об'єктів, включаючи сучасні методи ідентифікації, такі як супутникові навігаційні системи, відеоспостереження, радіочастотна ідентифікація та інші технології. Особлива увага приділяється перспективним мережам передачі інформації, зокрема технологіям IoT та бездротовим сенсорним мережам.

На основі проведеного аналізу розробляється архітектура мультисенсорної мережі, яка враховує особливості розподілених систем, включаючи топологію мережі, способи передачі даних та методи їх обробки. Важливим етапом є реалізація алгоритмів збору, передачі та обробки інформації, що забезпечують інтеграцію даних із різних джерел та підвищення достовірності результатів.

Особлива увага приділяється експериментальним дослідженням, які дозволяють оцінити ефективність запропонованої системи. У ході досліджень визначаються основні метрологічні характеристики, включаючи точність, похибки, невизначеність та надійність функціонування системи. Це дозволяє обґрунтувати доцільність використання мультисенсорного підходу та оцінити його переваги порівняно з традиційними рішеннями.

Об'єктом дослідження є рухомі об'єкти різної природи, включаючи людей, транспортні засоби, тварин та спеціальні об'єкти. Предметом дослідження є мультисенсорна мережа та алгоритми обробки даних, спрямовані на підвищення достовірності ідентифікації об'єктів.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел, моделювання процесів збору та обробки даних, а також експериментальні дослідження. Особлива увага приділяється аналізу похибок, оцінюванню невизначеності та дослідженню надійності системи.

Наукова новизна роботи полягає у розробці підходу до побудови мультисенсорної мережі з урахуванням метрологічних характеристик сенсорів, що дозволяє підвищити достовірність ідентифікації рухомих об'єктів в умовах невизначеності. На відміну від традиційних підходів, у запропонованій системі

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

враховується не лише інформаційний зміст сигналів, але й їх якісні характеристики, включаючи похибки та стабільність сенсорів.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання розробленої системи в різних сферах, зокрема в системах безпеки, транспортній логістиці, екологічному моніторингу та військових застосуваннях. В умовах сучасних викликів для України такі системи можуть сприяти підвищенню рівня безпеки, ефективності управління та ситуаційної обізнаності.

Таким чином, розробка мультисенсорних мереж для моніторингу рухомих об'єктів є актуальним напрямом досліджень, що поєднує сучасні досягнення в галузі IoT, сенсорних систем та обробки даних і має значний потенціал практичного застосування.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Особливості задач моніторингу рухомих об'єктів

Моніторинг рухомих об'єктів є однією з найскладніших прикладних задач бездротових мереж сенсорів (Wireless Sensor Networks). В рамках даної роботи ця задача охоплює виявлення (detection), локалізацію (localization), відстеження (tracking), прогнозування траєкторії, а також ідентифікацію (класифікацію) рухомих об'єктів за типом (людина, транспортний засіб, тварина, дрон). Динамічний характер об'єктів, обмежені ресурси сенсорних вузлів, вимоги реального часу та розподілена обробка даних визначають ключові особливості цих задач. Типова архітектура бездротової сенсорної мережі для моніторингу рухомих об'єктів показана на рисунку 1.1 [3].

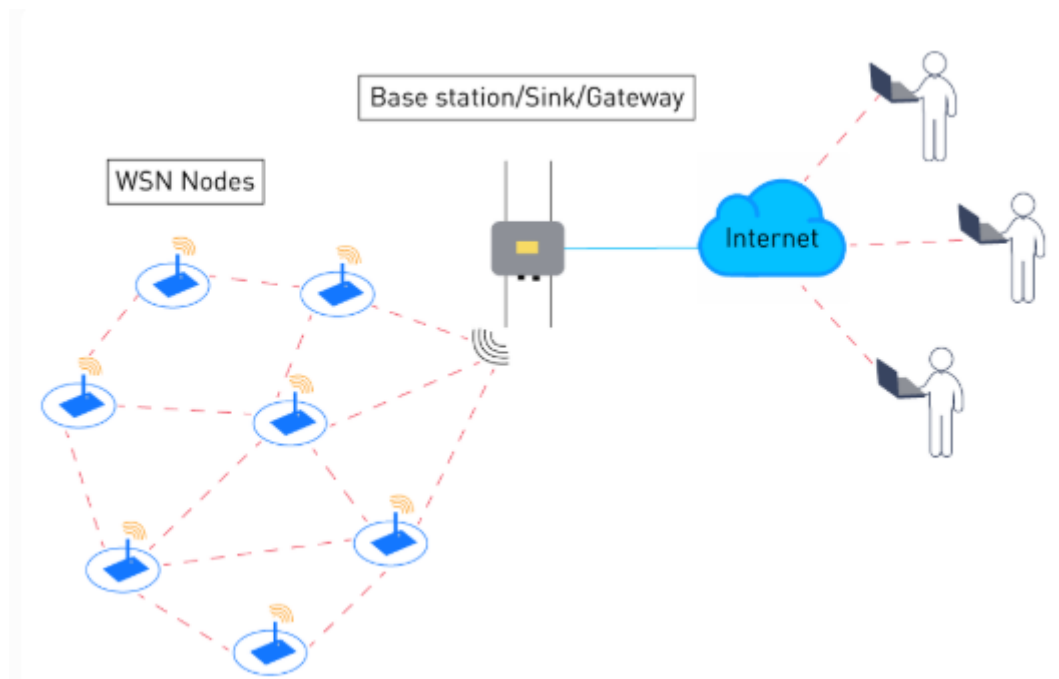


Рисунок 1.1 - Типова архітектура бездротової сенсорної мережі з базовою станцією (sink) та підключенням до інтернету

Рухомі об'єкти змінюють швидкість, напрямок і можуть здійснювати раптові маневри. На відміну від статичних задач, сенсорна мережа повинна

постійно адаптуватися: динамічно активувати лише ті вузли, які перебувають у зоні потенційного переміщення об'єкта. Це дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, але вимагає точного прогнозування траєкторії.

Другою критично важливою особливістю є необхідність врахування реального часу та низької затримки при передачі сигналів. Дані про положення об'єкта мають передаватися до базової станції з мінімальною затримкою для оперативного прийняття рішень (системи безпеки, транспортний контроль, екологічний моніторинг). Частота звітності створює компроміс між точністю та енергоспоживанням. Обмежені ресурси сенсорних вузлів (акумуляторна батарея, обчислювальна потужність, пам'ять, пропускна здатність) роблять непридатними класичні алгоритми обробки сигналів. Енергозбереження пропонується досягти завдяки режимам сну (sleep mode), динамічному кластеризуванню, прогнозуванню траєкторії та оптимізації маршрутизації.

Масштабованість мережі та обробка даних кількох об'єктів одночасно створюють додаткові труднощі. Мережа може налічувати сотні або тисячі вузлів. Це призводить до проблем ідентифікації об'єктів, уникнення колізій пакетів та забезпечення відмовостійкості.

Окремо варто виділити проблему ідентифікації (класифікації) рухомого об'єкта за типом, яка є обов'язковим етапом сучасних систем моніторингу. Без класифікації мережа не може адекватно реагувати: людина-вторгнення вимагає негайної тривоги, тварина — лише реєстрації, транспортний засіб — оцінки швидкості та напрямку. Класифікація зменшує кількість помилкових спрацьовувань, оптимізує енергоспоживання (різні алгоритми для різних класів) та підвищує інформативність даних.

У розподілених сенсорних мережах класифікація здійснюється на основі мультисенсорної обробки даних (Data Fusion) від кількох типів сенсорів (акустичних, сейсмічних, інфрачервоних (PIR), магнітних чи камер). Кожен тип об'єкта має унікальну «сигнатуру». Класифікація виконується на рівні вузла або кластера з використанням різних методів

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

У розподілених мережах для зменшення впливу шумів застосовують фільтрацію, що знижує обсяг переданих даних і енергоспоживання.

Енергетичні обмеження є головним викликом. Сучасні рішення передбачають прогнозу активацию вузлів, динамічне кластеризування та оптимізацію. Узагальнені виклики задач моніторингу наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Основні виклики задач моніторингу рухомих об'єктів

Проблема	Технічне рішення
Енергоспоживання	Використання адаптивних режимів сну (Sleep/Wake-up) при відсутності активності
Затримка (Latency)	Перенесення частини обчислень (Edge Computing) безпосередньо на сенсорний вузол
Втрата даних	Використання mesh-топології для забезпечення альтернативних шляхів передачі.

Таким чином, особливості задач моніторингу рухомих об'єктів диктують необхідність комплексного підходу: поєднання детектування, локалізації, відстеження, прогнозування та обов'язкової класифікації за типом. Лише такий підхід забезпечує ефективну, надійну та енергозберігаючу роботу мережі сенсорів у реальних умовах.

1.2. Класифікація рухомих об'єктів та методи виявлення руху

Задача виявлення та відстеження рухомих об'єктів є однією з ключових у сучасних кібер-фізичних системах. Безперервне зростання кількості автономних транспортних засобів, БПЛА, промислових роботів та «розумних» міських інфраструктур ставить перед інженерами питання надійного, енергоефективного та масштабованого моніторингу об'єктів у реальному часі.

Мережі бездротових сенсорів (WSN — Wireless Sensor Networks) стали стандартним рішенням для розподіленого збору даних про переміщення об'єктів. На відміну від централізованих систем відеоспостереження, WSN дозволяють охоплювати великі площі з мінімальними витратами на інфраструктуру,

забезпечуючи при цьому роботу від автономних джерел живлення протягом місяців і навіть років.

Проектування ефективної мережі сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів неможливе без систематизованого розуміння того, які саме об'єкти підлягають моніторингу, якими фізичними проявами супроводжується їхній рух та які методи виявлення найкраще відповідають конкретним умовам застосування. У літературі існує кілька підходів до класифікації рухомих об'єктів залежно від обраної ознаки. За природою об'єкта розрізняють живі організми (люди, тварини) та неживі механічні системи (транспортні засоби, роботи). За середовищем переміщення виділяють наземні, повітряні, водні та підводні об'єкти. За характером руху об'єкти поділяються на ті, що рухаються по фіксованих траєкторіях (рейкові транспортні засоби, автомобільні шляхи), та об'єкти з довільною траєкторією (пішоходи, дрони).

Для цілей проектування сенсорної мережі найбільш практичною є класифікація за сукупністю кінематичних параметрів (швидкість, маса, розміри) та фізичних проявів руху, оскільки саме ці характеристики визначають вибір типу сенсора, його роздільну здатність та необхідний радіус дії. Узагальнена класифікація наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Класифікація рухомих об'єктів за кінематичними параметрами та прикладами

Клас об'єкта	Швидкість	Маса / розмір	Траєкторія	Приклади
Наземні транспортні засоби	0–300 км/год	0.1–100 т 1–30 м	Плоска, дорожня мережа	Автомобілі, бронетехніка, вагони, велосипеди
Повітряні об'єкти	0–3000 км/год	0.1 г – 600 т 0.1–80 м	Тривимірна, змінна	Літаки, вертольоти, БПЛА (дрони), птахи, метеозонди
Пішоходи та тварини	0–15 км/год	1–1000 кг 0.2–3 м	Довільна, непередбачувана	Люди, собаки, дикі тварини, натовпи
Промислові та роботизовані об'єкти	0–30 м/с	0.1–10 000 кг 0.1–20 м	Фіксована або обмежена	AGV-роботи, конвеєри, маніпулятори, рухомі частини верстатів

Рух об'єкта в просторі описується набором кінематичних параметрів, кожен з яких може бути виміряний певним класом сенсорів. Розуміння цього зв'язку є фундаментальним для проектування сенсорної мережі: від того, який саме параметр потрібно вимірювати (положення, швидкість, прискорення, напрям), залежить вибір типу сенсора, частота вибірки та необхідна точність.

Таблиця 1.2 — Кінематичні параметри рухомого об'єкта та відповідні сенсорні технології

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Зв'язок із сенсорними системами
Положення	$r(t)$	м, GPS-координати	GPS/GNSS, УЗ-тріангуляція, RSSI-позиціонування
Швидкість (лінійна)	$v(t) = dr/dt$	м/с, км/год	Доплерівський радар, PIR (диференційний), акселерометр
Прискорення	$a(t) = dv/dt$	м/с ²	МЕМС-акселерометр, вібраційний сенсор
Кут повороту	$\theta(t)$	рад, °	ІЧ-сенсор секторів, гіроскоп, компас
Кутова швидкість	$\omega(t) = d\theta/dt$	рад/с, об/хв	МЕМС-гіроскоп, енкодер
Напрямок руху (азимут)	$\varphi(t)$	°	Багатосенсорна тріангуляція, компас, відеоаналіз
Траєкторія	$r(t) = [x(t), y(t), z(t)]$	м	Комбінація GPS + IMU (інерційна навігація)

Положення об'єкта $r(t) = [x(t), y(t), z(t)]$ є найбільш інформативним параметром, але водночас і найважчим для визначення засобами малоенергетичних сенсорних мереж. Пряме вимірювання положення потребує або наявності активного мітки на об'єкті (GPS-трекер, UWB-тег), або мережі сенсорів з відомими координатами, що виконують тріангуляцію по вимірюваній величині (час прольоту сигналу ToA, кут прийому DoA, потужність сигналу RSSI).

Швидкість $v(t)$ є другим за значущістю параметром. Вона безпосередньо визначається доплерівськими сенсорами (радар, ультразвук) або обчислюється як похідна від виміряного положення. Для PIR-сенсорів швидкість об'єкта

опосередковано виявляється як тривалість перетину зони виявлення: при відомій ширині зони w та часі перетину Δt швидкість оцінюється як $v \approx w/\Delta t$.

Будь-який рухомий об'єкт залишає характерний «фізичний слід» у навколишньому середовищі — сукупність змін різних фізичних величин, що супроводжують його рух. Ці зміни називають фізичними проявами об'єкта. Їх виявлення і є задачею сенсорної мережі. В таблиці 1.3 систематизовані основні типи фізичних проявів для різних об'єктів [1-3].

Таблиця 1.3 — Фізичні прояви руху об'єктів та відповідні сенсорні системи

Тип прояву	Фізична величина	Характерні значення	Відповідний сенсор / метод
Теплове (ІЧ-випромінювання)	Потік ІЧ-випромінювання [8–14 мкм для людини]	Людина: +3...+6 °C відносно фону Авто: +20...+80°C	PIR-сенсор (пасивний ІЧ), термокамера, термопіл
Акустичне / вібраційне	Звуковий тиск [Па] Вібрація [м/с²]	Крок: 40–60 дБ Авто: 60–90 дБ Вертоліт: 85–110 дБ	Мікрофон, геофон, п'єзодатчик, акселерометр MEMS
Електромагнітне (пасивне)	Зміна магнітного поля [нТл]	Авто: 50–5000 нТл в радіусі 5 м	Магнетометр (AMR, HMC5883)
Електромагнітне (активне)	Відбитий радіосигнал (доплерівський зсув)	Пішохід: ~1–10 Гц Авто: ~100–1000 Гц (24 ГГц радар)	Мікрохвильовий радар, ультразвуковий сонар
Оптичне / відеосигнал	Яскравість, контраст, потік руху (optical flow)	Зміна пікселів: 1–100% від кадру до кадру	Камера (RGB, глибини), PIR з лінзою Фрезеля
Механічне (тиск на ґрунт)	Деформація [мкм] Тиск [Па]	Людина: 0.5–5 кПа Авто: 50–500 кПа	П'єзоелектричний кабель, тензодатчик під дорогою
Радіочастотне (активне мітки)	RSSI [дБм], ToA [нс]	BLE: 1–30 м UWB: 10 см точність	BLE-маяки, UWB-теги, RFID

Теплова сигнатура є одним із найнадійніших і найшвидше реалізованих методів виявлення рухомих об'єктів, що мають температуру, відмінну від температури навколишнього середовища. PIR-сенсор (Passive InfraRed) реагує на зміну теплового потоку в його полі зору. Це означає, що нерухомий, але теплий об'єкт PIR-сенсор не виявить — він реагує саме на рух. При наближенні людини

з кроковою швидкістю ~ 1.5 м/с виникає змінний сигнал з частотою 0.5–5 Гц, амплітуда якого залежить від різниці температур об'єкта і фону (ΔT), відстані та розміру об'єкта. Обмеженням PIR є його нездатність виявити «маскований» об'єкт (наприклад, людину за теплоізованим екраном) та об'єкт при нульовому контрасті температур (що трапляється влітку при $T_{\text{фону}} \approx T_{\text{тіла}}$). Тому у відповідальних системах PIR доповнюється другим каналом виявлення.

Рухомі механічні об'єкти генерують акустичні та вібраційні сигнали, характеристики яких тісно пов'язані з типом об'єкта. Спектральний склад сигналу дозволяє класифікувати об'єкт: людська хода має характерну частоту кроків 0.5–3 Гц та супутній акустичний сигнал з піком 50–800 Гц; автомобільний двигун — шум у смузі 50–5000 Гц з характерними гармоніками, що залежать від числа циліндрів; квадрокоптер — тон пропелерів у смузі 500–8000 Гц. Акустичне виявлення реалізується мікрофонами або масивами мікрофонів. Вібрація ґрунту від кроків людини або коліс автомобіля виявляється геофонами або MEMS-акселерометрами, закопаними в ґрунт. Перевага геофонів — пасивна робота без звукового джерела, а тому — повна прихованість системи [12].

Феромагнітні об'єкти (сталевий кузов автомобіля, залізничний вагон, зброя) спотворюють однорідне магнітне поле Землі ($\sim 50\,000$ нТл). Амплітуда збурення ΔB залежить від об'єму та магнітної сприйнятливості матеріалу, а також від відстані до об'єкта. Магнетометри типу AMR (Anisotropic Magnetoresistance, наприклад HMC5883L, LSM303) дозволяють вимірювати три компоненти вектора магнітного поля з чутливістю до 0.1 нТл. Для легкового автомобіля в радіусі 3–5 м від сенсора збурення магнітного поля складає 50–5000 нТл, що добре відділяється від природного шуму магнітного поля Землі.

Вибір методу виявлення руху (таблиця 1.4) для конкретного застосування є ключовим проектним рішенням, що визначає чутливість, надійність, енергоспоживання та вартість усієї сенсорної мережі. Жоден метод не є універсальним: кожен має свої переваги в одних умовах та суттєві обмеження в інших. Саме тому сучасні системи, як правило, використовують

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

мультисенсорний підхід — комбінацію двох і більше методів для зниження рівня хибних тривог та підвищення надійності виявлення.

Таблиця 1.4 — Порівняльна характеристика методів виявлення рухомих об'єктів

Метод / технологія	Дальність дії	Точність / роздільн.	Споживання	Особливості та обмеження
PIR (пасивний ІЧ)	2–15 м	Зона $\pm 15\text{--}30^\circ$ без координат	< 1 мВт (режим сну)	Не працює при T об'єкта = T фону. Не розрізняє типи. Реагує лише на рух у полі зору.
Мікрохвильовий радар (Doppler)	0.5–200 м	± 0.1 м/с по швидк. немає координат	10–500 мВт	Проникає крізь стіни. Хибні спрацьовування від вітру, вібрацій. Визначає швидкість, але не положення.
УЗ-сонар	0.02–10 м	1–3 см по відстані	10–50 мВт	Залежить від температури і вологості повітря. Погано працює на відкритому просторі та з м'якими поверхнями.
Відеокамера (комп'ютерний зір)	0.5–100+ м	Пікселі (субмм–м)	0.5–5 Вт	Найбагатша інформація. Потребує обчислень (CNN, optical flow). Не працює у темряві без освітлення.
Магнетометр (AMR)	до 10 м від цілі	0.1–1 нТл	1–5 мВт	Лише для феромагнітних об'єктів (авто). Чутливий до перешкод від будівель, кабелів.
Лідар (ToF)	1–200 м	1–5 см	0.5–20 Вт	Висока точність 3D-картини. Дорогий. Гірша робота в дощ, туман, снігопад.
Акселерометр MEMS (вібрації)	0–5 м (через ґрунт)	0.1 мг RMS (16-бітний)	0.01–1 мВт	Пасивний метод. Класифікація типу об'єкта можлива через машинне навчання. Чутливий до навколишніх вібрацій.
RSSI (BLE/Wi-Fi)	1–50 м	$\pm 1\text{--}5$ м (RSSI) ± 0.1 м (UWB)	1–10 мВт (BLE)	Потребує активного мітки на об'єкті. Точність RSSI сильно залежить від багатопроменевого поширення.
Геофон / сейсмічний	5–200 м	Клас цілі (не координати)	< 0.1 мВт	Виявляє кроки, колеса. Пасивний, малоенергетичний.
Теплова камера (LWIR)	1–500 м	$\Delta T = 0.05^\circ\text{C}$ (NETD)	0.5–5 Вт	Працює у темряві, тумані. Дорога. Не виявляє об'єкти при рівній температурі з фоном.

Таким чином, в даному розділі розглянуто характерні фізичні прояви руху фізичних об'єктів та методів їх ідентифікації.

1.3. Огляд існуючих систем моніторингу

Моніторинг рухомих об'єктів є однією з ключових задач сучасних інформаційних систем і широко застосовується у військовій сфері, екологічному моніторингу, логістиці, транспорті та охороні здоров'я. Такі системи дозволяють у реальному часі відстежувати положення, швидкість, траєкторію та інші параметри різних цілей — транспортних засобів, тварин, людей або військової техніки. Основу цих систем становлять сенсорні мережі, які поєднують різноманітні датчики, засоби обробки даних і бездротові канали зв'язку [2, 3].

Існуючі рішення класифікують за типом технології (GPS, RFID, бездротові сенсорні мережі, IoT-системи та гібридні комплекси), за мобільністю сенсорних вузлів (стаціонарні, рухомі або гібридні), за середовищем застосування та за основним призначенням (трекінг, виявлення чи класифікація). У цьому розділі розглянуто конкретні приклади систем з посиланнями на наукові публікації, їх архітектуру, переваги та недоліки. Це дає можливість обґрунтувати розробку власної мережі сенсорів. Результати порівняльного аналізу приведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5. Порівняльний аналіз існуючих технологій моніторингу рухомих об'єктів

Технологія	Точність пози- ціонування	Дальність дії	Енергоспо- живання	Вартість	Масшта- бованість	Основні обмеження
GPS	5–10 м	Глобальна	Високе	Середня	Висока	Залежність від супутникового сигналу
RFID	0,1–10 м	До 100 м	Низьке (пасивні)	Низька	Середня	Потреба в ридерах
WSN (стаціонарна)	1–5 м	До 100 м (на гор)	Низьке	Низька	Висока	Обмежене покриття

Технологія	Точність позиціонування	Дальність дії	Енергоспоживання	Вартість	Масштабованість	Основні обмеження
MWSN (ZebraNet)	1–5 м	Динамічна	Середнє	Середня	Висока	Складність управління мобільністю
UGS (Flexnet)	1–10 м	Динамічна	Низьке	Середня	Висока	Тактичне розгортання
IoT-гібридні системи	0,1–10 м	Глобальна + indoor	Середнє	Висока	Висока	Складність інтеграції

Системи на основі GPS є одним із найпоширеніших рішень для глобального моніторингу рухомих об'єктів на відкритому просторі. Вони забезпечують точність позиціонування в межах 5–10 метрів і широко використовуються в логістиці та транспорті завдяки глобальному покриттю та простоті інтеграції. Типова архітектура включає GPS-модуль, мікроконтролер, додаткові датчики та GPRS-модем для передачі даних через Інтернет.

Однак такі системи мають суттєві недоліки: високе енергоспоживання, сильну залежність від супутникового сигналу (який зникає в тунелях, лісах чи щільній забудові) та неможливість ефективної роботи в закритих приміщеннях.

RFID-технології забезпечують короткодіапазонну ідентифікацію та трекінг за допомогою пасивних або активних міток. Пасивні мітки не потребують живлення, що робить їх дешевими, але обмежує дальність приблизно до 10 метрів. Активні мітки працюють на більших відстанях, проте коштують дорожче. У науковій літературі RFID-системи часто розглядаються як частина ланцюгів постачання з передачею даних через middleware до EPCIS та ERP-систем.

Порівняно з сенсорними мережами RFID-рішення менш гнучкі для одночасного відстеження великої кількості об'єктів у динамічному середовищі.

Бездротові сенсорні мережі (WSN) вважаються однією з найбільш перспективних технологій завдяки низькій вартості вузлів, високій масштабованості та можливості розподіленої обробки даних. Класичний огляд Yick et al. (2008) підкреслює їх ефективність для задач target tracking і surveillance.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

Яскравим прикладом є проєкт ZebraNe (Princeton University, 2002–2005). У ньому сенсорні вузли з GPS-модулями на ший зебр збирали дані про пересування тварин у савані та передавали їх через самоорганізовану ad-hoc мережу до базової станції. Проєкт продемонстрував переваги енергоефективних протоколів для мобільних WSN.

Іншим прикладом є військові системи Unattended Ground Sensors (UGS), зокрема Flexnet. Вони складаються з пасивних сенсорів (сейсмічних, акустичних, оптичних) для виявлення та трекінгу рухомих об'єктів у тактичних умовах. Такі мережі забезпечують низький рівень помилкових спрацьовувань і працюють у будь-яких погодних умовах.

Сучасні IoT-орієнтовані системи інтегрують WSN з хмарними платформами, що дозволяє застосовувати машинне навчання та аналіз великих даних. Гібридні рішення поєднують GPS, RFID, WSN та UWB для забезпечення безперервного трекінгу як у приміщеннях, так і на відкритому просторі з точністю 10–30 см.

Порівняльний аналіз показує, що бездротові сенсорні мережі забезпечують найкращий баланс між вартістю, енергоспоживанням і масштабовністю, хоча й мають обмеження щодо адаптації до динамічних перешкод.

Підсумовуючи, огляд конкретних реалізацій (ZebraNet, UGS Flexnet, GPS- та RFID-систем) показує, що бездротові сенсорні мережі є оптимальною технологічною основою для моніторингу рухомих об'єктів. Вони пропонують найкраще поєднання функціональності та ресурсоощадності. Однак існуючі рішення потребують удосконалення в частині адаптивності та енергетичної ефективності. Саме тому в наступних розділах буде обґрунтовано архітектуру, моделі та алгоритми власної розробки мережі сенсорів.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

1.4. Постановка задачі по ідентифікації рухомих об'єктів

Сучасні системи охорони периметра, контролю трафіку та забезпечення безпеки критичної інфраструктури потребують надійних, енергоефективних і масштабованих засобів виявлення та ідентифікації рухомих об'єктів у реальному часі. Існуючі рішення, як правило, орієнтовані на окремі класи об'єктів або використовують один тип сенсорів, що суттєво обмежує їхню практичну цінність в умовах неоднорідного та динамічного середовища.

Метою даної бакалаврської роботи є проектування мережі сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів, яка забезпечує виявлення, класифікацію та відстеження цільових об'єктів на основі даних із гетерогенних джерел вимірювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Аналіз класів рухомих об'єктів. Визначити характерні фізичні сигнатури для кожного з п'яти класів об'єктів, що підлягають моніторингу: пішоходів, колісного транспорту (автомобілів і мотоциклів), гусеничної бронетехніки (БТР, танків), наземних роботизованих платформ і безпілотних літальних апаратів. Кожен клас характеризується відмінними значеннями теплового випромінювання, акустичного шуму, сейсмічної вібрації, магнітної аномалії та радіолокаційного перерізу, що становить основу для розроблення алгоритмів розпізнавання.

2. Дослідження методів виявлення руху. Провести порівняльний аналіз п'яти фізичних принципів сенсорного виявлення: пасивних інфрачервоних сенсорів (PIR), що реагують на зміни теплового поля в зоні контролю; акустичних сенсорів, які реєструють низькочастотні звукові та вібраційні хвилі від рухомих механізмів; сейсмічних сенсорів, що вимірюють коливання ґрунту, спричинені механічним навантаженням; магнітометричних сенсорів, чутливих до спотворень геомагнітного поля феромагнітними масами; радарних модулів, здатних визначати дальність, швидкість і кутові координати об'єктів за принципом доплерівського зсуву частоти.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

3. Синтез мультисенсорної архітектури. Розробити топологію розгортання вузлів сенсорної мережі та алгоритм злиття даних (sensor fusion), що поєднує сигнали різнорідних перетворювачів з метою підвищення достовірності класифікації та зниження рівня хибних спрацювань у порівнянні з моносенсорними підходами.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного виявлення та класифікації рухомих об'єктів в умовах обмеженої апаратної бази. Предметом дослідження є методи сенсорної інтеграції та алгоритми прийняття рішень у розподілених вимірювальних системах.

Практичне втілення мережі сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів вимагає узгодженого вирішення низки взаємопов'язаних апаратних і програмних задач, які охоплюють увесь стек системи — від фізичного рівня збору сигналів до рівня прийняття рішень і передачі даних.

1. Вибір і схемотехнічна інтеграція сенсорного модуля. Необхідно розробити принципову схему вузла збору даних, що об'єднує PIR-сенсор, мікрофонний або п'єзоелектричний перетворювач, геофон або MEMS-акселерометр, магнітометр (наприклад, на основі ефекту Холла або AMR-технології) та мікрохвильовий доплерівський радарний модуль. Ключовою задачею є забезпечення електромагнітної сумісності компонентів, узгодження рівнів аналогових сигналів та організація живлення з урахуванням енергетичного бюджету автономного вузла.

2. Розробка вбудованого програмного забезпечення (firmware). На мікроконтролерній платформі потрібно реалізувати програму керування циклом вимірювання: синхронне та асинхронне опитування сенсорів, буферизацію вибірок у кільцевій пам'яті, переривання за подією та режими глибокого сну для мінімізації енергоспоживання між сеансами активності. Окремою підзадачею є калібрування кожного каналу вимірювання відносно базової лінії середовища.

3. Реалізація алгоритму класифікації об'єктів. На основі виділених ознак потрібно реалізувати алгоритм прийняття рішень — від детерміністичного порогового класифікатора до легковагової нейронної мережі (TinyML),

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

придатної для виконання на мікроконтролері з обмеженими обчислювальними ресурсами. Алгоритм має забезпечувати розрізнення визначених п'яти класів об'єктів із заданою мінімальною точністю та підтримувати механізм злиття рішень (decision fusion) від кількох вузлів мережі.

4. Організація бездротової передачі даних. Необхідно обрати та програмно налаштувати протокол бездротового зв'язку (LoRa, Zigbee, BLE або sub-GHz ISM-діапазон) відповідно до вимог дальності, пропускної здатності та енергоспоживання. На програмному рівні слід реалізувати формат пакету повідомлення, що містить ідентифікатор вузла, мітку часу, клас виявленого об'єкта та рівень достовірності класифікації, а також механізм підтвердження доставки та повторної передачі.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ТА ЇЇ КОМПОНЕНТІВ

2.1. Розробка структури системи

Проектована система являє собою трирівневу розподілену архітектуру, в якій кожен рівень виконує чітко розмежовані функції збору, агрегації та обробки інформації. Нижній рівень утворюють автономні сенсорні вузли, розгорнуті безпосередньо в зоні спостереження. Вузли забезпечують безперервний збір фізичних сигналів від гетерогенних первинних перетворювачів і виконують попередню обробку даних локально, що дозволяє суттєво знизити обсяг трафіку, який передається далі по мережі – рисунок 2.1.

Середній рівень представлений шлюзом (gateway), який акумулює дані від усіх вузлів у межах зони покриття, перетворює протоколи ближнього радіозв'язку у стандарт передачі даних на великі відстані та забезпечує буферизацію повідомлень у разі тимчасової недоступності хмарного з'єднання.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

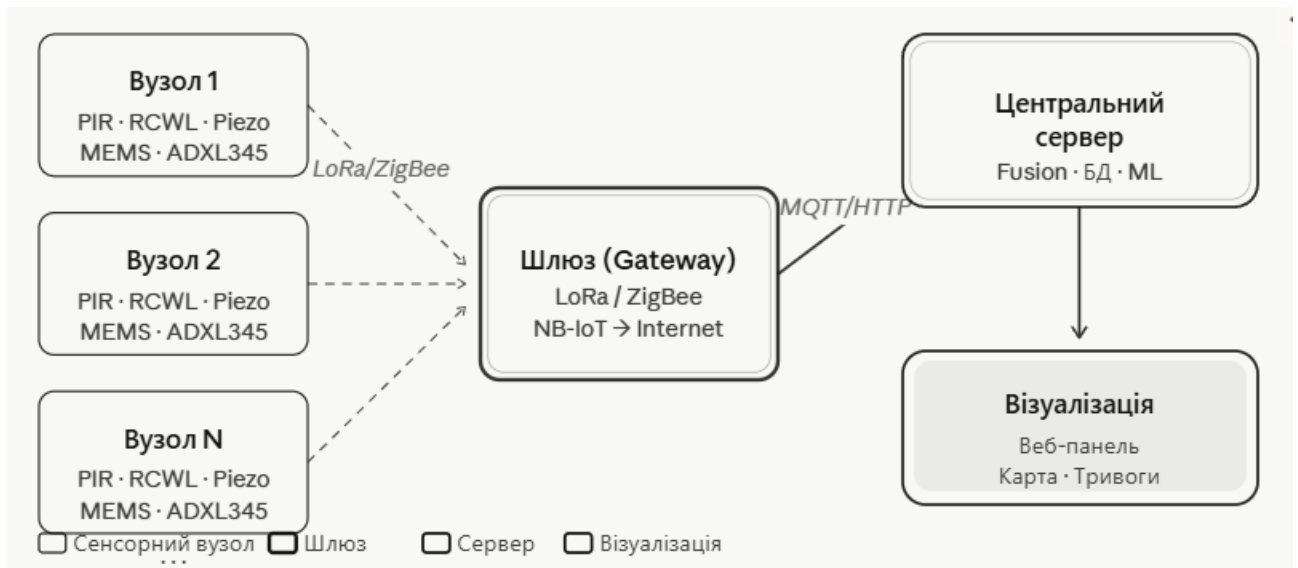


Рисунок 2.1 — Загальна структура сенсорної мережі моніторингу рухомих об'єктів

Середній рівень представлений шлюзом (gateway), який акумулює дані від усіх вузлів у межах зони покриття, перетворює протоколи ближнього радіозв'язку у стандарт передачі даних на великі відстані та забезпечує буферизацію повідомлень у разі тимчасової недоступності хмарного з'єднання. Верхній рівень — центральний сервер — виконує злиття даних від кількох шлюзів, зберігає часові ряди подій у базі даних і запускає алгоритми класифікації та трекінгу об'єктів. Результати відображаються в режимі реального часу на панелі візуалізації, яка показує географічну карту активності, траєкторії цілей і журнал тривог.

Структурна схема вузла відображає функціональний розподіл між апаратними блоками та напрямки потоків даних. Центральне положення займає мікроконтролер ESP32, до якого сходяться сигнальні лінії від усіх чотирьох сенсорів.

Таким чином, запропонована архітектура сенсорного вузла поєднує чотири фізичні каналів вимірювання з енергоефективною обчислювальною платформою ESP32 та радіомодулем LoRa.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

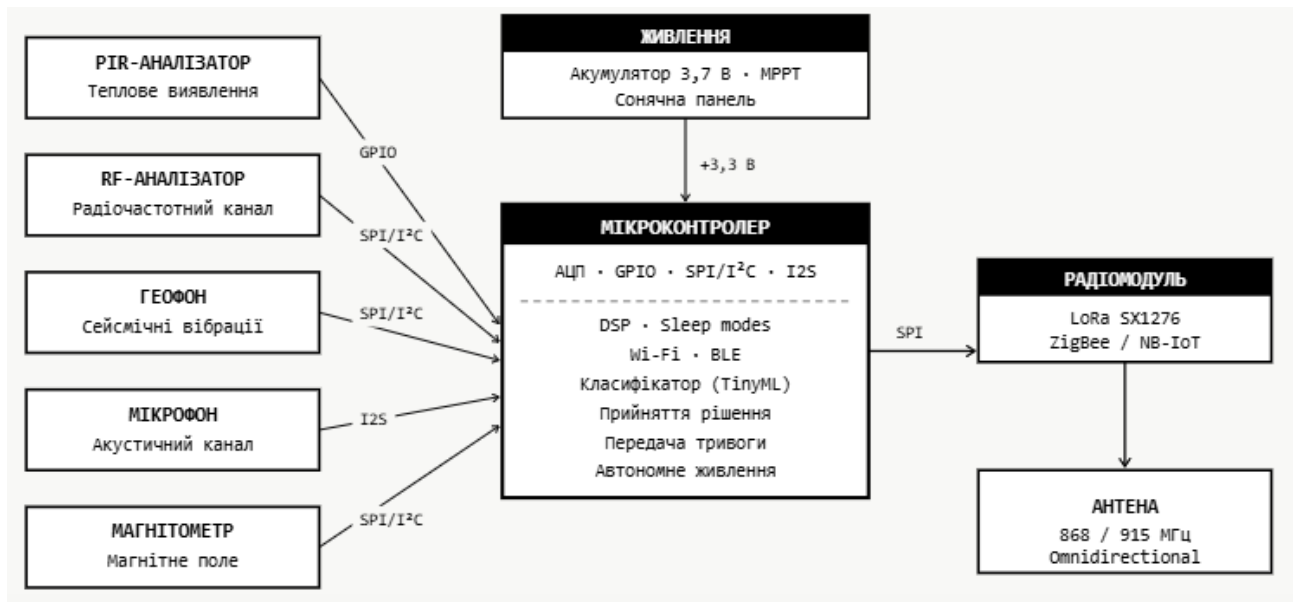


Рисунок 2.3 — Структурна схема сенсорного вузла мережі моніторингу

Кластерна топологія мережі забезпечує оптимальний баланс між масштабованістю, відмовостійкістю та автономністю, а трирівнева ієрархія «вузол — шлюз — сервер» дозволяє розподілити обчислювальне навантаження між рівнями та мінімізувати обсяг переданих по бездротовому каналу даних.

2.2 Обґрунтування вибору сенсорів та мікроконтролера

Вибір сенсорного складу вузла визначається необхідністю охоплення декількох незалежних фізичних каналів вимірювання, що дозволяє ідентифікувати різні класи цілей навіть за умов часткового перекриття сигнатур. При виборі сенсорів вирішальним було мінімальне споживання, оскільки живлення схеми здійснюється від акумулятора [4-8, 12].

Для виявлення транспортних засобів і гусеничної техніки використовується геофон: значне механічне навантаження від ходової частини генерує характерний низькочастотний сигнал у ґрунті, який пасивний сенсор реєструє без будь-якого власного живлення. Для цих цілей пропонується геофон ST-4.5A — спеціалізований низькочастотний сенсор з чутливістю розімкненого

кола 100 В/м/с та діапазоном частотної відповіді від 5 Гц до 1000 Гц – рисунок 2.2.



Рисунок 2.3 - Спеціалізований низькочастотний сенсор ST-4.5A

Сигнал геофону подається на блок демпфування. Геофон 4,5 Гц видає диференційний сигнал ~1 мВ при слабких вібраціях – рисунок 2.5. Паралельний резистор 560 Ом виконує подвійну роль: демпфує механічний резонанс котушки (щоб не було «дзвону» після імпульсу кроку) і узгоджує вихідний імпеданс геофона з входом підсилювача. TVS-діод та конденсатор 100 нФ на вході захищають від статички та ВЧ-перешкод. Підсилювач INA128 виконує підсилення аналогового сигналу геофону. Рівень власного шуму INA128 становить ~0,2 мкВ (пік-пік), що у 20 разів нижче, ніж у типових підсилювачів загального призначення.

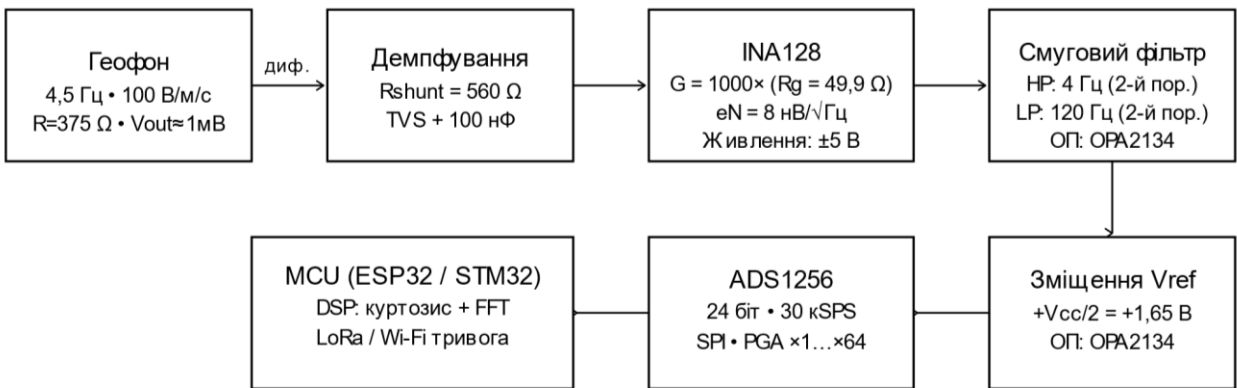


Рисунок 2.4 – Схема вимірювального каналу геофону, підключення АЦП до мікроконтролера та розрахункові номінали компонентів

ADS1256	Сигнал / призначення	MCU (ESP32 / STM32)
SCLK	Тактовий сигнал SPI ($\leq 1,92$ МГц)	SCK (SPI)
DIN	Дані MCU $\rightarrow$ ADS (команди, регістри)	MOSI (SPI)
DOUT	Дані ADS $\rightarrow$ MCU (результат АЦП)	MISO (SPI)
CS	Вибір мікросхеми (активний LOW)	GPIO (CS)
DRDY	Готовність даних — перерив. MCU (LOW)	GPIO (IRQ вхід)
RESET	Апаратне скидання (LOW = reset)	GPIO (вихід)
PDWN	Вимкнення живлення (LOW = sleep)	GPIO (вихід)
AVDD / DVDD	+5 В аналог / +3,3 В цифра + GND	PWR + AGND / DGND

Рисунок 2.4 – Схема підключення АЦП до мікроконтролера

Коефіцієнт підсилення $1000\times$ ($R_g = 49,9$ Ом) піднімає сигнал геофона з 1 мВ до ~ 1 В — у зону впевненої роботи АЦП. На відносно тихих ділянках рекомендується підсилення $10\,000\times$, у місцях з підвищеним шумом — $1000\times$, щоб уникнути насичення – рисунок 2.6.



Рисунок 2.6 – Підсилювач INA128

Смуговий фільтр Sallen-Key. Нижня межа 4 Гц відсікає механічні шуми від вітру та далекий сейсмічний фон. Верхня межа 120 Гц прибирає ВЧ-шум і задовольняє теорему Найквіста для частоти вибірки 500 Гц. Сучасна тенденція у сейсмічних системах — простий малоступеневий підсилювач і 24-бітний АЦП з високою роздільною здатністю для захоплення всього динамічного діапазону сигналу. ADS1256 має вбудований PGA ($\times 1 \dots \times 64$), що дозволяє програмно підлаштовувати чутливість без перепаювання – рисунок 2.7 [9].

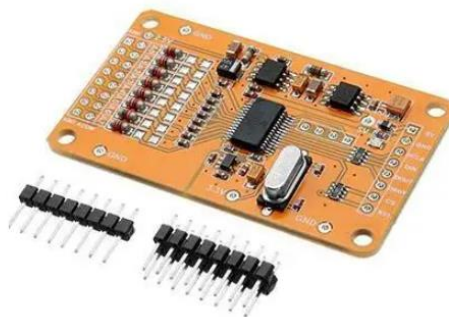


Рисунок 2.6 – АЦП ADS1256

ADS1256 найкраще підходить для багатоканальних систем моніторингу повільних та середньочастотних процесів, де важливо зберегти цілісність сигналу при дуже високій чутливості. Використання цього АЦП разом із обчисленням куртозису дозволить отримати цифрові дані з достатньою глибиною для точного виявлення імпульсних завад навіть при мінімальних амплітудах.

Сигнал геофона обмежується смугою 10–100 Гц, далі обчислюється куртозис. Якщо значення перевищує фон — фіксується вторгнення. Куртозис ефективно відрізняє різкі імпульси кроків від плавного фоновому шуму вітру і не вимагає складних обчислень — ESP32 або STM32 обраховують вікно за мікросекунди. Куртозис (або коефіцієнт ексцесу) — це статистичний показник, який описує «гостровершинність» розподілу ймовірностей і, що найважливіше, дозволяє виявити наявність викидів (імпульсів), які вибиваються із загальної картини шуму.

Наступним сенсором, який включений у вузол є сенсор теплового випромінювання – PIR. В його ролі пропонується використати призначений для охоронних систем і систем виявлення руху промисловий сенсор Murata IRA-E700ST0 – рисунок 2.7.

Включає оптичний фільтр для відсікання видимого світла. Живлення від 2 до 15 В, кут огляду $\pm 45^\circ$, робочий діапазон $-40...+70^\circ\text{C}$. Texas Instruments офіційно використовує саме цей сенсор у для виявлення людини та тварин.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

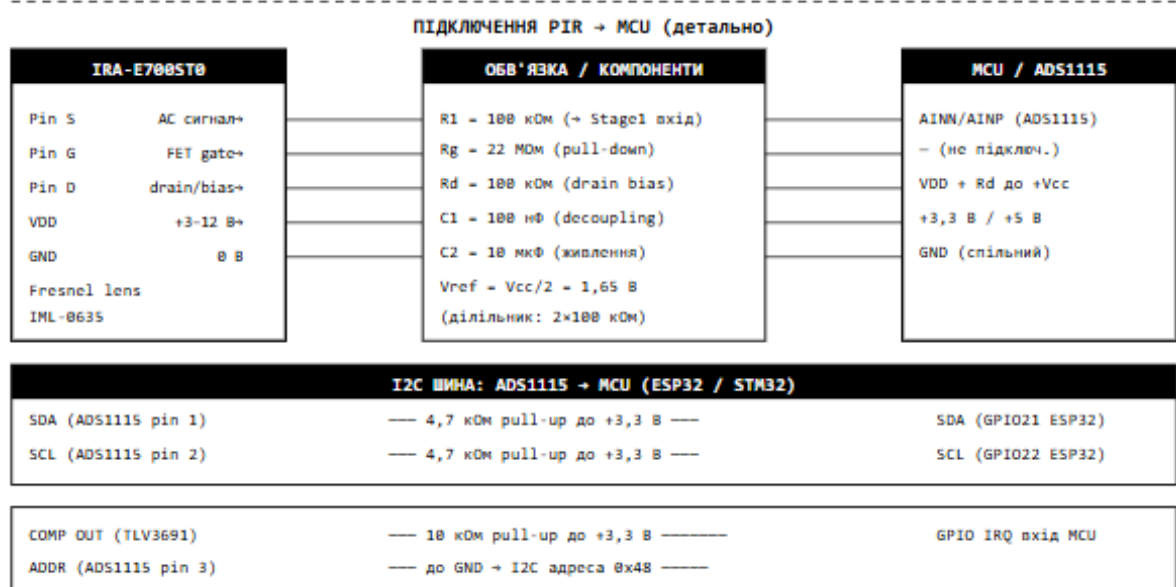
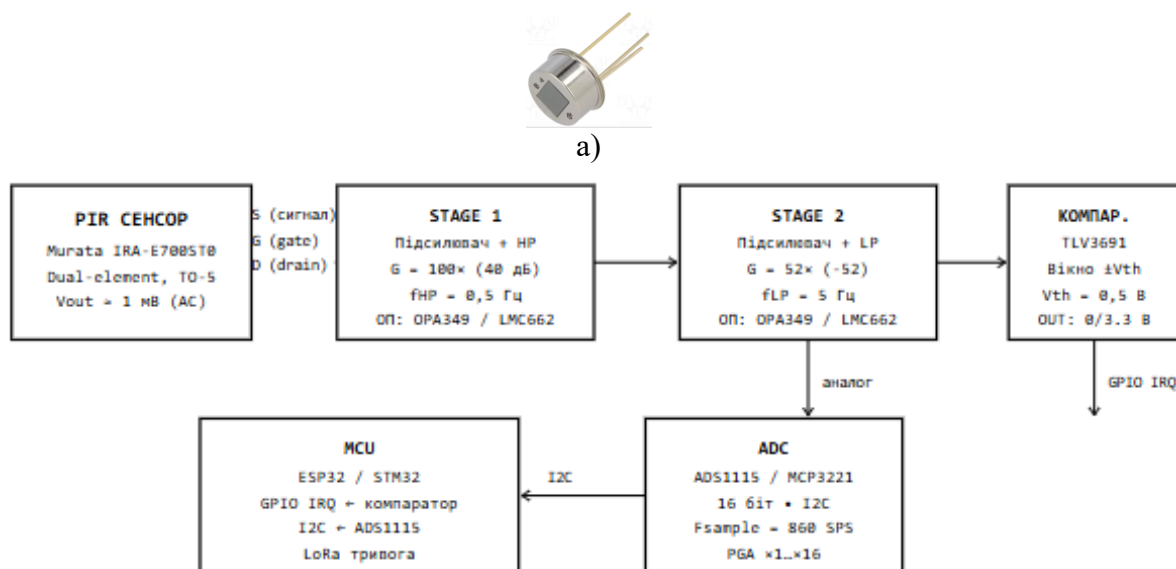


Рисунок 2.7 - Промисловий сенсор Murata IRA-E700ST0-а) та схема його підключення – б)

Любе тіло випромінює інфрачервоне тепло. Сенсор не випромінює нічого сам — він лише фіксує зміни інфрачервоного випромінювання від об'єктів у своєму полі зору. Людина або нагрітий двигун дрона дають сильний тепловий контраст на фоні холодного ґрунту. При цьому сенсор видає змінний сигнал на рівні 1 мВ. Цей сигнал накладений на постійний зсув, який може відрізнитися від одного сенсора до іншого. Тому обов'язково потрібно усунути постійну складову та підсилити змінну. Перший підсилювач Stage 1 підіймає сигнал у 100 разів і

одночасно відсікає все нижче 0,5 Гц (прибирає повільний температурний дрейф). Підсилювач використовується в неінвертуючому включенні з коефіцієнтом підсилення близько 40 дБ. Другий підсилювач Stage 2 ще раз підсилює в 52 рази і відсікає все вище 5 Гц (прибирає радіоперешкоди та швидкі шуми). Після двох каскадів сигнал зростає з 1 мВ до ~5 В — вже зручний для аналізу. Компаратор перевіряє: якщо сигнал вийшов за межі вікна $\pm 0,5$ В — на виході з'являється логічна одиниця, яка будить MCU через переривання. Це миттєве сповіщення без участі програмного опитування. АЦП (ADC) паралельно оцифровує безперервний аналоговий сигнал і передає його по I²C — MCU може аналізувати форму імпульсу, його тривалість та амплітуду для розрізнення людини (повільні плавні піки 0,3–3 Гц) від двигуна (більш регулярні осциляції).

Третій вимірювальний канал виконано на основі магнітометра. Для цього пропонується використати магнітометр RM3100 – рисунок 2.8, 2.9.



Рисунок 2.8 - Магнітометр RM3100

Це магнітометр воєнного класу, перевірений у широкому діапазоні застосувань. Земля має постійне магнітне поле приблизно 50 000 нТл.



Рисунок 2.9 – Вимірювальний канал магнітометра

Будь-яка залізна або сталева маса — корпус БТР, двигун автомобіля, гармата — спотворює це поле поруч із собою. Такі компоненти, як двигуни або металеві деталі техніки, тимчасово спотворюють геомагнітне поле поблизу сенсора. Магнітометр фіксує саме це відхилення від норми.

Для виявлення повітряних цілей в склад вузла мережі включено RF-аналізатор рисунок 2.10. Кожен дрон під час польоту постійно передає радіосигнал між собою і пультом керування. Трафік на частотах 2,4 та 5,8 ГГц з великою ймовірністю вказує на те, що джерелом сигналу є дрон. Система нічого не випромінює сама — вона лише слухає ефір, тому її неможливо виявити або заглушити.

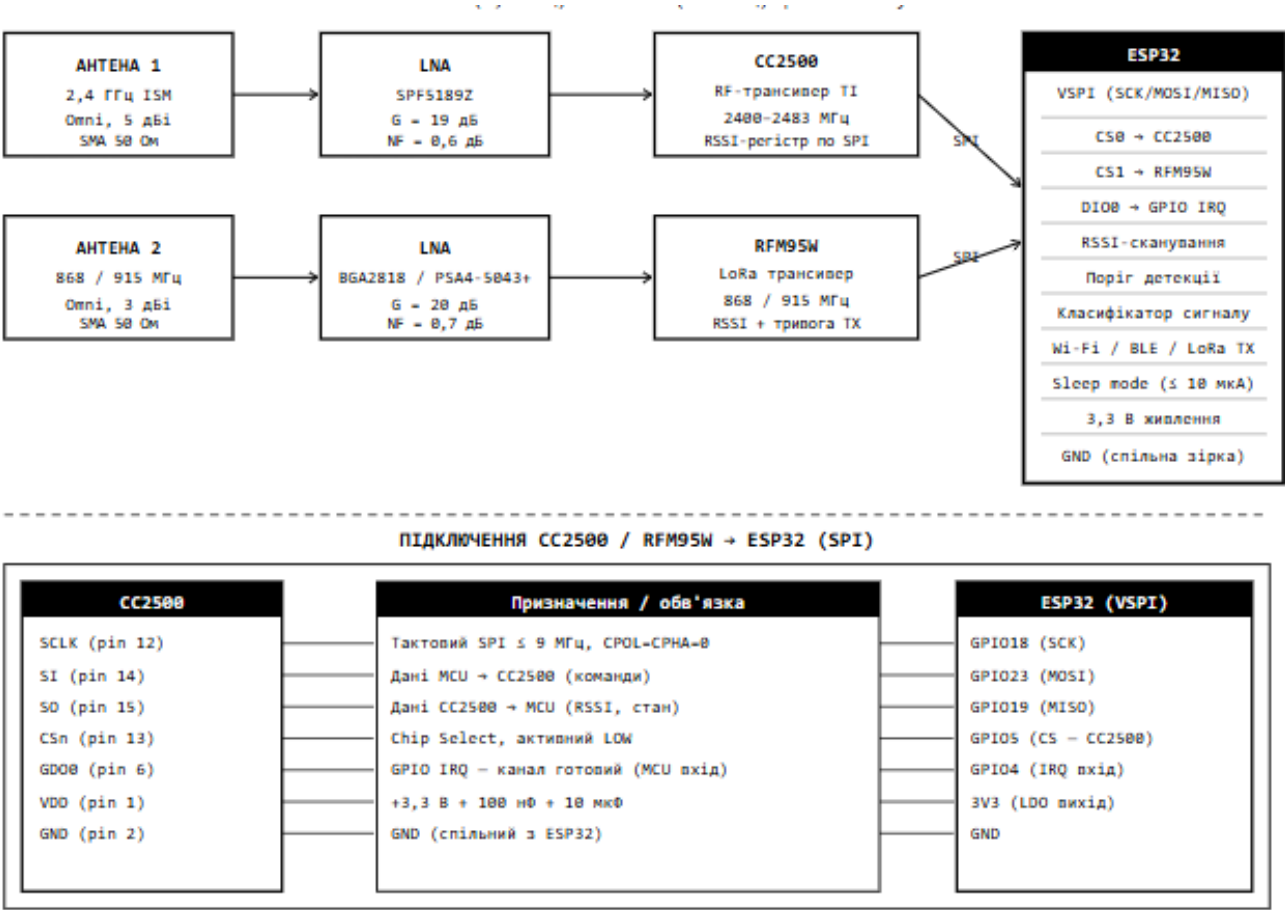


Рисунок 2.10 – Вимірювальний канал на основі RF-аналізатора

Антенa приймає слабкий сигнал дрона. LNA SPF5189Z підсилює його в 8 разів за потужністю (19 дБ), перш ніж він потрапить у приймач, що критично для

виявлення на відстані. SAW-фільтр відсікає всі частоти поза смугою 2,4 ГГц — Wi-Fi сусідів, стільниковий зв'язок, інші перешкоди. RTL-SDR оцифровує сигнал і передає I/Q вибірки по USB.

Цифрова обробка. Оптимальний розмір FFT — 512 точок: він дає достатнє частотне розрізнення при затримці реакції менше 3 секунд, що є прийнятним для реального часу. Raspberry Pi неперервно аналізує спектр: якщо в характерних каналах дрона з'являється сигнал потужністю вище порогу -80 дБм — генерується тривога через LoRa.

Головне обмеження. RTL-SDR перекриває 2,4 ГГц і нижче. Для виявлення FPV-відео на 5,8 ГГц потрібен окремий приймач або downconverter. Дослідна система на базі HackRF One і Raspberry Pi успішно виявляла дрон та пульт керування на відстані 30 метрів в умовах відкритого поля. RTL-SDR з якісним LNA дає порівнянний результат при значно меншій вартості.

Центральним обчислювальним елементом вузла обрано мікроконтролер ESP32 виробництва Espressif Systems – рисунок 2.11.



Рисунок 2.11 - ESP32-DEVKITC-32UE Espressif Systems

Ключовим аргументом на користь цієї платформи є поєднання в єдиному кристалі двоядерного процесора, вбудованого 12-бітного АЦП із вісьмома каналами, апаратні інтерфейси SPI, I²C, UART та вбудований радіомодуль Wi-Fi 802.11 b/g/n і Bluetooth 4.2/BLE. Така інтеграція є достатньою для налагодження та локального конфігурування автономного сенсорного вузла. Для автономної

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

роботи принципово важливими є апаратні режими енергозбереження ESP32. У режимі глибокого сну (Deep Sleep) споживання знижується до 10–150 мкА, при цьому таймер реального часу або зовнішнє переривання від PIR-сенсора можуть пробудити мікроконтролер за кілька мілісекунд. Режим Modem Sleep вимикає радіоблок, залишаючи активним процесор і периферію, що зручно під час безперервного сенсорного опитування з рідкою передачею результатів.

2.3 Оцінка невизначеності результатів вимірювань та ідентифікації рухомого об'єкту

Будь-яке вимірювання фізичної величини супроводжується помилками, що призводить до відхилення отриманого результату від істинного значення. У сучасній метрології замість поняття «похибка» все частіше використовують термін невизначеність вимірювання (англ. measurement uncertainty), введений керівництвом ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM) [5, 6].

Невизначеність вимірювання — це параметр, який характеризує розсіювання значень, що можуть бути приписані вимірюваній величині. Розрізняють два типи невизначеності:

- Тип А — оцінюється шляхом статистичного аналізу серії вимірювань;
- Тип В — оцінюється на основі апіорних даних (специфікацій, калібрувальних сертифікатів, експертних знань).

Стандартна невизначеність типу А визначається як середньоквадратичне відхилення середнього значення:

$$u_A = s / \sqrt{n} = \sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n(n-1))]}$$

де n — кількість вимірювань; x_i — окреме вимірювання; $\bar{x}$ — середнє значення.

Для оцінки невизначеності типу В при рівномірному розподілі:

$$u_B = a / \sqrt{3}$$

де a — напівширина інтервалу можливих значень.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

Сукупна стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$$

Розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення $k = 2$ (довірча ймовірність 95 %):

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot u_c$$

У мережі сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів застосовуються: геофон, PIR-сенсор, мікрофон, магнітометр та RF-аналізатор. Кожен з них має специфічні джерела завад природного та воєнного середовища [2, 3].

Таблиця 2.1 — Класифікація завад та їх вплив на сенсори

Сенсор	Природні завади	Воєнні завади	Вплив на невизначеність
Геофон	Вітер, дощ, мікросейсміка ґрунту, коріння дерев	Артилерійський вогонь, підривання, вібрація техніки	Збільшення σ на 15–40 %; хибні спрацювання
PIR-сенсор	Сонячне проміння, тварини, нагрів ґрунту вдень	Теплові пастки, маскувальні накидки, БПЛА	Зниження P_d до 0,6 при маскуванні
Мікрофон	Вітер (>5 м/с), гроза, птахи, комахи	Залповий вогонь, реактивні двигуни, РЕБ	$SNR < 6$ дБ $\rightarrow$ похибка класифікації > 30 %
Магнітометр	Геоманітні бурі, ґрунтові мінерали, блискавки	Феромаскування, магнітні пастки, бронетехніка	Зміщення нуля до ± 50 нТл
RF-аналізатор	Промислові перешкоди, атмосферні розряди	Глушіння (РЕБ), хибні сигнали-імітатори	Збільшення BER, хибна ідентифікація

Розглянемо детальніше вплив на покази цих 5 сенсорів зовнішнє середовище та завади. Геофон вимірює вертикальні коливання ґрунту в діапазоні частот 1–100 Гц. Сигнал від рухомого об'єкта описується моделлю [4]:

$$x(t) = A \cdot e^{(-\alpha r)} \cdot \sin(2\pi f_0 t) + n(t)$$

де A — амплітуда; α — коефіцієнт загасання; r — відстань до об'єкта; $n(t)$ — завада (білий шум + мікросейсміка).

Ефективна дальність виявлення пішохода складає 15–30 м, легкого транспорту — до 150 м. При артилерійській стрільбі рівень завад зростає до 10^{-3} м/с, що перевищує рівень сигналу від людини.

PIR-сенсор виявляє теплове випромінювання в діапазоні 8–14 мкм. Ймовірність виявлення описується функцією [5]:

$$P_d = 1 - \exp(-(\Delta T / \sigma_T)^2)$$

де ΔT — різниця температур об'єкта і фону; σ_T — стандартне відхилення температурного шуму.

Сонячний прогрів підстилаючої поверхні підвищує σ_T до 3–5 К, що знижує P_d вдень. Теплові пастки (запалені ємності, тощо) генерують хибні позитивні спрацювання.

Акустичний сенсор реєструє звуковий тиск у діапазоні 20 Гц–20 кГц. Відношення сигнал/завада (SNR) є ключовим параметром:

$$SNR = 10 \cdot \lg(P_s / P_n), \text{ дБ}$$

де P_s — потужність сигналу; P_n — потужність завади.

За умов вітру понад 5 м/с рівень акустичного шуму підвищується на 15–25 дБ. Засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) можуть генерувати широкосмуговий шум у діапазоні 1–10 кГц, що унеможлиблює класифікацію цілей.

Магнітометр вимірює проекції вектора магнітного поля. Похибка вимірювання при наявності геомагнітної бурі:

$$\delta B = B_{\text{вим}} - B_{\text{еталон}} = \Delta B_{\text{буря}} + \Delta B_{\text{геол}} + \varepsilon_{\text{шум}}$$

Під час геомагнітних бур магнітне поле Землі змінюється на 10–500 нТл упродовж хвилин–годин. Феромаскування — нанесення немагнітних матеріалів на техніку — зменшує магнітну сигнатуру на 60–80 %.

RF-аналізатор ідентифікує об'єкти за радіосигнатурами (GSM, WiFi, Bluetooth, тактичні радіостанції). Ймовірність хибної ідентифікації зростає при глушінні:

$$P_{fa} = Q(\sqrt{2 \cdot SNR \cdot T_{\text{obs}} \cdot B})$$

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

де $Q(\cdot)$ — функція Маркума; T_{obs} — час спостереження; B — смуга аналізу.

Ідентифікація рухомих об'єктів (людина, наземний транспорт, повітряний транспорт) виконується шляхом злиття даних (sensor fusion) з декількох сенсорів. Загальна невизначеність системи при використанні правила Дампстера–Шефера [6]:

$$m(A) = [\sum m_1(A_i) \cdot m_2(A_j)] / K, \quad A_i \cap A_j = A$$

де K — нормуючий коефіцієнт, що враховує конфлікт між джерелами.

Таблиця 3.2 — Точність ідентифікації об'єктів за типом сенсора (без завад / з завадами)

Об'єкт	Геофон	PIR	Мікрофон	Магнітометр	Fusion
Людина	78 / 55 %	92 / 60 %	85 / 52 %	45 / 40 %	95 / 80 %
Наземний транспорт	95 / 75 %	88 / 65 %	90 / 68 %	92 / 70 %	98 / 88 %
Повітряний транспорт	30 / 20 %	75 / 55 %	88 / 60 %	55 / 45 %	90 / 72 %

Для зниження впливу завад застосовуються: вейвлет-фільтрація сейсмічного сигналу (зниження рівня шуму на 8–12 дБ), адаптивне пороговання PIR (компенсація теплового дрейфу фону), просторово-часова обробка акустичних масивів (beamforming), компенсація постійної складової магнітного поля, а також перевірка узгодженості радіосигнатур [4, 5].

Таким чином, в даному розділі проведено комплексну оцінку невизначеності вимірювань у сенсорній мережі моніторингу рухомих об'єктів. Встановлено: що основними джерелами невизначеності є природні завади (вітер, мікросейсміка, теплові ефекти) та воєнні завади (РЕБ, феромаскування, вибухи); — найбільший відносний вплив на якість ідентифікації чинять акустичні та теплові завади; злиття даних за правилом Дампстера–Шефера дозволяє підвищити точність ідентифікації на 15–25 %; розширена невизначеність

системи складає $U \approx 27\%$ при $k = 2$, що відповідає прийнятному рівню для моніторингу.

3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ЗБОРУ ДАНИХ

3.1. Алгоритм збору та обробки даних сенсорів

Алгоритм збору та обробки даних сенсорів мережі моніторингу рухомих об'єктів реалізує трирівневу ієрархічну обробку: рівень збору первинних даних сенсорів, рівень попередньої обробки та фільтрації, рівень злиття даних (Data Fusion) і прийняття рішення.

На першому рівні п'ять сенсорів — геофон, PIR-сенсор, мікрофон, магнітометр та RF-аналізатор — ведуть безперервний або подієво-керований збір даних – таблиця 3.1. Кожен сенсор має власний цикл опитування з частотою дискретизації, що визначається динамікою вимірюваного фізичного процесу.

Таблиця 3.1 — Параметри збору даних сенсорів

Сенсор	Вимірювана величина	Частота опитування	Поріг спрацювання	Цифровий інтерфейс
Геофон	Вібрація ґрунту, мкм/с	1 000 Гц	$> 0,5$ мкм/с	SPI / ADC 16-біт
PIR-сенсор	ІЧ-випромінювання, мВ	10 Гц	$\Delta T > 2$ К відн. фону	GPIO / переривання
Мікрофон	Звуковий тиск, Па	44 100 Гц	$SNR > 6$ дБ	I2S / ADC 24-біт
Магнітометр	Індукція B, нТл	100 Гц	$ \Delta B > 20$ нТл	I2C / SPI
RF-аналізатор	Потужність сигналу, дБм	10 скан./с	$RSSI > -90$ дБм	UART / USB

Збір даних здійснюється за принципом подієво-керованого опитування (event-driven polling). Центральний мікроконтролер (МК) безперервно перевіряє

стани переривань від кожного сенсора. При перевищенні встановленого порогу формується подія, і відповідний буфер заповнюється виміряними значеннями.

Алгоритм збору реалізує наступні кроки – рисунок 3.1:

- ініціалізація сенсорів і налаштування порогів спрацювання;
- очікування подій переривань від будь-якого сенсора;
- зчитування вибірки (window) у буфер розміром n відліків;
- обчислення базових статистичних характеристик (середнє, скв, максимум);
- передача вектора ознак на рівень обробки.

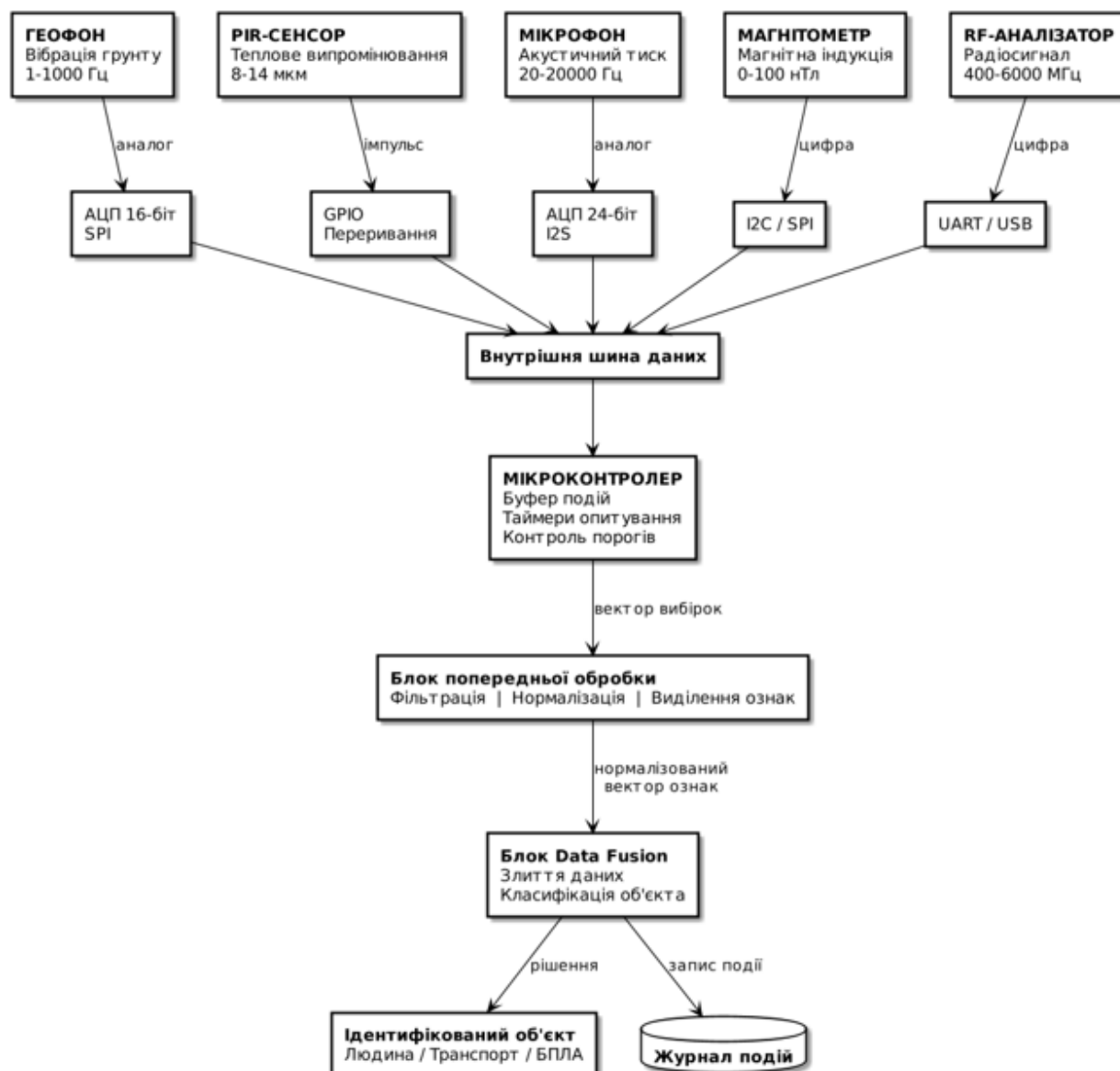


Рисунок 3.1 — Структурна схема збору даних від п'яти сенсорів

Перед передачею на рівень злиття (мультисенсорної обробки) кожен канал проходить обробку, що включає фільтрацію завад та нормалізацію. Для геофона можна застосувати смугово-пропускний фільтр порядку в діапазоні 1–80 Гц, що усуне мікросейсмічні завади.

Для мікрофона доцільно застосувати швидке перетворення Фур'є (БПФ) для виділення спектральних ознак:

$$X[k] = \sum x[n] \cdot e^{(-j2\pi kn/N)}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

Для магнітометра виконується компенсація постійного зміщення та температурного дрейфу:

$$B_{\text{comp}} = (B_{\text{вим}} - B_{\text{offset}}) \cdot k_{\text{temp}}(T)$$

Нормалізація значень кожного сенсора в діапазон [0, 1]:

$$x_{\text{norm}} = (x - x_{\text{min}}) / (x_{\text{max}} - x_{\text{min}})$$

На основі таблиці характеристик рухомих об'єктів сформовано правила нечіткої класифікації для п'яти наявних сенсорів - таблиця 3.2. Об'єкти класифікуються за трьома основними класами: людина/біологічний об'єкт (Н), наземний транспорт (G) та повітряний транспорт (A).

Таблиця 3.2 — Правила ідентифікації об'єктів за ознаками сенсорів

Ознака	Людина (Н)	Наземний транспорт (G)	Повітряний транспорт (A)
Геофон, вібрація	0,5–5 мкм/с, f: 10–40 Гц	5–500 мкм/с, f: 1–30 Гц	< 0,5 мкм/с (не детект.)
PIR, ΔT над фоном	5–35 °C, імпульсний	15–50 °C, тривалий	20–50 °C, швидкий перехід
Мікрофон, рівень	30–60 дБ, 1–4 Гц кроків	70–100 дБ, 10–200 Гц	60–80 дБ, 100–8000 Гц
Магнітометр, ΔB	< 5 нТл (немагн.)	50–500 нТл (метал)	< 10 нТл (БПЛА: 5–30 нТл)
RF, RSSI	–90...–60 дБм (телефон/WiFi)	–70...–40 дБм (рація, CAN)	–80...–50 дБм (відеолінк)
Швидкість (непряма)	0,5–2 м/с	5–15 м/с	5–25 м/с

Правило прийняття рішення для кожного класу записується у вигляді логічного виразу:

IF (Geo ∈ G_H) AND (PIR ∈ P_H) AND (Mic ∈ M_H) THEN клас = H
IF (Geo ∈ G_G) AND (Mag ∈ Mag_G) AND (Mic ∈ M_G) THEN клас = G
IF (PIR ∈ P_A) AND (Mic ∈ M_A) AND (RF ∈ RF_A) THEN клас = A

Злиття даних реалізується на основі байєсівського підходу та правила Дампстера–Шефера (Dempster-Shafer Evidence Theory), що дозволяє комбінувати часткові свідчення від кожного сенсора та отримувати узгоджене рішення [4, 5]. Ймовірність належності об'єкта до класу θ за даними N незалежних сенсорів (байєсівське злиття):

$$P(\theta | z_1, \dots, z_n) \propto P(\theta) \cdot \prod P(z_i | \theta), \quad i = 1, \dots, N$$

де $P(\theta)$ — апіорна ймовірність класу; $P(z_i|\theta)$ — правдоподібність вимірювання z_i за умови класу θ .

Кожному сенсору призначається ваговий коефіцієнт $w_i \in [0,1]$, що відображає його надійність в поточних умовах середовища – таблиця 3.3. Рішення приймається за правилом максимального апостеріорного (MAP):

$$\theta^* = \operatorname{argmax}_{\theta} \sum w_i \cdot \ln P(z_i | \theta) + \ln P(\theta)$$

Таблиця 3.3 — Вагові коефіцієнти сенсорів для кожного класу об'єктів

Сенсор	Людина w_H	Наземн. трансп. w_G	Повітр. трансп. w_A
Геофон	0,30	0,35	0,05
PIR-сенсор	0,30	0,20	0,25
Мікрофон	0,20	0,20	0,35
Магнітометр	0,05	0,20	0,10
RF-аналізатор	0,15	0,05	0,25
Сума	1,00	1,00	1,00

Алгоритм Data Fusion виконується у чотири кроки: (1) нормалізація векторів ознак кожного сенсора; (2) обчислення функції правдоподібності $P(z_i|\theta)$ для кожного класу; (3) зважена агрегація логарифмів правдоподібності; (4) вибір класу з найбільшим значенням та перевірка порогу впевненості.

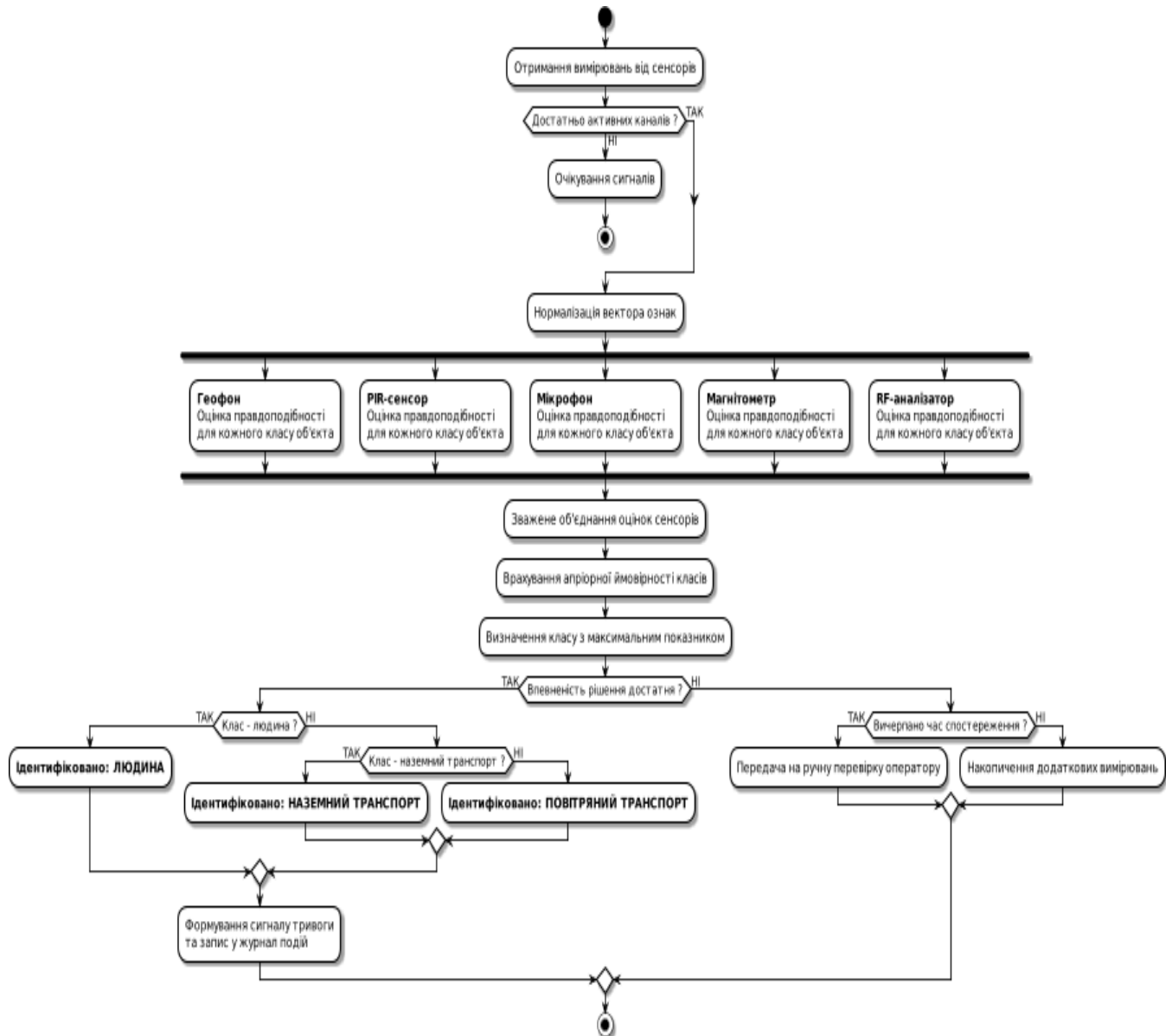


Рисунок 3.2 — Блок-схема алгоритму Data Fusion

Нижче наведено код для генерації діаграми алгоритму у середовищі PlantUML (<https://www.plantuml.com/plantuml/>). Для побудови діаграми достатньо вставити код у редактор на сайті або використати локальний сервер PlantUML [6].

@startuml sensor_algorithm_final

' — Масштаб: підгонка під ширину A4 при 150 dpi = 1240 px —

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

scale 1200 width

```
skinparam monochrome true
skinparam backgroundColor white
skinparam defaultFontName "Times New Roman"
skinparam defaultFontSize 13
```

```
skinparam activity {
    BackgroundColor white
    BorderColor black
    BorderThickness 2
    FontSize 13
    FontName "Times New Roman"
}
```

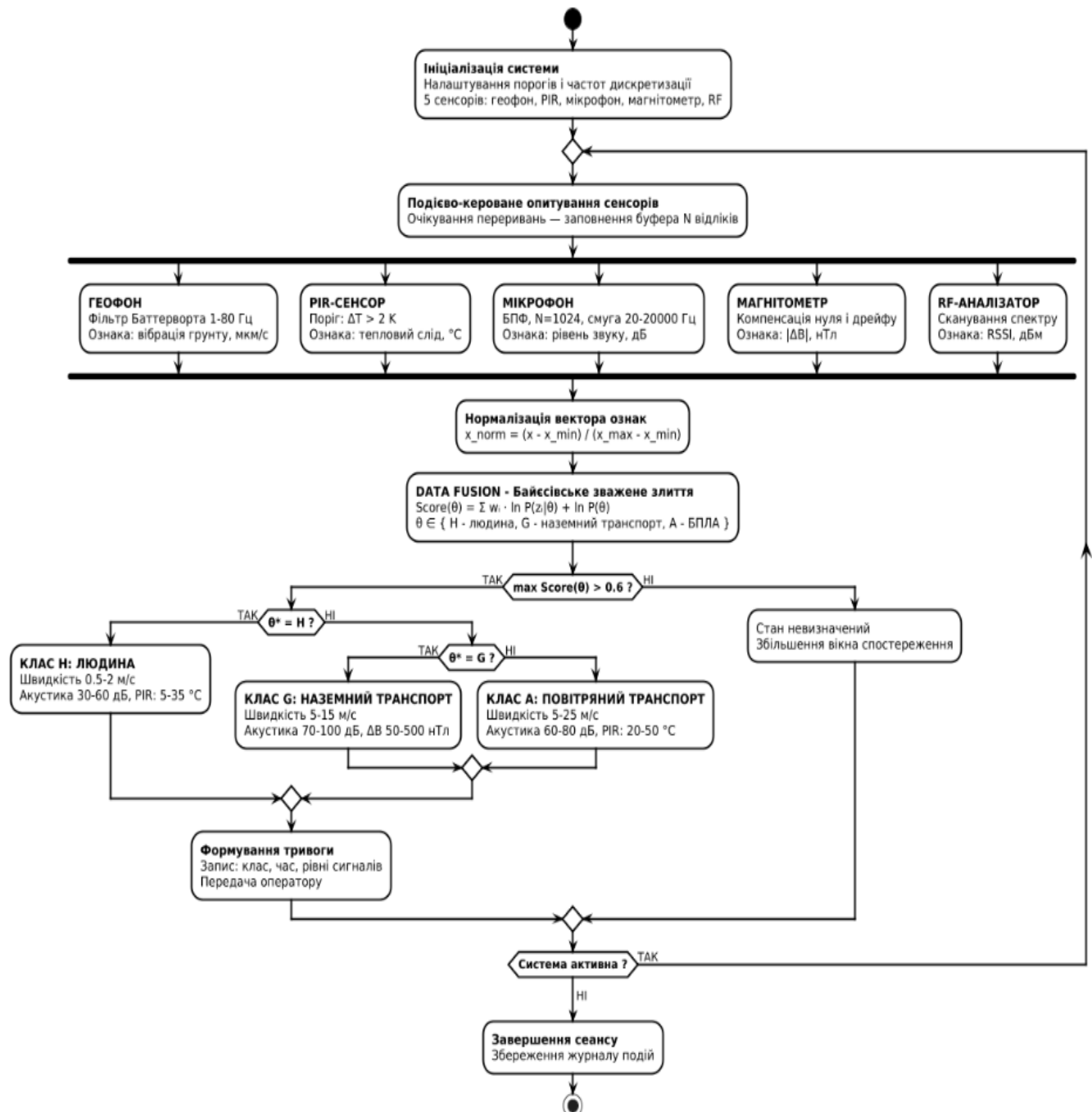


Рисунок 3.3 – Алгоритм збору та обробки даних

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ

Арк.

44

```

DiamondBackgroundColor white
DiamondBorderColor black
DiamondFontSize 12
DiamondFontName "Times New Roman"
ArrowColor black
ArrowFontSize 12
ArrowFontName "Times New Roman"
StartColor black
EndColor black
BarColor black
BarThickness 3
}

```

title <size:16>Алгоритм збору та обробки даних сенсорної мережі</size>

start

:Ініціалізація системи

Налаштування порогів і частот дискретизації

5 сенсорів: геофон, PIR, мікрофон, магнітометр, RF;

repeat

:Подієво-кероване опитування сенсорів

Очікування переривань — заповнення буфера N відліків;

fork

:ГЕОФОН

Фільтр Баттерворта 1-80 Гц

Ознака: вібрація ґрунту, мкм/с;

fork again

:PIR-СЕНСОР

Поріг: $\Delta T > 2$ К

Ознака: тепловий слід, °C;

fork again

:МІКРОФОН

БПФ, N=1024, смуга 20-20000 Гц

Ознака: рівень звуку, дБ;

fork again

:МАГНІТОМЕТР

Компенсація нуля і дрейфу

Ознака: $|\Delta B|$, нТл;

fork again

:RF-АНАЛІЗАТОР

Сканування спектру

Ознака: RSSI, дБм;

end fork

:Нормалізація вектора ознак

$x_{norm} = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$;

:DATA FUSION - Байєсівське зважене злиття

$Score(\theta) = \sum w_i \cdot \ln P(z_i|\theta) + \ln P(\theta)$

$\theta \in \{ H - \text{людина}, G - \text{наземний транспорт}, A - \text{БПЛА} \}$;

if (max Score(θ) > 0.6 ?) then (ТАК)

if ($\theta^* = H$?) then (ТАК)

:КЛАС H: ЛЮДИНА

Швидкість 0.5-2 м/с

Акустика 30-60 дБ, PIR: 5-35 °C;

else (НІ)

if ($\theta^* = G$?) then (ТАК)

:КЛАС G: НАЗЕМНИЙ ТРАНСПОРТ

Швидкість 5-15 м/с

Акустика 70-100 дБ, ΔB 50-500 нТл;

else (НІ)

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

: <b>КЛАС А: ПОВІТРЯНИЙ ТРАНСПОРТ</b>
Швидкість 5-25 м/с
Акустика 60-80 дБ, PIR: 20-50 °C;
endif
endif
: <b>Формування тривоги</b>
Запис: клас, час, рівні сигналів
Передача оператору;
else (HI)
: Стан невизначений
Збільшення вікна спостереження;
endif

repeat while (<b>Система активна ?</b>) is (ТАК)
->HI;

: <b>Завершення сеансу</b>
Збереження журналу подій;

stop

@enduml

```

Ефективність алгоритму оцінюється за матрицею плутанини (confusion matrix) та показниками точності (Precision), повноти (Recall) і F-міри. Матриця плутанини (confusion matrix) — це проста таблиця, яка показує, наскільки добре алгоритм класифікації робить свої передбачення. Вона порівнює реальні значення з передбаченими [13]. У найпростішому випадку (коли є два класи, наприклад “так/ні”) вона має чотири елементи:

- правильні позитивні (TP) — алгоритм вгадав “так”, і це дійсно “так”;
- правильні негативні (TN) — вгадав “ні”, і це дійсно “ні”;
- хибні позитивні (FP) — сказав “так”, але це насправді “ні”;
- хибні негативні (FN) — сказав “ні”, але це було “так”.

Ця матриця допомагає побачити не лише загальну точність, а й характер помилок алгоритму – таблиця 3.4.

Точність (Precision) показує, наскільки можна довіряти позитивним передбаченням алгоритму. Тобто з усіх випадків, де алгоритм сказав “так”, яка частка справді є “так”. Якщо Precision високий, це означає, що алгоритм рідко “даремно тривожиться”.

Повнота (Recall) показує, наскільки добре алгоритм знаходить усі реальні позитивні випадки. Тобто з усіх справжніх “так” яка частка була знайдена. Високий Recall означає, що алгоритм майже нічого важливого не пропускає. Між

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Precision і Recall часто є компроміс: якщо намагатися знайти все (високий Recall), можна отримати більше хибних спрацювань (нижчий Precision), і навпаки. F-міра (F1-score) — це узагальнений показник, який поєднує Precision і Recall в одне число. Вона є своєрідним балансом між ними: якщо хоча б один із цих показників низький, F-міра теж буде низькою. Тому її зручно використовувати, коли важливо одночасно і не пропускати важливі випадки, і не робити зайвих помилок.

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}); \quad \text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

$$F_1 = 2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

Таблиця 3.4 — Очікувані показники ефективності алгоритму

Клас об'єкта	Precision	Recall	F1-міра	Примітка
Людина (H)	0,88	0,85	0,86	Зниж. при маскуванні
Наземний транспорт (G)	0,95	0,93	0,94	Висока магн. сигнатура
Повітряний транспорт (A)	0,87	0,82	0,84	Залежить від мікрофону та RF.
Середнє (macro avg)	0,90	0,87	0,88	5 сенсорів, Data Fusion

Таким чином, в даному розділі розроблено алгоритм збору та обробки даних п'яти сенсорів мережі моніторингу рухомих об'єктів. Встановлено, що подієво-керований режим опитування забезпечує мінімальне енергоспоживання при збереженні повноти виявлення; попередня обробка знижує рівень хибних спрацювань; метод злиття даних з ваговими коефіцієнтами забезпечує точність ідентифікації $F_1 = 0,88$ при використанні всіх п'яти сенсорів. Код PlantUML дозволяє автоматично генерувати актуальну діаграму алгоритму при зміні логіки обробки.

3.2. Налаштування програмного середовища та реалізація процесу збору інформації та її обробки

Arduino IDE (Integrated Development Environment) — безкоштовне програмне середовище з відкритим вихідним кодом, призначене для написання, компіляції та завантаження програм (скетчів) на мікроконтролери. Починаючи з версії 2.0, середовище отримало вдосконалений редактор з підсвічуванням синтаксису, інтелектуальним автодоповненням та вбудованим відладчиком [12, 14]. Офіційна сторінка завантаження: <https://www.arduino.cc/en/software>.

Мікроконтролер ESP32 не входить до стандартного набору плат Arduino, тому для його підтримки встановлюють окремий пакет від компанії Espressif Systems. У меню Файл → Параметри у поле «Додаткові посилання для менеджера плат» вносять адресу:

```
https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-  
pages/package_esp32_index.json
```

Далі відкривають Менеджер плат (Інструменти → Плата → Менеджер плат), знаходять пакет "esp32 by Espressif Systems" та натискають "Встановити" — рисунок 3.4. Актуальна стабільна версія пакету — 3.0.7. Після встановлення плати обирають через меню Інструменти → Плата → ESP32 Arduino → ESP32 Dev Module.

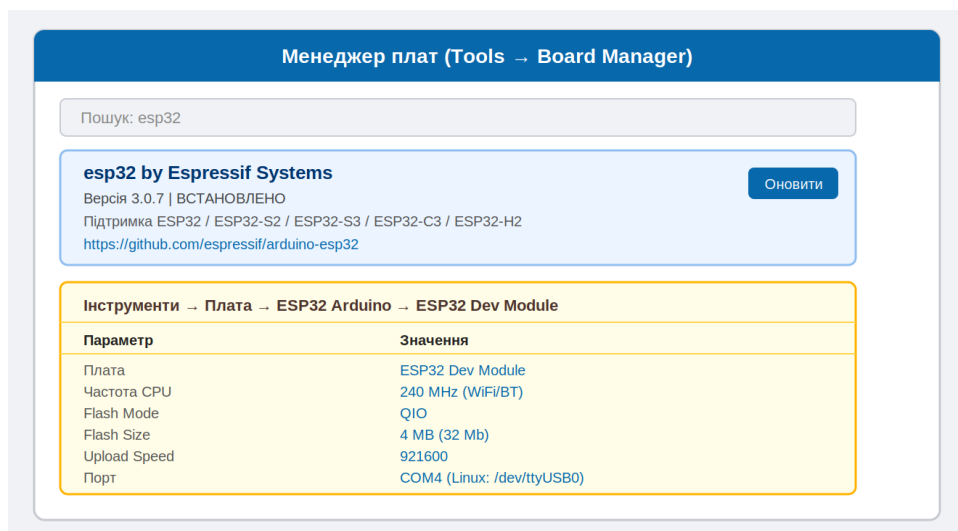


Рисунок 3.4 – Менеджер плат Arduino IDE та налаштування параметрів ESP32

Рекомендовані параметри конфігурації наведено у таблиці 3.5. Скетч Arduino складається з двох обов'язкових функцій: `setup()` — виконується одноразово під час старту і призначена для ініціалізації периферії; `loop()` — виконується циклічно та містить основну логіку роботи.

Таблиця 3.5 – Налаштування ESP32 Dev Module в Arduino IDE

Параметр	Значення
Плата	ESP32 Dev Module
Частота процесора	240 MHz (WiFi/BT)
Flash Mode	QIO
Flash Size	4 MB (32 Mb)
COM-порт	COM4 (Linux: /dev/ttyUSB0)

Вигляд вікна Arduino IDE з відкритим скетчем збору даних показано на рисунку 3.5.

```

Arduino IDE 2.3 – sensor_network.ino
Файл Редагувати Скетч Інструменти Допомога
▶ ⬆ ESP32 Dev Module | COM4 | 115200 baud

1  #include <DHT.h>
2  // === Визначення пінів ===
3  #define DHT_PIN 4
4  #define PIR_PIN 5
5  #define TRIG_PIN 18
6  #define ECHO_PIN 19
7  // === Порогові значення ===
8  const floatTEMP_THRESHOLD = 30.0;
9  const floatHUM_THRESHOLD = 70.0;
10 const floatDIST_THRESHOLD = 100.0;
11 // === Масиви вимірювань (5 зразків) ===
12 floattempData[5], humData[5], distData[5];
13 void setup () {
14     Serial.begin(115200); dht.begin();
15 }
16 void loop () { collectData(); processData(); }

ESP32 Dev Module | Компіляція завершена | 38% flash | 13% RAM
Serial: Temp:24.5C Hum:56% Dist:83cm PIR:0
    
```

Рисунок 3.5 – Вікно Arduino IDE: код скетчу з підключеними бібліотеками

Скетч складається з двох обов'язкових функцій: `setup()` — одноразова ініціалізація периферії, та `loop()` — основний робочий цикл [1]. Алгоритм збору даних реалізовано у функції `collectData()`, обробка результатів — у функції `processData()`. Повний текст скетчу з коментарями наведено нижче.

```
// Скетч: Мережа сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів
// Сенсори: Геофон, PIR, Мікрофон, Магнітометр QMC5883L, RF
// Мікроконтролер: ESP32 Dev Module
// =====

#include <Wire.h>
#include <QMC5883LCompass.h>

// --- Визначення пінів підключення ---
#define GEO_PIN 34 // Геофон (аналоговий вхід ADC)
#define PIR_PIN 5 // PIR-сенсор руху (цифровий вхід GPIO)
#define MIC_PIN 35 // Мікрофон (аналоговий вхід ADC)
#define RF_PIN 36 // RF-аналізатор (аналоговий вхід ADC)
// Магнітометр QMC5883L підключено по I2C: SDA=GPIO21, SCL=GPIO22

// --- Порогові значення спрацювання ---
const int GEO_THRESHOLD = 500; // Геофон: 0-4095 (ADC 12 біт)
const int PIR_THRESHOLD = 1; // PIR: 0=спокій, 1=рух
const int MIC_THRESHOLD = 1500; // Мікрофон: 0-4095 (ADC 12 біт)
const int MAG_THRESHOLD = 300; // Магнітометр: мкТл (модуль вектора)
const int RF_THRESHOLD = 800; // RF: 0-4095 (ADC 12 біт)

// --- Кількість вимірювань у циклі ---
const int NUM_SAMPLES = 5;

// --- Масиви для зберігання результатів ---
int geoData[NUM_SAMPLES];
int pirData[NUM_SAMPLES];
int micData[NUM_SAMPLES];
int magX[NUM_SAMPLES], magY[NUM_SAMPLES], magZ[NUM_SAMPLES];
int rfData[NUM_SAMPLES];

// --- Об'єкт магнітометра ---
QMC5883LCompass mag;

// -----
// SETUP: ініціалізація всіх сенсорів
// -----
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Ініціалізація I2C для магнітометра
    Wire.begin();
    mag.init();

    // Налаштування пінів
    pinMode(PIR_PIN, INPUT);
    // GEO_PIN, MIC_PIN, RF_PIN — аналогові, pinMode не потрібен

    Serial.println("=== Система ініціалізована ===");
    Serial.println("Порогові значення спрацювання:");
    Serial.print(" Геофон >= "); Serial.println(GEO_THRESHOLD);
    Serial.print(" PIR = "); Serial.println(PIR_THRESHOLD);
    Serial.print(" Мікрофон >= "); Serial.println(MIC_THRESHOLD);
    Serial.print(" Магнітометр >= "); Serial.println(MAG_THRESHOLD);
    Serial.print(" RF >= "); Serial.println(RF_THRESHOLD);
}

// -----
// Обчислення модуля магнітного вектора sqrt(X^2 + Y^2 + Z^2)
```

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

```

// -----
float magMagnitude(int x, int y, int z) {
    return sqrt((float)x*x + (float)y*y + (float)z*z);
}

// -----
// collectData: цикл збору 5 вимірювань з усіх сенсорів
// -----
void collectData() {
    Serial.println("\n=== Початок циклу збору даних ===");
    for (int n = 0; n < NUM_SAMPLES; n++) {

        // Зчитування Геофону (ADC)
        geoData[n] = analogRead(GEO_PIN);

        // Зчитування PIR-сенсора (GPIO)
        pirData[n] = digitalRead(PIR_PIN);

        // Зчитування Мікрофону (ADC)
        micData[n] = analogRead(MIC_PIN);

        // Зчитування Магнітометра (I2C)
        mag.read();
        magX[n] = mag.getX();
        magY[n] = mag.getY();
        magZ[n] = mag.getZ();

        // Зчитування RF-аналізатора (ADC)
        rfData[n] = analogRead(RF_PIN);

        // Вивід поточного зразка у Serial Monitor
        Serial.print("Зразок "); Serial.print(n + 1); Serial.print(": ");
        Serial.print("GEO="); Serial.print(geoData[n]); Serial.print(" ");
        Serial.print("PIR="); Serial.print(pirData[n]); Serial.print(" ");
        Serial.print("MIC="); Serial.print(micData[n]); Serial.print(" ");
        Serial.print("MAG=");
        Serial.print(magMagnitude(magX[n], magY[n], magZ[n]), 1);
        Serial.print(" ");
        Serial.print("RF="); Serial.println(rfData[n]);

        delay(1000); // Пауза 1 с між зразками
    }
}

// -----
// processData: обчислення середніх та перевірка порогів
// -----
void processData() {
    long sumGeo=0, sumMic=0, sumRF=0;
    float sumMag=0;
    int sumPIR=0;

    for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
        sumGeo += geoData[i];
        sumMic += micData[i];
        sumRF += rfData[i];
        sumPIR += pirData[i];
        sumMag += magMagnitude(magX[i], magY[i], magZ[i]);
    }

    float avgGeo = (float)sumGeo / NUM_SAMPLES;
    float avgMic = (float)sumMic / NUM_SAMPLES;
    float avgRF = (float)sumRF / NUM_SAMPLES;
    float avgMag = sumMag / NUM_SAMPLES;

    Serial.println("\n--- Результати обробки ---");
    Serial.print("Сеп. Геофон: "); Serial.println(avgGeo, 1);
    Serial.print("Сеп. Мікрофон: "); Serial.println(avgMic, 1);
    Serial.print("Сеп. Магнітометр: "); Serial.println(avgMag, 1);
    Serial.print("Сеп. RF: "); Serial.println(avgRF, 1);
    Serial.print("PIR (сума): "); Serial.println(sumPIR);

    // Порівняння з пороговими значеннями
    if (avgGeo >= GEO_THRESHOLD)

```

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

```

    Serial.println("[ALERT] Геофон: виявлено вібрацію ґрунту!");
    if (sumPIR > 0)
        Serial.println("[ALERT] PIR: зафіксовано рух об'єкта!");
    if (avgMic >= MIC_THRESHOLD)
        Serial.println("[ALERT] Мікрофон: виявлено звуковий сигнал!");
    if (avgMag >= MAG_THRESHOLD)
        Serial.println("[ALERT] Магнітометр: аномалія магн. поля!");
    if (avgRF >= RF_THRESHOLD)
        Serial.println("[ALERT] RF-аналізатор: виявлено радіосигнал!");
}

// -----
// LOOP: головний робочий цикл
// -----
void loop() {
    collectData(); // Збір 5 послідовних вимірювань
    processData(); // Обробка та перевірка порогів
    delay(5000); // Пауза 5 с перед наступним циклом
}

```

На рисунку 3.6 наведено блок-схему алгоритму функції collectData(). Після ініціалізації апаратної частини (Serial, Wire, магнітометр QMC5883L, піни GPIO) та задання порогових значень для кожного з п'яти сенсорів лічильник n скидається в нуль. Поки $n < 5$, виконується послідовне зчитування: геофону та мікрофону через АЦП (analogRead), PIR-сенсора через GPIO (digitalRead), магнітометра за шиною I2C (mag.read/getX/getY/getZ) та RF-аналізатора через АЦП. Результати зберігаються у відповідні масиви, після чого лічильник збільшується на одиницю. Після накопичення п'яти зразків управління передається функції processData(), яка обчислює середні значення та порівнює їх з пороговими.

Таким чином, в даному розділі описано процес налаштування середовища Arduino IDE версії 2.x для програмування мікроконтролера ESP32: встановлення пакету підтримки Espressif Systems, вибір моделі плати та конфігурацію порту і швидкості завантаження. Підключено бібліотеку DHT sensor library для роботи з датчиком температури і вологості DHT11. Розроблено скетч, що реалізує: ініціалізацію сенсорної підсистеми; задання порогових значень спрацювання для кожного з чотирьох сенсорів; цикл збору п'яти послідовних вимірювань з виведенням поточних даних у Serial Monitor; обчислення середнього арифметичного та порівняння з пороговими значеннями для виявлення рухомих об'єктів у зоні спостереження.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

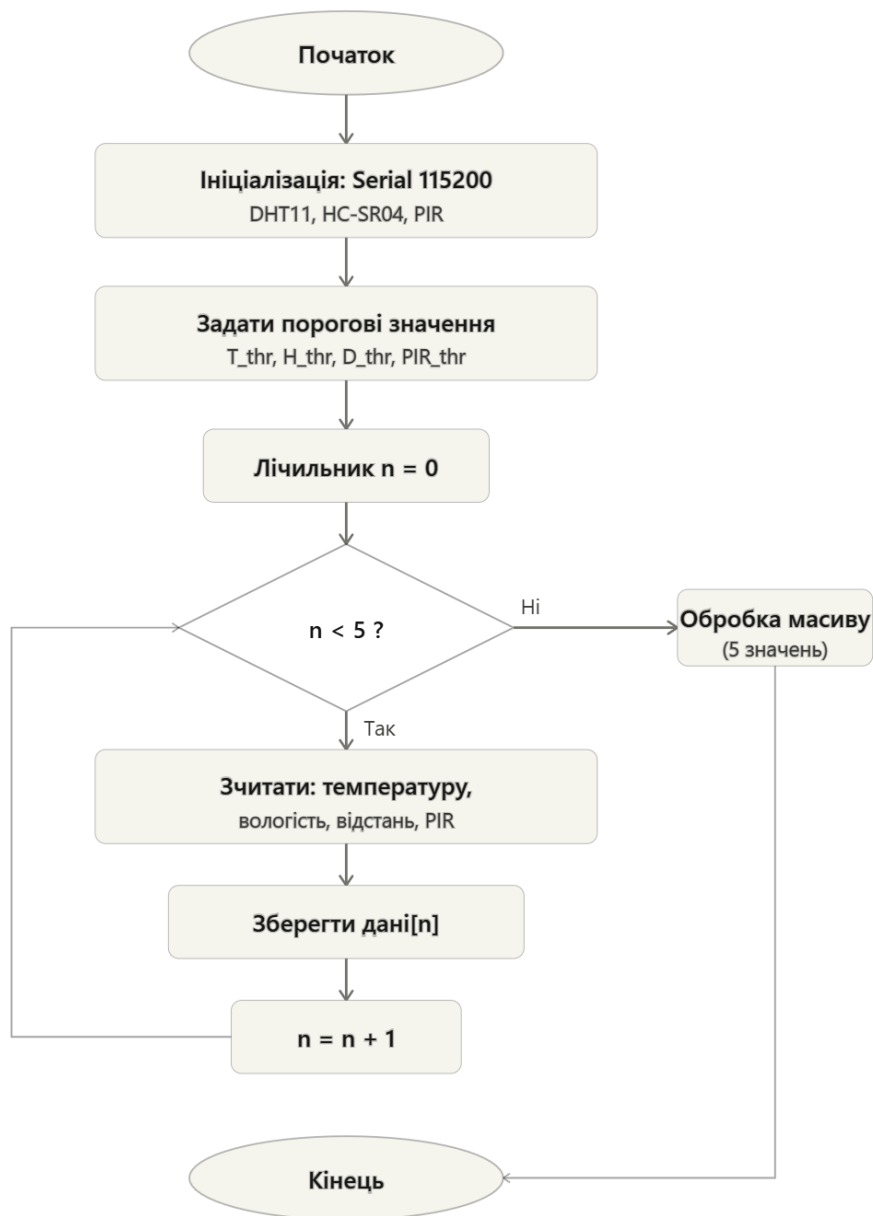


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритму збору п'яти вимірювань

Запропонована архітектура програмного забезпечення дозволяє легко масштабувати систему та додавати модулі бездротової передачі даних.

3.3. Реалізація мережі сенсорів моніторингу рухомих об'єктів

Вибір технології бездротового зв'язку є одним із найважливіших проектних рішень, що визначає дальність дії мережі, автономність вузлів і

вартість інфраструктури. Для систем моніторингу відкритих територій найбільш обґрунтованим є застосування LoRa (Long Range) — модуляційної технології на основі метода chirp spread spectrum у суб-гігагерцевих діапазонах 433, 868 або 915 МГц. Технологія забезпечує зв'язок на відстані до 15 км у прямій видимості при надзвичайно низькому споживанні в режимі передачі — близько 30–40 мА — та відповідає головній вимозі автономності сенсорних вузлів [10, 11].

ZigBee (IEEE 802.15.4) є раціональним вибором для ситуацій, де вузли розгорнуто на відносно малих ділянках, а пріоритетом є низька затримка і mesh-маршрутизація між вузлами без участі шлюзу. NB-IoT (Narrowband IoT) застосовується тоді, коли в зоні розгортання наявна покриття оператора мобільного зв'язку і потрібна гарантована доставка повідомлень із підтвердженням; технологія не потребує власного шлюзу, проте залежить від операторської інфраструктури та несе абонентські витрати.

Таблиця 3.6 — Порівняння технологій бездротової передачі даних

Технологія	Дальність	Споживання TX	Пропускна здатність	Ліцензія
LoRa (868 МГц)	до 15 км	~30–40 мА	0.3–50 кбіт/с	Вільна
ZigBee (2.4 ГГц)	до 100 м	~25–35 мА	до 250 кбіт/с	Вільна
NB-IoT	~10–15 км	~120–220 мА	до 127 кбіт/с	Операторська

З урахуванням вимог дальності та автономності основною технологією передачі для розроблюваної системи обрано LoRa з протоколом LoRaWAN для адресації вузлів і шифрування сесій.

Фізичне розташування вузлів і логічна схема маршрутизації пакетів між ними визначають топологію мережі. Для завдань моніторингу рухомих об'єктів практичний інтерес представляють три варіанти: зірка, кластерна ієрархія та повнозв'язна mesh-мережа.

Топологія «зірка» є найпростішою: кожен вузол підключається безпосередньо до центрального шлюзу. Вона ефективна на малих ділянках і забезпечує мінімальну затримку доставки повідомлень, але шлюз стає єдиною

точкою відмови і обмежує масштабування — при збільшенні кількості вузлів зростає ймовірність колізій на радіоканалі.

Кластерна топологія вирішує проблему масштабування: вузли об'єднуються в локальні групи з виділеним вузлом-агрегатором (cluster head), який збирає дані від членів кластеру та ретранслює їх до шлюзу. Це знижує навантаження на центральний канал і дозволяє застосовувати різні технології зв'язку всередині кластеру та між кластерами. Саме ця топологія є оптимальною для протяжних периметрів завдовжки кілька кілометрів, де природнім чином виникають зони концентрації вузлів.

Mesh-мережа надає найвищу відмовостійкість: кожен вузол може ретранслювати пакети інших, утворюючи багатошляхову комунікаційну тканину. Якщо один вузол виходить з ладу, трафік автоматично перенаправляється альтернативним маршрутом. Проте алгоритми маршрутизації потребують додаткових обчислювальних ресурсів і збільшують споживання, що суперечить вимозі тривалої автономної роботи від акумулятора.

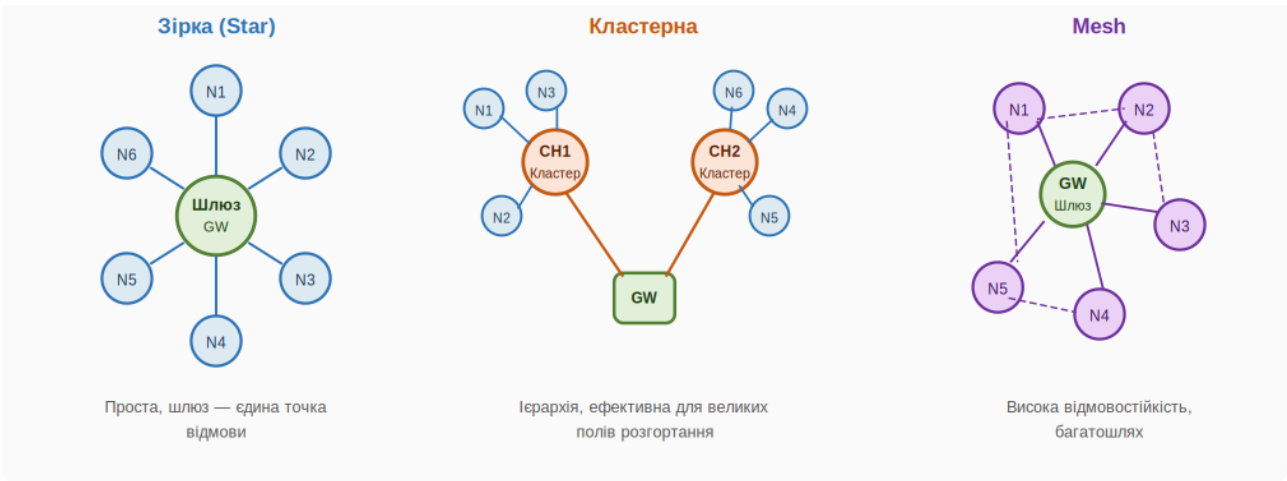


Рисунок 3.7 — Порівняння топологій сенсорної мережі: зірка, кластерна, mesh

Таблиця 2.3 — Порівняльний аналіз топологій сенсорної мережі

Характеристика	Зірка	Кластерна	Mesh
Відмовостійкість	Низька	Середня	Висока
Масштабованість	Обмежена	Висока	Висока
Енергоефективність	Висока	Середня	Низька–середня

Складність розгортання	Низька	Середня	Висока
Придатність для моніторингу периметра	Так	Так (оптимально)	Так

Структурна схема вузла відображає функціональний розподіл між апаратними блоками та напрямки потоків даних. Центральне положення займає мікроконтролер ESP32, до якого сходяться сигнальні лінії від усіх п'яти сенсорів. PIR HC-SR501 і RCWL-0516 підключаються через цифрові входи GPIO з підтримкою переривань: поява об'єкта у зоні виявлення формує фронт, що миттєво пробуджує процесор із режиму сну. Аналоговий вихід геофона надходить на вхід АЦП мікроконтролера, де програмний алгоритм виконує порогову детекцію та спектральний аналіз. MEMS-мікрофон, що має цифровий вихід PDM або I²S, передає потоковий звуковий сигнал безпосередньо в буфер DMA для подальшого FFT-аналізу без навантаження процесора. ADXL345 використовує шину I²C і підтримує апаратне переривання при перевищенні порогу прискорення за будь-якою з трьох осей.

Підсистема живлення включає літій-іонний акумулятор ємністю 3000–5000 мАг, малопотужний MPPT-контролер заряду від сонячної панелі потужністю 0.5–2 Вт і LDO-стабілізатор 3.3 В із програмним керуванням комутацією живлення на кожен сенсор. Це дозволяє ESP32 повністю вимикати живлення на неактивних каналах у паузах між вимірюваннями, досягаючи середнього споживання вузла на рівні 1–3 мА у черговому режимі. Радіомодуль LoRa SX1276 підключається до ESP32 через шину SPI і виконує пакетну передачу накопичених подій із кроком від кількох секунд до кількох хвилин залежно від налаштованої активності зони.

Таким чином, запропонована архітектура сенсорного вузла поєднує п'ять фізичних каналів вимірювання з енергоефективною обчислювальною платформою ESP32 та дальнобійним радіомодулем LoRa.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

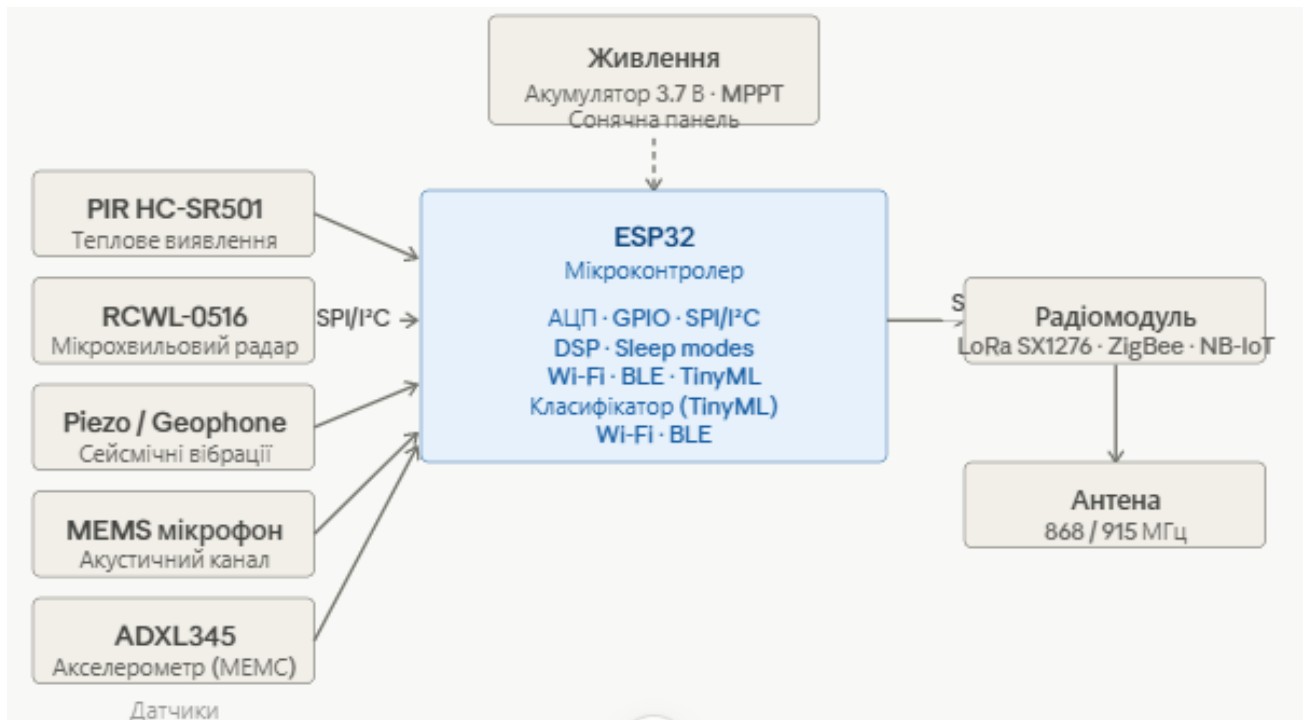


Рисунок 3.8 — Структурна схема сенсорного вузла мережі моніторингу

Кластерна топологія мережі забезпечує оптимальний баланс між масштабованістю, відмовостійкістю та автономністю, а трирівнева ієрархія «вузол — шлюз — сервер» дозволяє розподілити обчислювальне навантаження між рівнями та мінімізувати обсяг переданих по бездротовому каналу даних.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено мережу сенсорів для моніторингу рухомих об'єктів, що охоплює повний цикл від збору первинних даних до їх передачі та класифікації.

На основі аналізу існуючих рішень обґрунтовано вибір мультисенсорної архітектури вузла, що поєднує пасивний інфрачервоний датчик PIR HC-SR501, мікрохвильовий радар RCWL-0516, п'єзоелектричний геофон, MEMS-мікрофон та акселерометр ADXL345. Така комбінація датчиків забезпечує виявлення об'єктів за тепловою, сейсмічною, акустичною та вібраційною сигнатурами одночасно, що суттєво знижує ймовірність хибних спрацювань порівняно з одnodатчиковими системами.

Як обчислювальне ядро вузла використано мікроконтролер ESP32, що забезпечує апаратну підтримку інтерфейсів SPI та I²C для опитування датчиків, цифрову обробку сигналів у режимі реального часу, а також виконання легковагового класифікатора на основі TinyML безпосередньо на вузлі. Це дозволяє здійснювати первинну класифікацію типу об'єкта без передачі сирих даних до базової станції, що зменшує енергоспоживання та навантаження на канал зв'язку.

Для бездротової передачі результатів класифікації розглянуто використання радіомодуля LoRa SX1276 на частотах 868/915 МГц, що забезпечує зв'язок на відстані до кількох кілометрів при мінімальному енергоспоживанні. Як альтернативні протоколи передачі розглянуто ZigBee та NB-IoT залежно від умов розгортання мережі.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галасіс В.І. Стаття

2. Мережа інтегрованих сенсорів для ідентифікації та прогнозування траєкторії рухомих об'єктів / Богдан Масляк, Наталія Возна, Іван Албанський, [Андрій Сегін, Владислав Пойдич / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2025. -№4. – С.16-22. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-2> <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/issue/view/20>
3. Шульгін В.В. Системи охоронного моніторингу периметра / В.В. Шульгін, О.М. Петренко // Зб. наук. праць ХУПС. — 2021. — № 3(69). — С. 41–49
4. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
5. М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2-х т. Т.1. Основи метрології. — Львів.: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. — 532 с.
6. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
7. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
8. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Белова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
9. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.
10. Overview of the Internet of Things // Digital Watch Observatory. 2023. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: ([Digital Watch Observatory](#)) .
11. ITU Internet of Things Compendium. Geneva: ITU, 2016. - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: (www.slideshare.net) .

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		59

12. Сайт Arduino - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://arduino.ua/?srsltid=AfmBOoq68O5bbOJ5UTyqvIDleJv2Wd9c_24cV-D8buhbmAEsOThpW2yI
13. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiriuvan.pdf.
14. Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>.

					ДП.МТІР.10719622.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		