

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОЇ МЕРЕЖИ
АВТОНОМНИХ РОБОТІВ У СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ
НА ОСНОВІ ІОТ

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A HYBRID NETWORK
OF AUTONOMOUS ROBOTS IN IOT-BASED SURVEILLANCE
SYSTEMS

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІМ-21
Швець Роман Тарасович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т.ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Швецю Роману Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Оцінка ефективності гібридної мережі автономних роботів у системах спостереження на основі IoT*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Гринюк Сергій Васильович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» червня 2025 року № 290/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 09.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи *Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Аналітичний огляд гібридних IoT-мереж автономних роботів

Апаратна реалізація та середовище розробки симуляцій

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Узагальнена архітектура середовища SDE на базі ROS та Gazebo

Структурна схема апаратного вузла WSN

Схема апаратних підключень мобільного робота

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналітичний огляд гібридних IoT-мереж автономних роботів</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Апаратна реалізація та середовище розробки симуляцій</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Експериментальні дослідження та оцінка ефективності</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст.викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 18.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	До 01.08.2025 р.	
2.	<i>Аналітичний огляд гібридних IoT-мереж автономних роботів</i>	До 20.08.2025 р.	
3.	<i>Апаратна реалізація та середовище розробки симуляцій</i>	До 25.09.2025 р.	
4.	<i>Експериментальні дослідження та оцінка ефективності</i>	До 20.10.2025 р.	
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	До 25.10.2025 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 27.10.2025 р.	
7.	<i>Формування додатків</i>	До 30.10.2025 р.	
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	До 05.11.2025 р.	
9.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	До 11.11.2025 р.	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	До 29.11.2025 р.	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 02.12.2025 р.	
12.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	До 09.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Швець Р.Т.

_____ (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Гринюк С.В.

_____ (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Швець Р. Т. Оцінка ефективності гібридної мережі автономних роботів у системах спостереження на основі IoT. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У першому розділі проведено аналітичний огляд гібридних IoT-мереж автономних роботів. Проаналізовано роль технологій Інтернету речей у контексті автономної робототехніки, зокрема протоколів передачі даних та методів взаємодії. Розглянуто архітектурні особливості та класифікацію гібридних мереж, визначено їх переваги над традиційними системами та сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі розроблено математичні моделі руху агентів та функціонування сенсорів (MRS-SMs). Спроектовано середовище імітаційного моделювання (SDE) на базі ROS та Gazebo. Виконано апаратну реалізацію компонентів системи: енергоефективних вузлів WSN на базі ESP32 з використанням протоколу ESP-NOW та мобільної платформи на базі Raspberry Pi 4 з лідарною навігацією. Обґрунтовано вибір протоколу MQTT для обміну даними на верхньому рівні.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень. Шляхом симуляційного моделювання та натурних випробувань підтверджено, що запропонована гібридна система забезпечує покриття території 94% при середньому часі реакції 8,4 с. Виявлено «розрив реальності» (Sim-to-Real gap) у межах 10%. Розрахунок інтегрального критерію показав перевагу розробленої системи над традиційними підходами на 25-42 %.

Ключові слова: Інтернет речей (IoT), гібридна мережа, WSN, MRSN, ROS, Gazebo, ESP32, SLAM, енергоефективність.

ANNOTATION

Shvets R. Efficiency Assessment of a Hybrid Autonomous Robot Network in IoT-Based Surveillance Systems. Manuscript.

Master's Qualification Work in the Educational Program «Computer Engineering», Specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

Chapter 1 provides an analytical review of hybrid IoT autonomous robot networks. The role of Internet of Things technologies in the context of autonomous robotics is analyzed, specifically data transmission protocols and interaction methods. Architectural features and classification of hybrid networks are examined, their advantages over traditional systems are determined, and research objectives are formulated.

Chapter 2 develops mathematical models of agent motion and sensor operation (MRS-SMs). A simulation environment (SDE) based on ROS and Gazebo is designed. Hardware implementation of system components is executed: energy-efficient WSN nodes based on ESP32 using the ESP-NOW protocol and a mobile platform based on Raspberry Pi 4 with LiDAR navigation. The choice of the MQTT protocol for upper-level data exchange is substantiated.

Chapter 3 presents the results of experimental research. Through simulation modeling and field tests, it is confirmed that the proposed hybrid system ensures 94% territory coverage with an average reaction time of 8.4 s. A "reality gap" (Sim-to-Real gap) within 10% was identified. Calculation of the integral criterion showed the advantage of the developed system over traditional approaches by 25–42%.

Keywords: Internet of Things (IoT), hybrid network, WSN, MRSN, ROS, Gazebo, ESP32, SLAM, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ГІБРИДНИХ ІОТ-МЕРЕЖ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ	10
1.1 Інтернет речей у контексті автономної робототехніки	10
1.2 Гібридні мережі автономних роботів.....	18
РОЗДІЛ 2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СЕРЕДОВИЩЕ РОЗРОБКИ СИМУЛЯЦІЙ	30
2.1 Структура проектування SDE.....	30
2.2 Розробка MRS-SMs	33
2.3 Апаратні компоненти та реалізація WSN	36
2.4 Апаратні компоненти MRSN	39
2.5 Апаратні компоненти базової системи IoT	42
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ	46
3.1 Опис експериментального середовища моделювання.....	46
3.2 Дослідження роботи системи в середовищі симуляції (SDE).....	49
3.3 Експериментальна перевірка апаратної реалізації WSN та MRSN	54
3.4 Порівняльний аналіз та оцінка інтегральної ефективності системи	57
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ.....	69

ВСТУП

Забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, промислових підприємств та логістичних комплексів вимагає впровадження сучасних систем спостереження, здатних функціонувати в умовах динамічного середовища. Традиційні стаціонарні системи відеоспостереження, незважаючи на їх поширеність, мають низку суттєвих недоліків: наявність «сліпих зон», висока вартість масштабування кабельної інфраструктури та низька адаптивність до змін у конфігурації об'єкта. З іншого боку, мобільні робототехнічні платформи (MRSN – Mobile Robot Sensor Networks) забезпечують гнучкість моніторингу, проте їх використання обмежується часом автономної роботи та складністю навігації у великих приміщеннях.

В цьому контексті перспективним напрямком є концепція Інтернету речей (IoT), яка дозволяє об'єднати енергоефективні бездротові сенсорні мережі (WSN) та автономних мобільних роботів у єдину гібридну екосистему. Така інтеграція створює синергетичний ефект: стаціонарні сенсори забезпечують безперервний низькоенергетичний моніторинг, а роботи виконують верифікацію подій та детальне обстеження зон інтересу. Однак, існуючі методи організації таких мереж часто не враховують гетерогенність каналів зв'язку та обмежені обчислювальні ресурси периферійних пристроїв, що призводить до затримок у передачі критичних даних. Тому розробка методів оцінки та підвищення ефективності гібридних мереж автономних роботів є актуальною науково-прикладною задачею.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування систем спостереження шляхом розробки архітектури та методів координації гібридної мережі, що складається зі стаціонарних IoT-сенсорів та автономних мобільних роботів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних задач, а саме:

1) проведення аналітичного огляду сучасних методів побудови робототехнічних систем спостереження та протоколів передачі даних в IoT;

2) розробка математичних моделей руху агентів та функціонування сенсорів (MRS-SMs), що стануть основою для проведення віртуальних експериментів;

3) проектування та реалізація середовища імітаційного моделювання (SDE) на базі ROS та Gazebo для верифікації алгоритмів навігації. Подальша робота полягає у розробці апаратної реалізації компонентів системи, зокрема енергоефективних вузлів WSN на базі ESP32 та мобільної платформи на базі Raspberry Pi 4;

4) проведення експериментальних досліджень ефективності розробленої системи за критеріями покриття території, часу реакції та енергоспоживання з виконанням порівняльного аналізу із традиційними підходами.

Об'єкт дослідження – процес функціонування розподілених систем моніторингу та спостереження на основі технологій Інтернету речей.

Предмет дослідження – методи, моделі та апаратно-програмні засоби організації взаємодії у гібридних мережах, що включають стаціонарні сенсори та мобільні роботизовані платформи.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для формування архітектури мережі; методи математичного моделювання для опису кінематики роботів; теорію графів та алгоритми пошуку шляху (A^* , APF) для задач навігації; методи натурального та імітаційного експерименту для оцінки характеристик бездротових каналів зв'язку (MQTT, ESP-NOW) та енергоефективності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні методу координації гетерогенної групи роботів у задачах спостереження, який, на відміну від існуючих, базується на подійно-орієнтованій взаємодії зі стаціонарною сенсорною мережею через легковагі протоколи IoT, що дозволяє зменшити час реакції на інциденти. Також набула подальшого розвитку методика оцінки ефективності робототехнічних мереж шляхом введення

інтегрального показника, що враховує баланс між покриттям території, затримками передачі даних та енергетичними витратами в рамках підходу «Sim-to-Real».

Практичне значення одержаних результатів. Запропонована архітектура на базі протоколу ESP-NOW дозволяє збільшити час автономної роботи сенсорних вузлів у 3-4 рази порівняно зі стандартними Wi-Fi рішеннями.

Апробація результатів роботи. Результати роботи представлені на 2-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні виклики в наукових дослідженнях», яка проходила з 1 по 3 грудня 2025 року [1].

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ГІБРИДНИХ ІОТ-МЕРЕЖ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ

1.1 Інтернет речей у контексті автономної робототехніки

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) упродовж останнього десятиліття трансформувався з технологічної концепції у фундаментальну парадигму побудови розподілених кіберфізичних систем. У контексті автономної робототехніки IoT забезпечує можливість створення інтелектуальних мереж із великої кількості гетерогенних пристроїв – мобільних роботів, стаціонарних сенсорів, обчислювальних вузлів та хмарних платформ – здатних до взаємодії, координації та самостійного прийняття рішень. Розширення IoT логічно привело до формування концепції Інтернету роботів (IoRT – Internet of Robotic Things), у рамках якої роботизовані системи інтегрують сенсори, актуатори, засоби машинного навчання та мережеві сервіси для виконання складних задач автономного спостереження, навігації та реагування [2].

Концепція IoRT передбачає, що робот виступає не лише фізичним виконавцем, а й активним елементом мережі, здатним збирати, передавати та аналізувати дані, взаємодіяти з іншими роботами і сенсорними вузлами та отримувати обчислювальні ресурси від периферійних і хмарних сервісів. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити адаптивність систем автономного моніторингу, забезпечити їх масштабованість та підвищити якість ухвалення рішень у динамічних середовищах. Наукові дослідження демонструють, що саме IoRT є ключовою технологією для побудови гібридних систем автономного спостереження, у яких взаємодіють роботизовані платформи, сенсорні мережі та хмарні аналітичні сервіси [3].

Традиційно робототехнічні системи містять програмовану складову, призначену для виконання повторюваних, трудомістких операцій, включно з отриманням даних із сенсорів та виконанням дій у фізичному середовищі. Поява штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) дала змогу роботизованим

пристроєм функціонувати на основі навчальних алгоритмів і когнітивного прийняття рішень, а не традиційного жорсткого програмування.

Поєднання різних галузей та наукових дисциплін (рис.1.1) робить можливим створення автономних програмованих систем, що комбінують можливості робототехніки та машинного навчання. Мультидисциплінарний характер IoRT забезпечує внесок різних наукових напрямів і пропонує міждисциплінарні рішення, які враховують взаємовплив та взаємодію між численними вимірами екосистем IoRT нового покоління.



Рисунок 1.1 – IoRT – міждисциплінарна галузь інженерії та науки [3]

Важливим компонентом сучасних систем автономної робототехніки є багаторівневі архітектури IoT (рис. 1.2), що включають Edge, Fog та Cloud рівні.

На рівні Edge відбувається первинна обробка даних безпосередньо на борту робота або локального сенсора – це зменшує затримку, дозволяє оперативно реагувати на зміну умов середовища та знижує навантаження на мережевий трафік.

Fog-рівень виконує роль проміжної обчислювальної інфраструктури: доступні локальні сервери або шлюзи виконують агрегацію даних, оптимізацію маршрутизації, виявлення подій і управління групою роботів у реальному часі. Cloud-рівень забезпечує довгострокове зберігання даних, глибоку аналітику, машинне навчання та глобальну координацію системи, включно прогнозуванням, побудовою карт місцевості або визначенням оптимальних стратегій патрулювання [3].

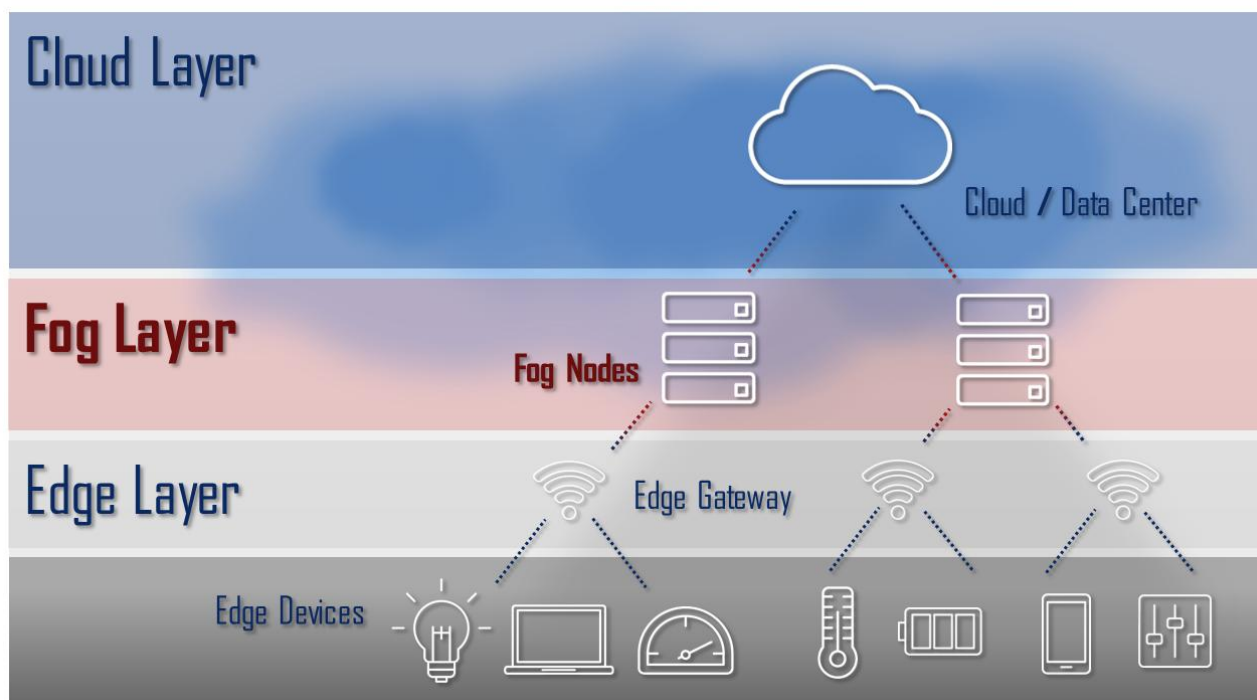


Рисунок 1.2 – IoRT – міждисциплінарна галузь інженерії та науки [3]

Завдяки такому багаторівневому підходу автономні роботизовані системи отримують доступ до обчислювальних ресурсів відповідного масштабу – від локального реагування до стратегічного аналізу. Це створює умови для ефективної роботи гібридних систем спостереження, де роботи й сенсорні вузли здатні колективно і координовано виконувати завдання моніторингу, оцінювання ризиків, пошуку аномалій і реагування на критичні події.

Після розмежування вимог та особливостей Інтернету речей (IoRT), класифікація робототехнічних пристроїв відповідно до галузей застосування представлена на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Класифікація IoRT за сферами застосування [3]

Технології та додатки Інтернету речей (IoRT) розвиваються з урахуванням умов навколишнього середовища та просторового контексту, в якому працюють пристрої IoRT. Виходячи з цього, додатки IoRT класифікуються, як представлено на рисунку 1.4.

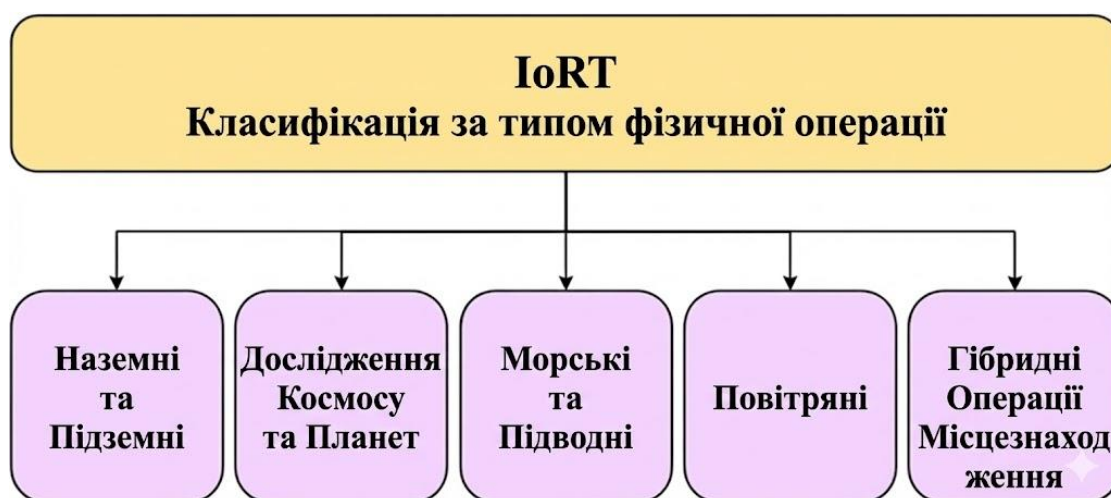


Рисунок 1.4 – Класифікація Інтернету речей відповідно до фізичної операції [3]

Різні підходи до класифікації Інтернету речей формуються з огляду на походження та специфіку робототехнічних технологій, які застосовуються у певних сферах, як показано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Класифікація Інтернету речей (IoRT) за походженням використовуваної робототехнічної технології [3]

Основні характеристики та функціональні блоки систем IoRT, незалежно від сфери застосування та умов експлуатації, ґрунтуються на фундаментальних принципах, успадкованих від IoT/IIoT, робототехніки, штучного інтелекту та інтелектуальної підключеності. Як показано на рисунку 1.6, ключовою складовою таких систем є здатність до сприйняття довкілля: IoRT-пристрої отримують інформацію за допомогою різноманітних сенсорів – мікрофонів, ультразвукових датчиків, радарів, LiDAR, камер чи антен [4].

Сприйняття та Сенсорика	Обробка	Когнітивність та Інтелект	Планування	Прийняття Рішень та Керування	Рухий	Зв'язок	Зберігання Даних та Пам'ять	Зберігання та Джерело Енергії
GPS IMU LiDAR Радар Ультразвук Камера Мікрофон	Енергія Швидкість Розмір коду	Генерування інформації Комбінювання інформації з іншими вхідними даними Розробка колаборативного інтелекту та колективного пізнання	Планувати дії на основі місії Планувати дії на основі інших Роботизованих Речей Планувати дії на основі людей, тварин, навколишнього середовища	Генерувати траєкторію Забезпечувати керування енергією на основі контексту завдання Діагностувати та керувати несправностями	Виконувати завдання Забезпечувати керування енергією на основі контексту завдання Керування за запланованою траєкторією, гальмування, стабілізація	Підключений у будь-який час, до будь-чого, до будь-кого Через різні шляхи, мережі та сервіси Здатність будувати та приймати рішення, враховуючи колективний обмін інформацією	Зберігання необхідних даних локально Зберігання необхідних даних віддалено Зберігання необхідної енергії для руху тощо	Попередньо заряджені акумулятори Самозарядні акумулятори Інші джерела енергії (сонячні тощо)
Операційні Системи								
Апаратні/Програмні Платформи IoRT								

Рисунок 1.6 – Функціональні блоки Інтернету речей [4]

Дані з різних сенсорів об'єднуються з використанням методів злиття інформації, а локалізація роботизованих платформ, об'єктів, людей або тварин

здійснюється на основі GPS/GNSS та високоточних карт. Це забезпечує формування семантичного розуміння ситуації, а також створення локальних і глобальних моделей світу, що слугують вхідними даними для аналітичних та інтелектуальних модулів.

Подальша обробка інформації виконується на локальному, периферійному та хмарному рівнях, де застосовуються енергоефективні та високошвидкісні алгоритми, інтегровані в роботизовані пристрої та розподілені середовища. Результатом цієї обробки є формування когнітивних можливостей: система генерує знання, поєднуючи сенсорні дані з контекстом, та приймає рішення, що визначають її подальші дії. Важливою функцією є планування, яке охоплює визначення дій відповідно до місії, інформації від інших роботів, людей, середовища або систем керування флотом.

Прийняття рішень і контроль охоплюють вибір траєкторії, напрямку руху, виконання маніпуляцій чи дій, управління енергоспоживанням, діагностику стану системи та реактивне керування. У поєднанні з механізмами приводу це забезпечує здатність роботизованої платформи виконувати поставлені завдання, переміщуватися у статичному або динамічному середовищі, стабілізувати рух, гальмувати чи змінювати положення тіла відповідно до умов безпечної колективної роботи.

Невід'ємною частиною IoRT є підключеність: системи повинні мати можливість працювати будь-де та будь-коли, використовуючи різні канали зв'язку та мережеві сервіси для організації обміну інформацією між роботами, інфраструктурою, людьми та іншими IoT/IIoT застосуваннями. Це забезпечує необхідний рівень автономності та підтримує прийняття рішень у межах колективних систем. Окреме значення має здатність до зберігання даних, інформації та знань – як локально, так і на периферійних та хмарних серверах – а також акумулювання енергії, необхідної для руху та виконання робочих операцій роботами.

Нові застосування IoRT прискорюють зближення концепцій підвищеної автономності та інтелекту систем з розвитком IoT, у межах якого колаборативні

роботизовані об'єкти можуть взаємодіяти з іншими «речами», навчатися автономно, безпечно взаємодіяти з довір'ям, людьми й іншими пристроями, а також набувати таких властивостей, як самодіагностика, самосвідомість, самовідновлення та здатність до продовження роботи навіть у разі часткових відмов. Системи IoRT здатні використовувати індивідуальний, кооперативний і колективний інтелект роботизованих об'єктів, а також інформацію від інфраструктури та контексту роботи для планування й виконання завдань у різних умовах довір'я з урахуванням невизначеностей і критичних ситуацій.

Цифрова трансформація суспільства пришвидшує розроблення застосувань, у яких IoRT-системи допомагають людині, підвищують ефективність її діяльності та зменшують навантаження на виконання рутинних завдань, а робототехнічні інженерні системи забезпечують подальший розвиток інтелектуалізованих технологій для оптимізації різних трудових процесів у взаємодії «людина–машина». Поява інтелектуальних систем, пристроїв та їх застосувань – у вигляді колаборативних автономних флотів IoRT – потребує розроблення нових архітектур, парадигм підключення та моделей довіри для розгортання таких систем у різних бізнесових та промислових доменах.

Еволюція в напрямку більш розвинутих периферійних обчислень та розподіленого машинного навчання спричинена низкою вимог до IoRT-застосувань: необхідністю роботи в режимі реального часу, гарантованою низькою затримкою комунікації, енергоефективністю, забезпеченням безпеки та конфіденційності даних, а також підтримкою когнітивної та колективної взаємодії між роботизованими пристроями [5].

Розвиток IoRT відбувається паралельно з прогресом у сфері промислового Інтернету речей (IIoT), де поєднуються інформаційні технології (IT), орієнтовані на обробку даних, і операційні технології (OT), що використовуються в корпоративних і промислових процесах, інтегруючи системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) і програмовані логічні контролери (PLC). У промислових застосуваннях спостерігається дедалі більша інтеграція цих технологій, а також впровадження нових інтелектуальних мереж підключення.

Такі системи охоплюють гетерогенні та розподілені IoRT-застосування, які висувають до мережі специфічні та підвищені вимоги. Ці нові інтелектуальні мережі здатні надавати численні функції та адаптивні можливості, що реалізують компоненти IoRT-платформ та передають інформацію з урахуванням змістовних і контекстуальних потреб IoRT-застосувань. IoRT-системи можуть використовувати дані, згенеровані мережею, а множинні функціональні та адаптивні можливості можуть ініціюватися динамічно – безпосередньо поблизу автономних флотів IoRT, де ці дані збираються, потрібні та використовуються [6].

Уся цифрова ціннісна мережа майбутніх автономних та підключених IoRT-систем має бути здатною відчувати, локалізувати, мислити, підключатися, співпрацювати, навчатися і діяти, як представлено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Функції автономних та підключених систем Інтернету речей [6]

Роль IoT у системах автономного спостереження є визначальною. По-перше, IoT забезпечує безперервне збирання даних з великої кількості сенсорних вузлів (температура, газові концентрації, рух, вібрації, зображення), що формують загальну картину стану середовища. По-друге, IoT забезпечує низьколатентну комунікацію між автономними роботами і мережею, завдяки

чому можливе групове патрулювання, координація польотів дронів або аналіз шляхів пересування наземних платформ. По-третє, інтеграція IoT із аналітичними модулями у хмарі дозволяє здійснювати високоточне виявлення загроз, класифікацію подій, оптимізацію покриття території та розроблення адаптивних стратегій патрулювання.

Таким чином, взаємодія IoT та автономної робототехніки формує основу для побудови інтелектуальних гібридних систем спостереження, здатних працювати у складних, динамічних та невизначених умовах. Вона забезпечує масштабованість, надійність і гнучкість, необхідні для сучасних систем безпеки, промислового моніторингу, екологічного нагляду та кризового реагування.

1.2 Гібридні мережі автономних роботів

Основні характеристики систем автономних мережевих роботів (ANR) базуються на груповій взаємодії роботів як між собою, так і з навколишнім середовищем за допомогою розгорнутих бездротових сенсорних мереж (WSN). Ці взаємодії визначають ключові властивості багатороботних систем (MRS), такі як їхня архітектура, методи комунікації, механізми координації та співпраці, а також стратегії планування шляху та розподілу завдань [7]. Зі свого боку, мережі WSN визначаються власним набором параметрів, включаючи характеристики фізичного рівня та рівня управління доступом до середовища (MAC), а також топології мережі та маршрутизації [8].

Архітектура MRS є фундаментальним каркасом усієї системи. Саме архітектура управління MRS є критичним фактором, що визначає загальну ефективність, надійність, масштабованість та стійкість системи, формуючи основу її функціонування. Після розробки архітектури наступним опорним елементом стає система комунікації між агентами MRS. Зв'язок у таких системах забезпечує необхідні засоби для реалізації вищих форм взаємодії, наприклад, колективного планування [9]. Встановлений зв'язок дозволяє членам системи переходити до координації дій та/або співпраці для виконання різноманітних

місій. Координація в MRS може бути спрямована на кооперацію (спільна робота над завданням) або на конкуренцію (де виконання завдань базується на таких факторах, як тип робота, часові обмеження або природа самого завдання) [10]. Визначена структура координації дозволяє здійснювати подальше планування навігації та розподіл завдань. Цей розділ містить тематичні дослідження, присвячені кожній із цих характеристик MRS.

З іншого боку, WSN складаються з сенсорних вузлів, шлюзів та інших компонентів, спроектованих на базі стеку протоколів WSN. Цей загальний стек поділяється на протоколи комунікації (що охоплюють фізичний рівень, MAC-рівень, мережевий рівень тощо) та протоколи управління (які відповідають за керування живленням, мобільністю та завданнями) [8]. Загальний протокол WSN безпосередньо впливає на архітектурні рішення при проектуванні сенсорних вузлів, а також на функціональність шлюзів і базових станцій. Це дослідження конкретно зосереджено на WSN, що базуються на стандартах низькошвидкісного зв'язку з низьким енергоспоживанням. Представлено стандарти IEEE 802.15.4/ZigBee та суб-гігагерцові стандарти, а також кілька прикладів систем спостереження, які використовують ці комунікаційні стандарти.

У роботі [10] ключовими напрямками досліджень у галузі багатороботних систем визначено координацію та управління, комунікацію, картографування та локалізацію, а також архітектури систем. Відповідно, у цьому підрозділі розглядаються споріднені праці за цими напрямками, додатково охоплюючи проблеми планування для декількох роботів та розподілу завдань.

Архітектура MRS є фундаментальним каркасом, на якому реалізується колективна поведінка групи, що визначає надійність, масштабованість, функціональні можливості та обмеження системи. У сфері MRS прийнято виділяти чотири основні типи архітектур: централізовану, ієрархічну, децентралізовану та гібридну [11]. Ці підходи були по-різному досліджені та реалізовані науковцями, і далі подано короткий огляд кожного з них, тоді як у таблиці 1.1 наведено їх порівняльний аналіз.

Таблиця 1.1 – Порівняння архітектур MRS

Тип архітектури	Показники ефективності			
	Надійність	Стійкість	Масштабованість	Ефективність
Централізована	1	1	1	3
Ієрархічна	1	2	2	2
Децентралізована	2	2	2	2
Гібридна	3	3	3	2

Централізовані архітектури характеризуються координацією всього управління командою з єдиного вузла. Такий підхід має суттєві обмеження, оскільки вихід з ладу центрального пункту управління призводить до відмови всієї системи. Крім того, через комунікаційні витрати на передачу сигналів від членів команди назад до центру часто неможливо забезпечити управління в реальному часі. Це негативно впливає на точну масштабованість системи, яка може використовуватися лише за умови прямої видимості між центральним пунктом та кожним агентом, що робить такі архітектури переважно теоретичними моделями.

Натомість ієрархічні архітектури обмежені специфічними застосуваннями, зокрема тими, що використовують структури типу «лідер-послідовник». У такій схемі робот, що діє як лідер, контролює дії невеликої групи інших роботів-послідовників. Ця формація ієрархічно повторюється по всій системі до останнього робота, який просто виконує призначене завдання. Ієрархічні системи мають кращу масштабованість порівняно з централізованими, але залишаються вразливими до системних збоїв на високих рівнях дерева управління [12].

На відміну від перших двох типів, децентралізовані архітектури мають широкий спектр застосувань у середовищах реального часу і є найпоширенішими в багатороботних системах. У таких архітектурах кожен робот у команді діє на основі власних локальних знань про навколишнє середовище, що робить всю систему стійкою до відмов, оскільки роботи менше залежать від єдиного керуючого органу [13].

Хоча менша взаємозалежність роботів у децентралізованих системах є

перевагою, виникають труднощі, коли необхідно інтегрувати глобальні цілі та завдання всієї команди в локальні алгоритми управління кожного окремого агента. Для вирішення подібних проблем застосовують гібридні архітектури, які поєднують методи локального та високорівневого контролю. Такий інтегрований підхід дозволяє досягти підвищеної стійкості та кращої масштабованості системи, завдяки чому роботи можуть ефективно виконувати завдання як на локальному, так і на глобальному рівнях.

Обмін інформацією відіграє критично важливу роль у функціонуванні MRS, слугуючи фундаментом для організації високорівневої взаємодії між агентами. Завдяки механізмам комунікації роботи здатні поширювати дані про своє поточне місцезнаходження та результати сприйняття навколишнього світу, що дозволяє ефективно розподіляти сенсорні можливості групи та охоплювати більші території. Існують різні засоби реалізації зв'язку в MRS, які варіюються від біонічних підходів до використання стандартних бездротових технологій, таких як спеціалізовані (ad-hoc) мережі [14]. Загальноприйнята класифікація поділяє комунікацію в MRS на три основні категорії: неявну (стігмержію), пасивну та явну [15].

Неявна комунікація, також відома як стігмержія, відбувається, коли робот взаємодіє з іншими членами команди опосередковано, через свої дії та спричинені ними зміни в навколишньому середовищі. Перевагою цього методу є його простота, оскільки він не вимагає складних комунікаційних стандартів, проте його недоліком є необхідність точного сприйняття середовища роботом для коректного визначення поточного етапу виконання спільного завдання [16]. При пасивній комунікації роботи використовують власні сенсори для безпосереднього спостереження за діями своїх партнерів по команді. Цей підхід дозволяє уникнути проблем, характерних для протокольного зв'язку, таких як обмеження пропускної здатності, технічні збої, атаки або ненадійність механізму передачі даних. Однак, подібно до неявної комунікації, він стикається з труднощами точної інтерпретації дій партнера через потенційну зашумленість сенсорних даних. Третім і найбільш стандартизованим типом є явна, або

навмисна, комунікація. У цьому випадку робот цілеспрямовано передає конкретне повідомлення іншим членам команди, зазвичай використовуючи встановлений комунікаційний протокол, наприклад, радіозв'язок [17].

Такий зв'язок є прямим і спрощує синхронізацію в MRS. Отже, роботи відносно легко дізнаються про стан членів своєї команди. Явна комунікація є найбільш корисною для MRS з невеликою кількістю роботів, а також для застосувань, що вимагають швидкого реагування, наприклад, при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій [10]. Проте методи явної комунікації обмежені з точки зору відмовостійкості та надійності механізмів і протоколів, оскільки канали зв'язку можуть бути зашумленими, мати обмежену пропускну здатність і не завжди забезпечувати безперервне з'єднання між усіма членами команди.

Бездротовий зв'язок є найпоширенішим засобом комунікації в БРС, оскільки він є різновидом явного зв'язку; тому це дослідження зосереджується саме на цьому типі комунікації, зокрема на стандартах з низьким енергоспоживанням, таких як IEEE 802.15.4/ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11 тощо.

Взаємодія в MRS може базуватися на принципах співпраці, коли агенти об'єднують зусилля для досягнення спільних цілей чи виконання низки завдань, або ж на принципах конкуренції, де кожен робот діє індивідуально, змагаючись за доступні завдання в рамках конкурентної архітектури [18]. Згідно з загальноприйнятою класифікацією, процеси координації в MRS поділяються на два основні типи: статичну та динамічну.

Статична координація, яку також називають дорадчою (*deliberative*) або офлайн-координацією, характеризується тим, що всі правила взаємодії та інструкції розробляються і затверджуються заздалегідь, ще до того, як роботи приступають до виконання місії.

На противагу цьому, динамічна координація є онлайн-процесом із реактивним характером, тобто вона відбувається безпосередньо під час виконання завдання. Ефективність динамічної координації значною мірою залежить від безперервного аналізу та синтезу спільної інформації, якою роботи обмінюються через доступні засоби комунікації [18].

Практичне застосування механізмів координації та співпраці в MRS яскраво демонструється у таких типових задачах, як спільне картографування місцевості та покриття території колективна локалізація агентів, а також виконання місій з моніторингу, розвідки середовища та відстеження цілей.

Планування шляху являє собою процес визначення послідовності рухів (поступальних і обертальних), які робот повинен здійснити для переміщення з вихідної позиції до пункту призначення, одночасно уникаючи перешкод у своєму операційному середовищі. У сфері досліджень багатороботних систем (MRS) центральне місце посідає проблема багатороботного планування шляху (MRPP). Її загальне формулювання звучить так: маючи m роботів у k -вимірному робочому просторі, для кожного з яких задано стартову та цільову конфігурації (пози), необхідно визначити індивідуальний шлях для кожного агента до його мети таким чином, щоб уникнути зіткнень як зі статичними перешкодами, так і з іншими роботами системи.

Підходи до вирішення MRPP поділяються на глобальні та локальні. Глобальне планування застосовується, коли маршрути генеруються на основі повної інформації про відоме середовище або на базі комплексних даних поточного та попереднього сприйняття. Часто глобальне планування реалізується централізовано, де єдиний планувальник обчислює шляхи для всіх агентів і передає їх відповідним членам команди. Натомість локальне планування шляху здійснюється в режимі реального часу безпосередньо під час навігації, спираючись на дані бортових сенсорів робота для динамічного реагування на локальне оточення. Існує дві основні групи алгоритмів планування шляху: класичні та евристичні (рис. 1.8). Сучасні дослідження та практичні розробки у цій галузі переважно зосереджені на застосуванні саме евристичних методів [19].

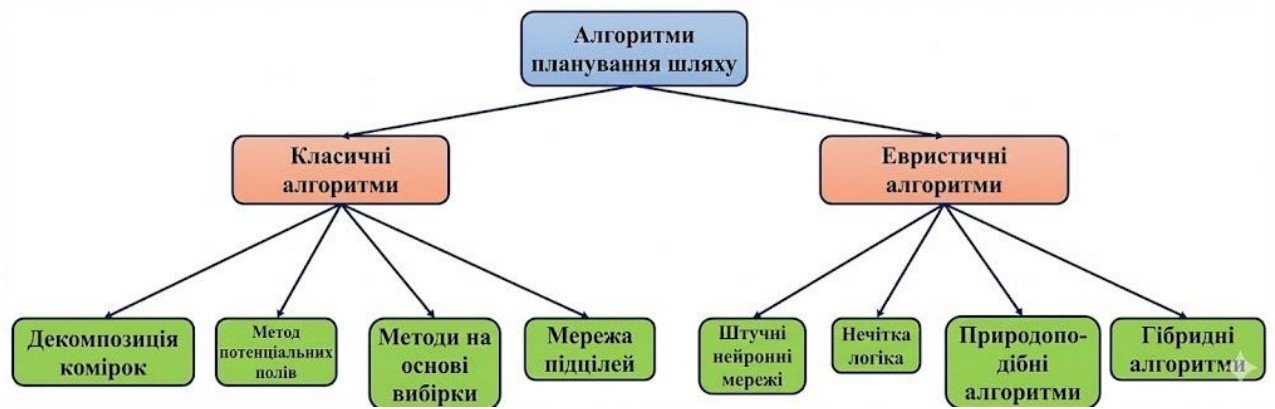


Рисунок 1.8 – Алгоритми планування шляху

Фундаментальна концепція MRTA полягає в тому, що роботи в системі повинні виконувати певний набір завдань – індивідуально, колективно або в інший спосіб. Ці завдання можуть бути декомпововані на підзадачі, ієрархічні дерева завдань тощо. Незалежні підзадачі можуть виконуватися паралельно, тоді як дерева завдань вимагають дотримання послідовності, зумовленої їхньою взаємозалежністю. Дослідники часто зосереджуються на проблемі розподілу завдань, яка полягає у знаходженні алгоритму, що призначає завдання роботам з мінімальними витратами. Для систематизації всіх можливих способів розподілу завдань розроблено таксономію MRTA. Таксономія MRTA має ієрархічну структуру, представлену на рисунку 1.9.

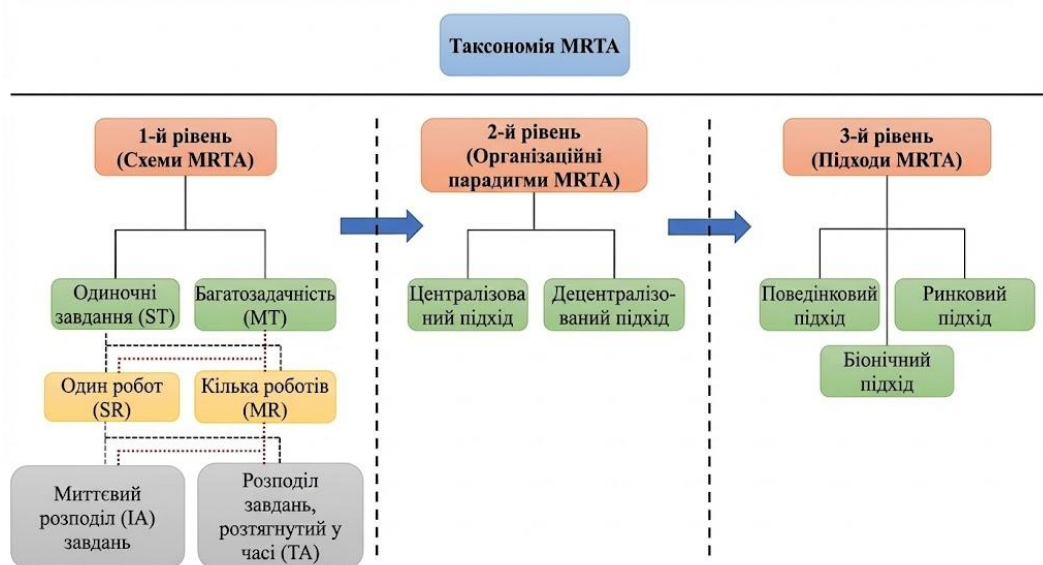


Рисунок 1.9 – Таксономія розподілу завдань у мультироботних системах [20]

Перший рівень цієї таксономії визначає схеми MRTA, де планування розподілу залежить від природи завдань і наявних роботів. Другий рівень описує існуючі парадигми реалізації цих схем: централізовану парадигму, в якій всі призначення здійснюються з єдиного центру, та децентралізовану парадигму, де завдання розподіляються між самими роботами. Нарешті, третій рівень визначає конкретний підхід, що використовується для виконання завдання. У поведінкових підходах завдання диференціюються та призначаються групам, які називаються поведінковими групами. Ринкові підходи базуються на концепції аукціонів та торгів, прагнучи максимізувати «дохід» (інформацію та швидкість) при мінімізації «витрат» (часу комунікації та збіжності). У ролі аукціоністів можуть виступати центральна система управління (у централізованих парадигмах) або інші роботи чи системи (наприклад, WSN) у децентралізованих парадигмах, тоді як члени команди роботів завжди є учасниками торгів. Біонічні підходи намагаються імітувати біологічні системи виконання завдань, що існують у колоніях мурах, вуликах бджіл та інших соціальних комах.

Фундаментом системи автономних мережевих роботів (ANR) є інтеграція багатороботної системи (MRS), яка володіє визначеними вище характеристиками, з бездротовою сенсорною мережею (WSN).

Аналіз суміжних робіт у цій галузі свідчить, що загалом будь-яка WSN може бути вивчена та оцінена крізь призму природи її базового стеку протоколів (рис. 1.10).

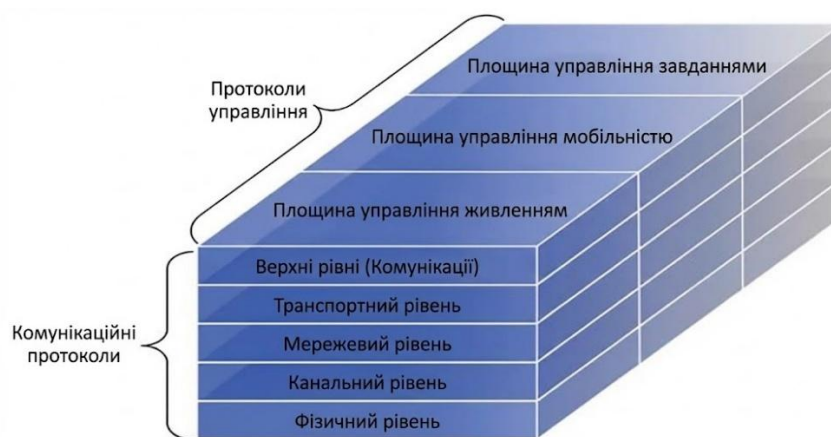


Рисунок 1.10 – Стек протоколу WSN [21]

Наукові пошуки у сфері WSN переважно спрямовані на підвищення ефективності мережі в цілому шляхом оптимізації окремих рівнів цього стеку, де кожен рівень виконує свій набір функцій. У контексті робототехнічних застосувань головним фокусом досліджень WSN є каналний рівень (разом із підрівнем управління доступом до середовища – MAC), оптимізація якого дозволяє покращити ефективність мережі, управління енергоспоживанням, зменшити затримки, а також підвищити пропускну здатність, стійкість і стабільність. Наступним за важливістю напрямком концентрації досліджень є мережевий рівень, оскільки він відповідає за масштабованість мережі, маршрутизацію та протоколи топології. Саме ці два рівні роблять вирішальний внесок у забезпечення основних застосувань WSN у робототехніці, таких як управління, навігація, локалізація та відстеження об'єктів, покриття території, дослідження середовища та збір даних.

Бездротові сенсорні мережі (WSN) визначаються трьома основними компонентами: сенсорними вузлами (які можуть виконувати ролі кінцевих пристроїв, маршрутизаторів або координаторів), шлюзами або базовими станціями, а також комунікаційним стандартом, що забезпечує зв'язок вузлів зі шлюзом та ширшими мережами. Сенсорні вузли є ключовими будівельними блоками WSN, головне призначення яких полягає у сприйнятті даних, їх обробці та передачі звітів. Залежно від специфіки застосування, вони можуть оснащуватися одним або кількома різномісними сенсорами, які іноді виносяться в окремий сенсорний модуль. Крім того, вузли можуть містити актуатори, що реагують на інформацію, отриману безпосередньо від сенсорів або через мережу. Існують дві загальні архітектури сенсорних вузлів: архітектура на базі мікроконтролера (MCU) та архітектури, засновані на інших типах процесорів [21]. Обидва типи архітектур включають сенсори (аналогові або цифрові), блок пам'яті, комунікаційний модуль, блок живлення та блок обробки даних, роль якого можуть виконувати MCU або реконфігуровані пристрої, такі як FPGA (рис. 1.11).

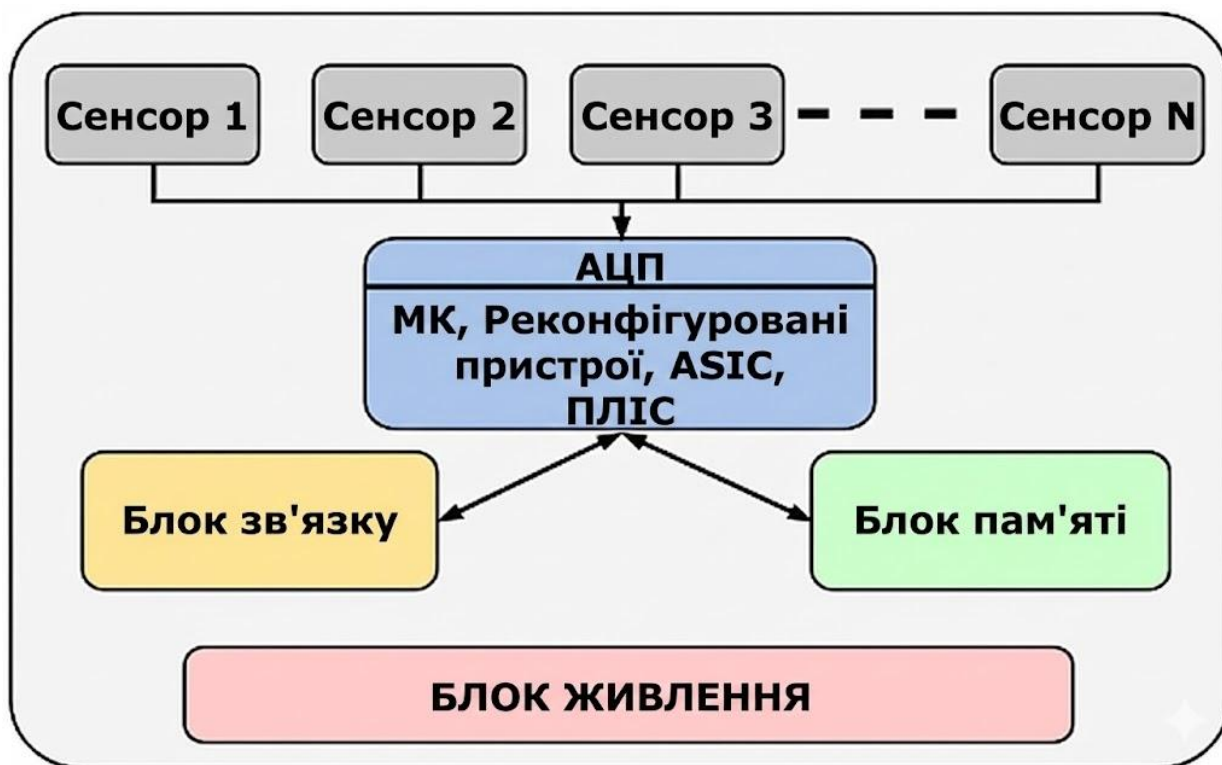


Рисунок 1.11 – Загальна архітектура вузла датчика [21]

У більшості WSN зазвичай використовуються два типи сенсорних вузлів: пристрої з повним набором функцій (FFD) та пристрої зі скороченим набором функцій (RFD). Пристрої з повним набором функцій (FFD) це сенсорні вузли, здатні не лише сприймати дані, але й діяти як маршрутизатори та/або координатори для інших вузлів, тому вони оснащені додатковою пам'яттю та більшою обчислювальною потужністю. Натомість пристрої зі скороченим набором функцій (RFD) розгортаються виключно для завдань сприйняття, мають обмежену функціональність і оснащені мінімально необхідним обсягом пам'яті та обчислювальних ресурсів для ефективного виконання своїх базових функцій.

У архітектурі бездротових сенсорних мереж шлюзи виконують подвійну роль: вони можуть діяти як повноцінні сенсорні вузли з функціями маршрутизації, відомі як мережеві координатори, або ж слугувати виключно точками збору даних (стоками), куди надходить уся інформація з мережі. Крім того, на них покладено завдання ініціалізації мережі за допомогою розсилки широкомовних або багатоадресних повідомлень, після чого зібрані дані передаються на базові станції [22]. Базові станції, натомість, функціонують як

головні контролери, здійснюючи загальний нагляд за мережею, а також обробку та інтерпретацію всіх отриманих даних. До їхніх критично важливих функцій належить управління топологією мережі, зокрема визначення процедур додавання нових або видалення існуючих вузлів. Окрім цього, базові станції відповідають за технічне обслуговування мережі, включаючи перевірку безпеки та синхронізацію, і забезпечують інтеграцію з зовнішніми віддаленими системами, такими як веб-сервіси та застосунки Інтернету речей (IoT).

Стандарти бездротового зв'язку для WSN охоплюють широкий спектр протоколів і специфікацій, призначених для управління ключовими характеристиками мережі, включаючи комунікацію, з'єднання, топологію маршрутизації, стратегії розгортання, енергоефективність, тривалість роботи та безпеку. Ці стандарти зазвичай орієнтовані на зв'язок малого радіусу дії та поділяються на дві основні категорії: бездротові локальні мережі (WLAN) та бездротові персональні мережі (WPAN) (рис. 1.12). У WSN найчастіше застосовуються стандарти з низьким рівнем енергоспоживання, до яких належать IEEE 802.15.4/ZigBee, IEEE 1451, IPv6 поверх IEEE 802.15.4 (відомий як 6LoWPAN), WirelessHART, Z-wave, Bluetooth з наднизьким енергоспоживанням, а також різноманітні радіочастотні стандарти субгігагерцового діапазону.

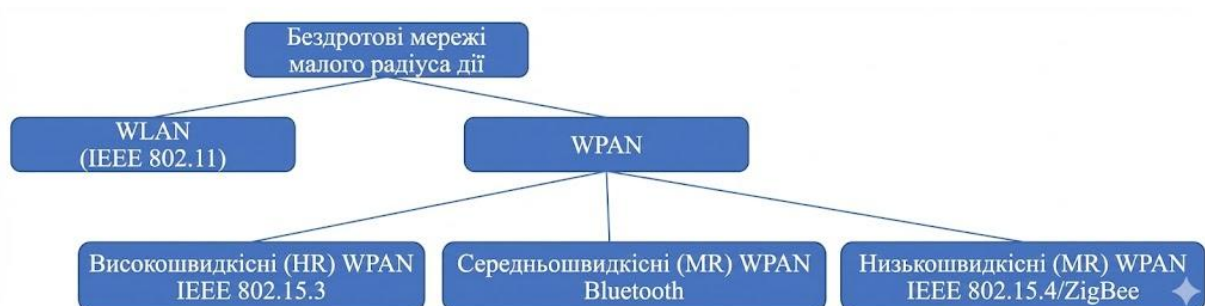


Рисунок 1.12 – Класифікація бездротових мереж [22]

У даному розділі було проведено комплексний аналіз теоретичних засад та сучасного стану досліджень у галузі систем автономних мережевих роботів (ANR), які є результатом синергетичної інтеграції багатороботних систем (MRS)

та бездротових сенсорних мереж (WSN). Огляд літератури дозволив виділити критичні характеристики та компоненти, що визначають ефективність функціонування таких систем.

Результатами аналізу MRS показують, що вибір архітектури управління є фундаментальним рішенням, яке впливає на надійність, масштабованість та ефективність системи. Хоча децентралізовані архітектури забезпечують високу стійкість до відмов, а ієрархічні – масштабованість, саме гібридні підходи дозволяють оптимально поєднувати локальне реактивне управління з глобальним плануванням місій. Було встановлено, що ефективна координація та співпраця в групі роботів неможлива без надійної системи комунікації, причому явна бездротова комунікація є стандартом для передачі складної інформації. Розгляд методів планування шляху та розподілу завдань (MRTA) показав, що для роботи в реальному часі в динамічних середовищах найбільш перспективними є евристичні алгоритми та ринкові або біонічні підходи до розподілу завдань.

Аналіз технології WSN підкреслив важливість оптимізації стеку протоколів, особливо на каналному (MAC) та мережевому рівнях, для забезпечення енергоефективності та стабільності мережі. Було визначено роль різних типів сенсорних вузлів (FFD та RFD) та базових станцій в організації збору даних. Огляд стандартів бездротового зв'язку малого радіусу дії вказав на доцільність використання протоколів з низьким енергоспоживанням для робототехнічних застосувань.

РОЗДІЛ 2

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СЕРЕДОВИЩЕ РОЗРОБКИ СИМУЛЯЦІЙ

2.1 Структура проектування SDE

Розробка складних робототехнічних систем, особливо тих, що включають взаємодію гетерогенних агентів (БПЛА та наземні платформи) у межах концепції IoT, вимагає ретельного попереднього моделювання. Середовище розробки симуляцій (Simulation Development Environment – SDE) виступає ключовим інструментом для верифікації алгоритмів керування, навігації та комунікації без ризику пошкодження дороговартісного обладнання. У контексті даної роботи SDE дозволяє дослідити поведінку гібридної мережі в умовах, наближених до реальних, враховуючи фізику руху, аеродинамічні ефекти та обмеження каналів бездротового зв'язку [23].

Вибір програмного забезпечення для побудови SDE базувався на порівняльному аналізі провідних платформ: Gazebo, Webots та V-REP (CoppeliaSim). Критеріями відбору слугували: наявність фізичного рушія, здатного адекватно відтворювати як колісну кінематику, так і динаміку польоту; підтримка розподіленої архітектури для емуляції мережевої взаємодії; глибока інтеграція з фреймворком ROS (Robot Operating System) та відкритість коду для модифікації.

Результати порівняльного аналізу наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз середовищ симуляції для гібридних систем використовують НІЛ та хмарні технології.

Характеристика	Gazebo	Webots	V-REP (CoppeliaSim)
Ліцензія	Open Source (Apache 2.0)	Open Source / Commercial	Commercial / Edu
Фізичні рушії	ODE, Bullet, Simbody, DART	ODE (модифікований)	Bullet, ODE, Newton, Vortex
Моделювання БПЛА	Висока точність (плагін RotorS)	Середня	Середня
Інтеграція з ROS	Нативна (високий рівень)	Через контролери	Через плагіни
Ресурсна ємність	Середня	Висока	Висока

На основі аналізу платформу Gazebo (версія 11) у зв'язці з ROS Noetic було обрано як найбільш відповідну потребам дослідження. Вирішальним фактором стала наявність потужного фізичного рушія ODE (Open Dynamics Engine), що дозволяє коректно розраховувати колізії та сили тертя, а також широка підтримка спільноти, що надає доступ до перевірених моделей пакету `hector_quadrotor` для симуляції БПЛА [24].

Архітектура розробленого SDE базується на модульному принципі, де кожен робот представлений окремим іменованим простором (namespace) у мережі ROS. Центральним елементом є `roscore` (ROS Master), який забезпечує реєстрацію вузлів та обмін повідомленнями через механізм публікації/підписки (Topics).

Взаємодія між симулятором та системою керування реалізована через `gazebo_ros_pkgs`. Фізична симуляція середовища, колізій та інерційних властивостей роботів виконується сервером `gzserver`, тоді як візуалізація процесу для користувача забезпечується клієнтом `gzclient` (рис. 2.1).

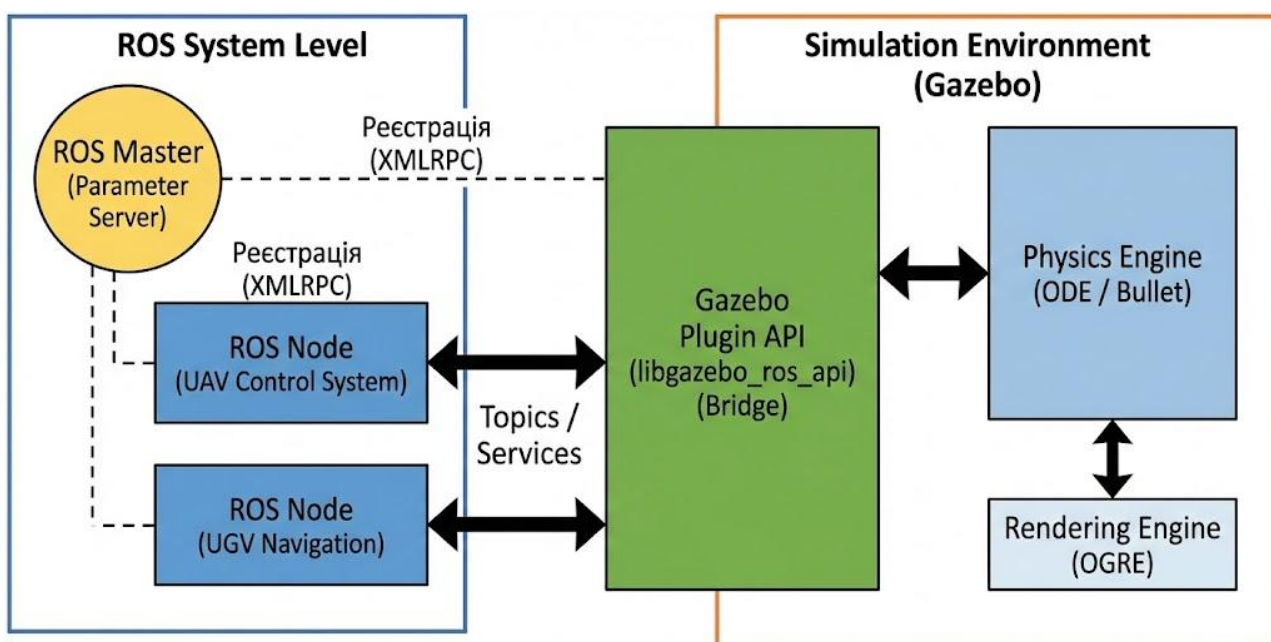


Рисунок 2.1 – Узагальнена архітектура середовища SDE на базі ROS та Gazebo [24]

Для обміну даними використовуються стандартизовані топіки ROS:

- керування рухом: /cmd_vel (тип geometry_msgs/Twist);
- дані одометрії: /odom (тип nav_msgs/Odometry);
- дані лідара: /scan (тип sensor_msgs/LaserScan);
- відеопотік: /camera/image_raw (тип sensor_msgs/Image).

Така структура дозволяє розділити обчислення фізики та графіки, що є критичним при моделюванні великої кількості агентів. Важливим аспектом є синхронізація часу: SDE налаштовано на використання симуляційного часу (`use_sim_time = true`), що дозволяє уповільнювати симуляцію при високому навантаженні на процесор без втрати точності фізичних розрахунків [25].

Налаштування віртуального полігону передбачало створення цифрового двійника тестового середовища у форматі `.world`. Опис роботів виконано мовою Хасро (XML Macros), що дозволяє гнучко змінювати параметри сенсорів та геометрію шасі без переписування всього коду.

Карта місцевості була згенерована на основі реальних топографічних даних з додаванням статичних перешкод (стіни, дерева) та динамічних об'єктів (імітація порушників). Для коректної роботи сенсорів, зокрема лідарів та камер, поверхні об'єктів у симуляторі були налаштовані з урахуванням їхніх оптичних властивостей та коефіцієнтів відбиття сигналу. Це дозволяє отримувати дані з віртуальних датчиків, зашумленість яких відповідає реальним показникам (Gaussian noise model), описаним у роботах [26, 27].

На рисунку 2.2 продемонстровано реалізацію віртуального полігону в інтерфейсі Gazebo. Сцена включає набір статичних перешкод, що формують лабіринт для тестування навігаційних алгоритмів SLAM, а також модель наземного робота TurtleBot3 та квадрокоптера. Візуалізація демонструє коректну роботу освітлення та фізичних властивостей матеріалів, що є критично важливим для валідації даних, отриманих з віртуальних камер та лідарів.

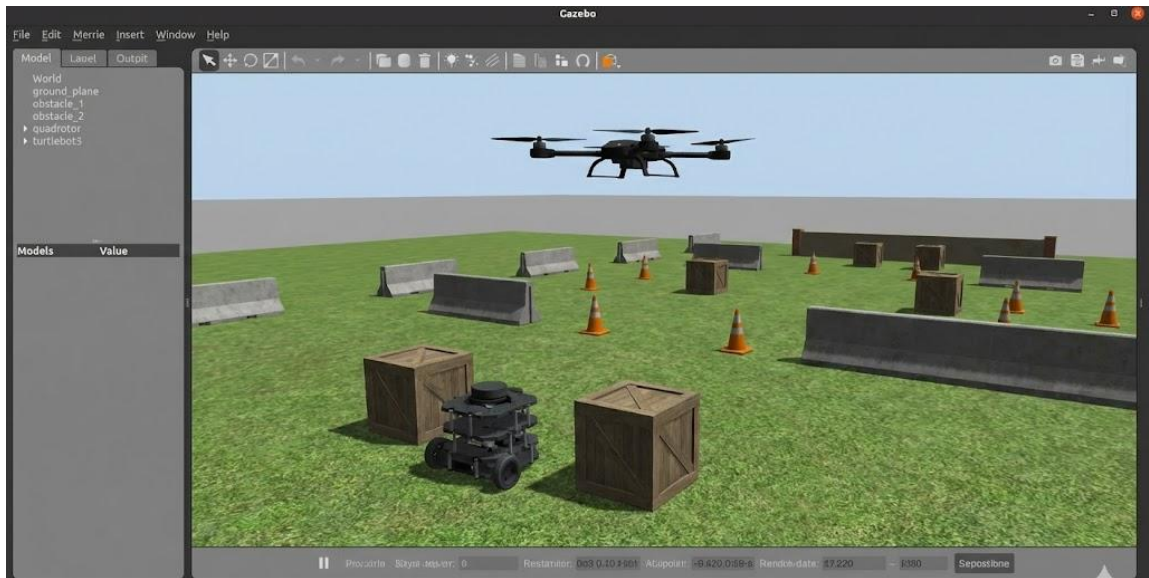


Рисунок 2.2 – Візуалізація віртуального полігону в середовищі Gazebo

В результаті побудови SDE було створено замкнутий контур керування (Hardware-in-the-Loop simulation readiness), який дозволяє тестувати алгоритми групової взаємодії роботів ще до етапу створення фізичних прототипів, що суттєво прискорює процес розробки та налагодження системи.

2.2 Розробка MRS-SMs

Основою для адекватного моделювання мультиагентної системи є створення достовірних математичних та програмних моделей окремих агентів (MRS-SMs – Multi-Robot System Simulation Models). У даній роботі розглядається гетерогенна група, що складається з наземних мобільних роботів (UGV) та безпілотних літальних апаратів (UAV).

Для моделювання руху наземних роботів використано кінематичну модель з диференціальним приводом (differential drive kinematics). Стан робота в глобальній системі координат описується вектором $q = [x, y, \theta]^T$, де (x, y) – координати центру мас, а θ – кут орієнтації. Зміна положення робота в часі визначається системою рівнянь (2.1) [28]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

де v – лінійна швидкість:

ω – кутова швидкість.

Дана модель враховує неголономні зв'язки, що обмежує миттєвий рух робота лише в напрямку його поздовжньої осі.

Для БПЛА (квадрокоптера) застосовано динамічну модель з шістьма ступенями вільності (6-DOF), яка базується на рівняннях Ньютона-Ейлера. Керуючими впливами є сумарна тяга гвинтів T та моменти обертання $\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi$ навколо осей Roll, Pitch, Yaw. Симуляція динаміки польоту в Gazebo реалізується через підключення плагіна `libgazebo_ros_control.so`, який забезпечує розрахунок аеродинамічних сил та взаємодію з гравітацією, дозволяючи тестувати алгоритми стабілізації висоти та зависання [29].

Критичним аспектом симуляції є моделювання роботи сенсорів. У SDE реалізовано віртуальні аналоги лідара (LIDAR) та RGB-камери. Для наближення симуляції до реальних умов впроваджено модель адитивного гауссового шуму (Gaussian noise model).

Для лазерного далекоміра (RPLIDAR A1) модель вимірювання відстані z_k до перешкоди описується за формулою (2.2):

$$z_k = h(x_k, m) + N(0, \sigma_r^2), \quad (2.2)$$

де $h(x_k, m)$ – істинна відстань до об'єкта на карті;

$N(0, \sigma_r^2)$, – нормальний розподіл шуму з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ_r^2 .

В файлах опису робота (URDF) це реалізується через тег `<noise>` у блоці сенсора. Значення стандартного відхилення обрано $\sigma = 0,01$ м на основі

паспортних даних реального сенсора [30].

Відеопотік з камери моделюється з урахуванням дисторсії об'єктива та шуму матриці, що дозволяє перевіряти стійкість алгоритмів комп'ютерного зору (наприклад, YOLO або OpenCV) до артефактів зображення (рис. 2.3).

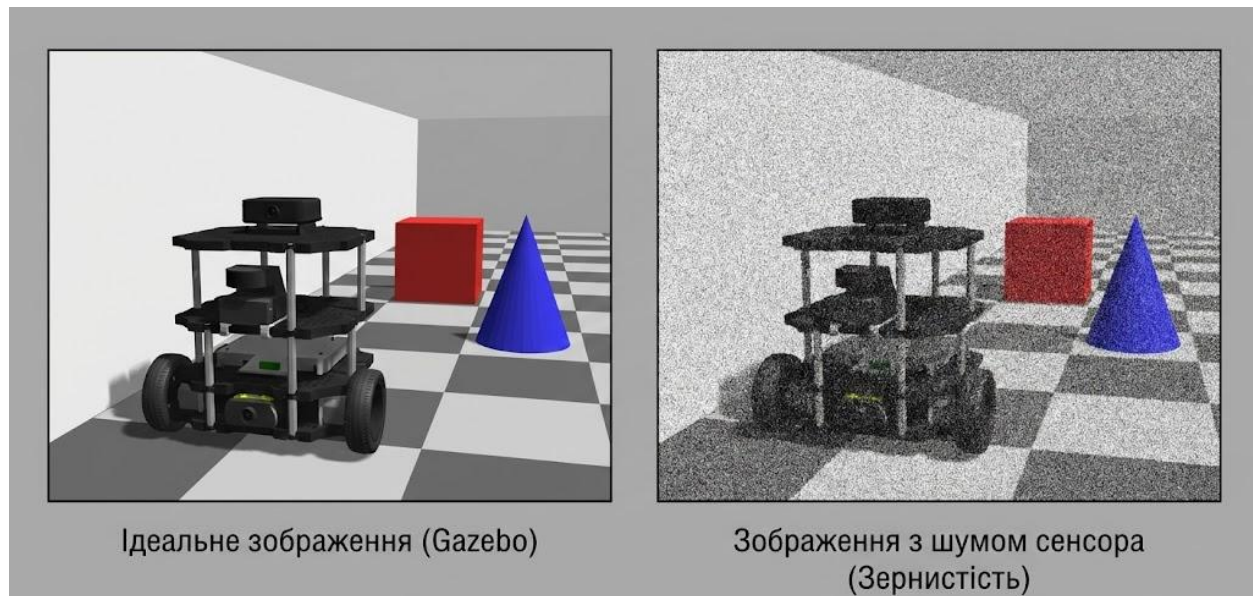


Рисунок 2.3 – Порівняння ідеального зображення з симулятора та зображення з доданим шумом сенсора

Система керування MRS-SMs побудована за дворівневою архітектурою.

Глобальне планування використовує алгоритм A* або Dijkstra для побудови оптимального маршруту на відомій карті місцевості (Static Global Map).

Локальна навігація забезпечує уникнення динамічних перешкод у реальному часі. Для цього імплементовано метод штучних потенціальних полів (Artificial Potential Fields – APF) з адаптивним налаштуванням коефіцієнтів відштовхування.

Кожен агент розраховує результуючий вектор руху \vec{F}_{total} як суму вектора притягання до цілі \vec{F}_{att} та векторів відштовхування від перешкод та інших роботів \vec{F}_{repl} за формулою (2.3):

$$\vec{F}_{total} = k_{att}\vec{F}_{att} + \sum_i k_{rep,i}\vec{F}_{rep,i}. \quad (2.3)$$

Такий підхід дозволяє реалізувати децентралізоване керування роєм роботів без необхідності постійного зв'язку з центральним сервером, що підвищує живучість системи в умовах нестабільного IoT-з'єднання [31].

2.3 Апаратні компоненти та реалізація WSN

Бездротова сенсорна мережа (WSN) у складі гібридної системи виконує роль перцептивного шару, забезпечуючи безперервний моніторинг параметрів навколишнього середовища та первинну детекцію подій. Враховуючи вимоги до автономності та енергоефективності, ключовими етапами реалізації є вибір обчислювальної платформи, сенсорів та схеми енергоживлення.

Для реалізації стаціонарних вузлів WSN було проведено порівняльний аналіз мікроконтролерів (МК) архітектур AVR, ARM Cortex-M та Xtensa (табл. 2.2). Основними критеріями вибору були: співвідношення продуктивності до енергоспоживання, наявність вбудованих бездротових інтерфейсів та підтримка протоколів низького енергоспоживання.

Таблиця 2.2 – Порівняльні характеристики платформ для реалізації WSN зі статичними перешкодами та визначеними місцями розташування сенсорів.

Характеристика	ATmega328P (Arduino)	STM32F103 (Blue Pill)	ESP32-WROOM-32
Архітектура	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M3	32-bit Xtensa LX6 (Dual Core)
Частота	16 МГц	72 МГц	240 МГц
Flash/SRAM	32 КБ / 2 КБ	64 КБ / 20 КБ	4 МБ / 520 КБ
Бездротовий зв'язок	Відсутній (потрібен модуль)	Відсутній (потрібен модуль)	Wi-Fi + Bluetooth 4,2/BLE
Струм (Deep Sleep)	~0,1 мкА (голий чіп)	~10 мкА	~10 мкА

За результатами аналізу було обрано SoC ESP32-WROOM-32. Незважаючи на дещо вище споживання в активному режимі порівняно з STM32, ESP32 забезпечує інтегрований стек Wi-Fi/Bluetooth, що дозволяє уникнути

використання зовнішніх модулів зв'язку і спрощує схемотехніку. Крім того, підтримка протоколу ESP-NOW дозволяє реалізувати обмін короткими повідомленнями без встановлення повного Wi-Fi з'єднання, що зменшує час перебування в активному режимі та, як наслідок, знижує середнє енергоспоживання вузла [32].

Сенсорний модуль вузла включає набір датчиків для різнобічного аналізу обстановки (рис. 2.4):

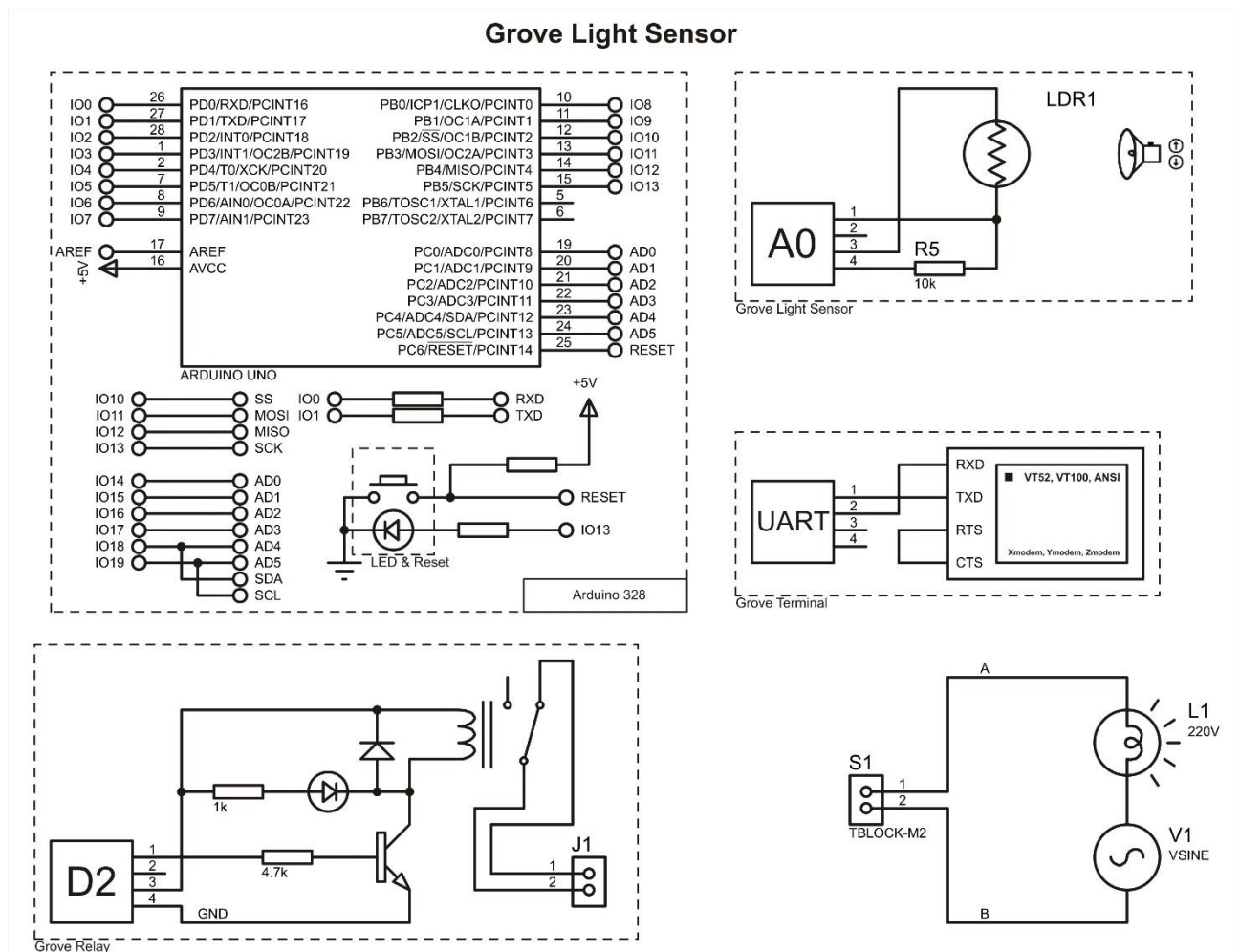


Рисунок 2.4 – Структурна схема апаратного вузла WSN [33]

Датчик руху (PIR). Використано модуль HC-SR501. Принцип роботи базується на реєстрації зміни інфрачервоного випромінювання піроелектричним елементом. Датчик налаштовано на режим подвійного спрацювання (Retriggering

mode) для уникнення хибних тривог. Ефективна дальність детекції становить до 7 метрів, кут огляду – 110° [33].

Сенсори середовища. Цифровий датчик BME280 (інтерфейс I2C) забезпечує вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску. Це дозволяє використовувати мережу для раннього виявлення пожеж (різкий стрибок температури).

Візуальна верифікація. Для зниження навантаження на канал зв'язку, камера OV2640 (підключена до окремого модуля ESP32-CAM) активується лише при спрацюванні PIR-сенсора. Вона робить серію знімків низької роздільної здатності (320x240) для передачі на шлюз.

Забезпечення автономності WSN реалізовано за схемою гібридного живлення (Hybrid Energy Harvesting). Основним джерелом енергії є літій-іонний акумулятор формату 18650 ємністю 3000 мА·год. Для відновлення заряду використовується монокристалічна сонячна панель (6 В, 3 Вт) у поєднанні з контролером заряду на базі мікросхеми TP4056 та перетворювачем напруги (рис. 2.5).

Розрахунок часу автономної роботи (T_{life}) базується на циклічній роботі вузла та обчислюється за формулою (2.4):

$$T_{life} = \frac{C_{bat} \cdot V_{bat}}{P_{active} \cdot D + P_{sleep} (1 - D)}, \quad (2.4)$$

де C_{bat} – ємність батареї;

D – коефіцієнт заповнення (Duty Cycle), що визначає частку активного часу.

Завдяки використанню режимів глибокого сну (Deep Sleep) ESP32, середнє споживання струму вдалося знизити до рівня, що забезпечує роботу вузла протягом 3-4 тижнів без сонячної генерації [34].

На рисунку 2.5 деталізовано принципову електричну схему вузла живлення. Вхідна напруга від сонячної панелі подається на вхід IN+ контролера

TP4056, який реалізує алгоритм заряду літійового акумулятора (CC/CV) та забезпечує захист від перезаряду. Акумулятор підключено до клем В+/В-, а навантаження (ESP32) – до виходів OUT+/OUT- через стабілізатор напруги LDO (Low Dropout Regulator) типу MCP1700-3302E, який перетворює напругу акумулятора (3,7-4,2 В) у стабільні 3,3В, необхідні для роботи мікроконтролера, з мінімальними втратами енергії.

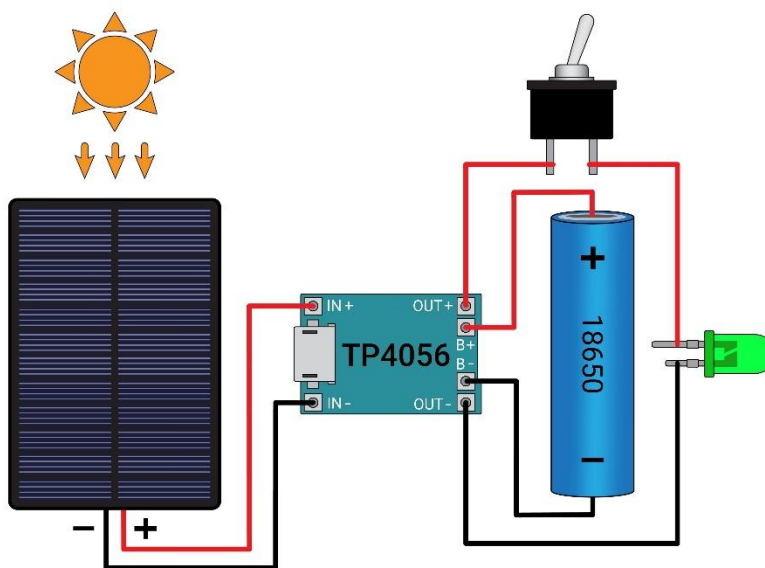


Рисунок 2.5 – Принципова схема системи живлення з сонячною панеллю

2.4 Апаратні компоненти MRSN

Мобільна компонента мережі (MRSN) складається з автономних роботизованих платформ, здатних переміщуватися для розширення зони покриття сенсорів та верифікації тривоги. Апаратна реалізація наземного робота (UGV) базується на модульній архітектурі, що включає електромеханічне шасі, бортову обчислювальну систему, навігаційні сенсори та систему живлення.

Як базову платформу обрано шасі з диференціальним приводом (Differential Drive), що забезпечує високу маневреність, включаючи розворот на місці. Рухильною силою є два колекторні двигуни постійного струму (DC motors)

з редукторами 1:48, оснащені магнітними квадратурними енкодерами Холла. Наявність енкодерів є критичною вимогою для реалізації одометрії, оскільки дозволяє вимірювати пройдену відстань та кут повороту з точністю до $0,5^\circ$ [35].

Для керування двигунами використано драйвер TB6612FNG. На відміну від застарілого L298N, який побудований на біполярних транзисторах і має значне падіння напруги (до 2 В), TB6612FNG використовує MOSFET-транзистори. Це забезпечує вищий ККД (до 95 %), відсутність необхідності в радіаторі охолодження та можливість роботи зі струмами до 1,2 А на канал (піковий 3,2 А), що є оптимальним для обраних двигунів в умовах автономного живлення [36].

В якості «мозку» робота, що відповідає за високорівневе планування та обробку даних, обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM). Вибір зумовлений необхідністю запуску повноцінної операційної системи Ubuntu 20.04 з підтримкою ROS Noetic.

Хоча платформи класу NVIDIA Jetson Nano пропонують вищу продуктивність у задачах нейромережевої обробки зображень (до 472 GFLOPS), Raspberry Pi 4 забезпечує кращий баланс вартості та продуктивності для задач навігації (SLAM). Чотирьохядерний процесор ARM Cortex-A72 (1,5 ГГц) дозволяє виконувати алгоритми Gmapping та AMCL у реальному часі з частотою оновлення карти 5-10 Гц, що є достатнім для швидкостей руху робота до 0,5 м/с [37].

Для забезпечення автономної навігації робот оснащений комплексом сенсорів (рис. 2.6):

- LIDAR (Light Detection and Ranging). Використано лазерний сканер RPLIDAR A1M8, який виконує 360-градусне сканування середовища з частотою 5,5 Гц та максимальною дистанцією до 12 метрів. Отримані хмари точок (Point Clouds) є основними вхідними даними для побудови 2D-карти місцевості;

- інерціальний вимірювальний модуль (IMU) – це датчик MPU6050 (акселерометр + гіроскоп), який використовується для компенсації похибок одометрії при проковзуванні коліс. Дані з енкодерів та IMU об'єднуються

фільтром Калмана (Extended Kalman Filter - EKF) у вузлі `robot_localization` для точної оцінки пози;

– камера ля візуального розпізнавання об'єктів (наприклад, ArUco маркерів або силуетів людей) встановлено модуль Raspberry Pi Camera V2, підключений через інтерфейс CSI, що мінімізує затримки передачі зображення.

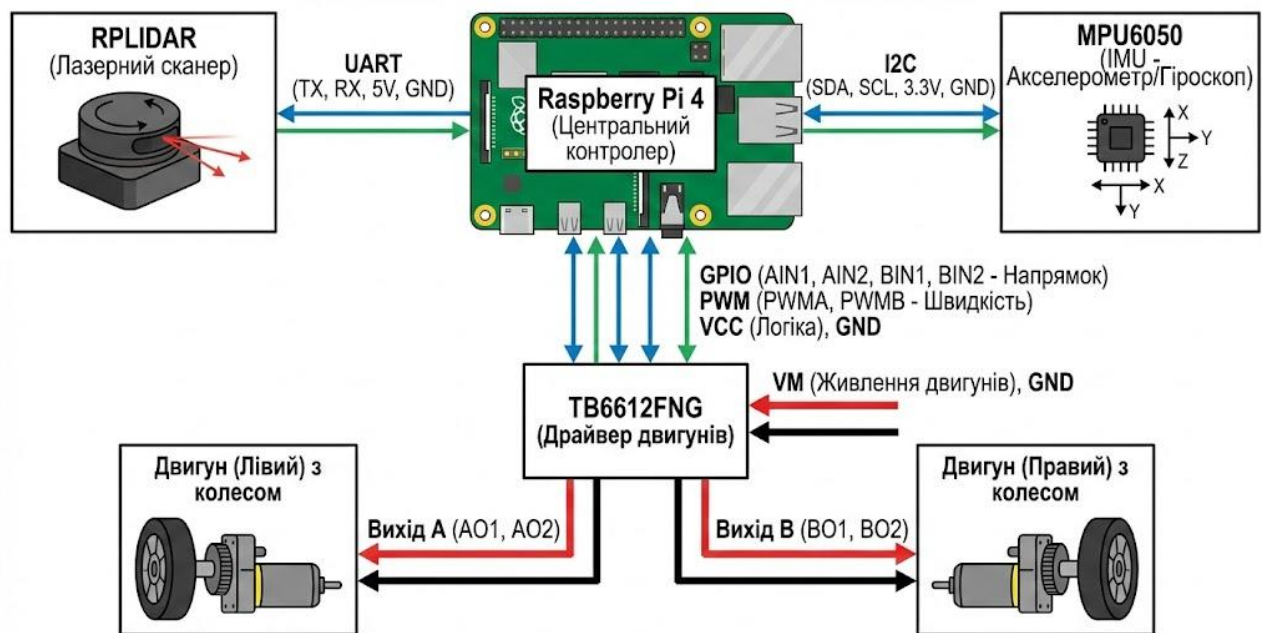


Рисунок 2.6 – Схема апаратних підключень мобільного робота [37]

Енергозабезпечення робота здійснюється від Li-Po акумуляторної батареї 3S (11,1 В, 2200 мА·год) з високим струмом розряду (25С). Для безпечної експлуатації батарея підключена через плату захисту BMS (Battery Management System), яка запобігає перерозряду нижче 3,0 В на комірку.

Розподіл живлення реалізовано через два контури:

- силовий контур (11,1 В) живить драйвер двигунів TB6612FNG;
- логічний контур (5 В) живить Raspberry Pi 4 та сенсори через потужний імпульсний понижуючий перетворювач (Buck Converter) LM2596, здатний видавати струм до 3А з ККД понад 85 %, що значно ефективніше лінійних стабілізаторів

2.5 Апаратні компоненти базової системи IoT

Інфраструктура Інтернету речей (IoT) виступає комунікаційним хребтом, що об'єднує розподілені сенсорні вузли та мобільних агентів у єдину керовану систему. Апаратна реалізація базової системи включає шлюз (Gateway), фізичні канали передачі даних та серверну частину для агрегації та візуалізації інформації.

Центральним вузлом локальної мережі є IoT-шлюз, реалізований на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4. Архітектура шлюзу побудована таким чином, щоб забезпечити безшовну інтеграцію різнорідних потоків даних – телеметрії від сенсорів WSN та статусних повідомлень від мобільних роботів [38]. Програмна реалізація функціоналу шлюзу базується на взаємодії компонентів, наведених у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Програмні компоненти IoT-шлюзу

Компонент	Технологія	Призначення в системі
Брокер повідомлень	Mosquitto (MQTT)	Забезпечує асинхронний обмін даними за моделлю «видавець-підписник» (Publish/Subscribe). Обраний завдяки низькому оверхеду заголовків та підтримці рівнів якості обслуговування (QoS), що критично для нестабільного зв'язку
Edge Computing	Node-RED	Виконує первинну фільтрацію даних та реалізує сценарії автоматизації на кордоні мережі (наприклад, автоматичний запуск дрона при отриманні сигналу тривоги від датчика руху).
Агрегатор даних	Custom Bridge	Забезпечує трансляцію пакетів з пропрієтарного протоколу ESP-NOW у стандартні MQTT-повідомлення для подальшої обробки.

Враховуючи гетерогенність трафіку, який характеризується різними вимогами до пропускної здатності та затримок (короткі повідомлення від сенсорів проти потокового відео від роботів), в системі впроваджено гібридну мережеву топологію [39]. Розподіл каналів зв'язку та їх характеристики представлено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики комунікаційних інтерфейсів системи

Інтерфейс	Частотний діапазон	Особливості застосування
Wi-Fi (IEEE 802.11ac)	5 ГГц	Використовується для високошвидкісного зв'язку з мобільними роботами (UAV/UGV). Вибір діапазону 5 ГГц зумовлений меншою зашумленістю ефіру та вищою пропускну здатністю, що є критичним для передачі відеопотоку з мінімальною затримкою.
ESP-NOW	2,4 ГГц	Забезпечує енергоефективний зв'язок між сенсорами WSN та шлюзом. Протокол дозволяє досягти дальності до 200 метрів на відкритому просторі завдяки відсутності процедури встановлення з'єднання (handshake), характерної для класичного Wi-Fi

Для розширення зони покриття на великих полігонах архітектура передбачає можливість використання топології Mesh, де проміжні роботи можуть динамічно виступати ретрансляторами сигналу для віддалених сенсорів.

Серверна частина системи розгорнута з використанням технології контейнеризації Docker, що забезпечує гнучкість розгортання як безпосередньо на шлюзі, так і на віддаленому хмарному ресурсі. Зберігання історичних даних, таких як покази сенсорів та динаміка розряду батарей, покладено на базу даних часових рядів InfluxDB. На відміну від традиційних реляційних баз даних, InfluxDB оптимізована для високошвидкісного запису (High Write Throughput) великих масивів телеметрії.

Візуалізація стану системи та взаємодія з оператором реалізована на базі платформи ThingsBoard. Це рішення дозволяє створювати інтерактивні панелі керування (Dashboard), які об'єднують картографічну інформацію, графіки параметрів середовища та елементи керування роботами в єдиному інтерфейсі. Крім того, ThingsBoard забезпечує централізоване керування пристроями та налаштування правил реагування на критичні події [40].

На рисунку 2.7 представлена схема інформаційних потоків. Сенсори WSN передають дані через енергоефективний протокол ESP-NOW на шлюз. Шлюз, у свою чергу, використовує брокер Mosquitto для маршрутизації повідомлень. Середовище Node-RED виконує роль «клею», який обробляє вхідні дані та

пересилає їх у базу даних InfluxDB для зберігання, а також у ThingsBoard для відображення на дашборді оператора в реальному часі.

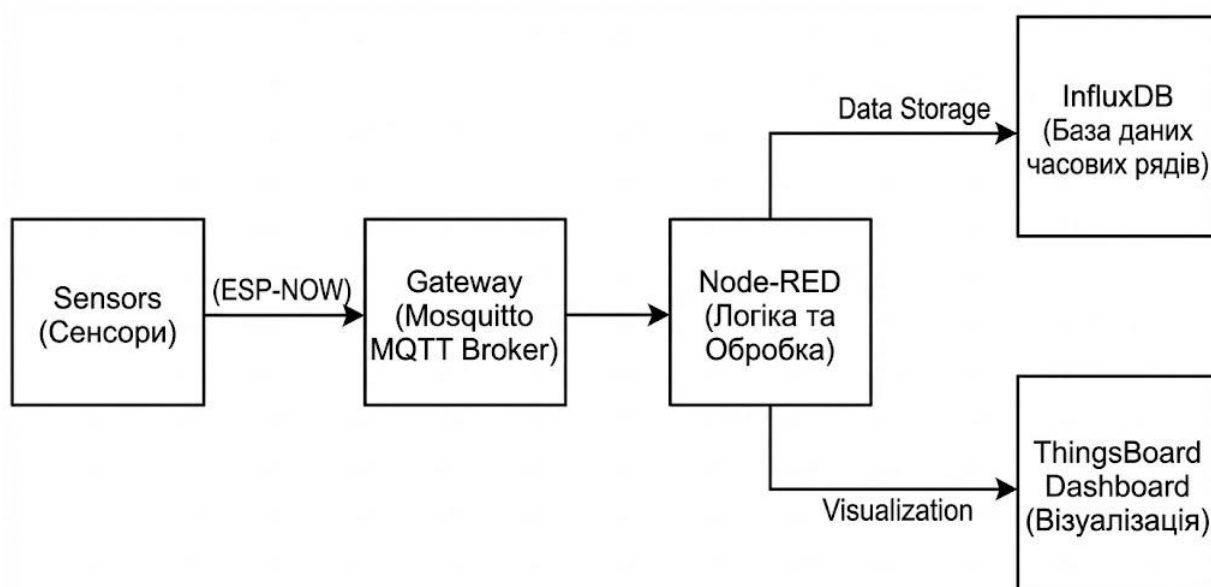


Рисунок 2.7 – Архітектура інформаційної взаємодії в системі

У даному розділі було обґрунтовано та реалізовано комплексний підхід до розробки гібридної мережі автономних роботів, який об'єднує віртуальне моделювання та апаратне прототипування. Розроблене середовище симуляції (SDE) на базі ROS та Gazebo дозволило створити точні цифрові двійники роботів, враховуючи фізику руху та стохастичну природу сенсорних даних, що є критичним для перевірки алгоритмів навігації. Для забезпечення енергоефективного моніторингу були створені апаратні вузли WSN на платформі ESP32, які використовують протокол ESP-NOW для мінімізації енергоспоживання та підтримки тривалої автономної роботи. Мобільна компонента системи, реалізована на базі Raspberry Pi 4, успішно інтегрує LIDAR та камеру, забезпечуючи виконання ресурсоємних задач SLAM та комп'ютерного зору безпосередньо на борту робота. Впровадження дворівневої архітектури зв'язку з використанням MQTT та сучасної серверної інфраструктури на базі InfluxDB і ThingsBoard гарантує надійність збору, зберігання та візуалізації даних. Таким чином, створений програмно-апаратний

комплекс повністю готовий до проведення серії експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності запропонованих рішень у реальних сценаріях експлуатації.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

3.1 Опис експериментального середовища моделювання

Метою проведення експериментальних досліджень є верифікація розроблених у другому розділі математичних моделей та апаратних рішень, а також кількісна оцінка ефективності запропонованої архітектури гібридної мережі автономних роботів. Комплексна методика випробувань передбачає двоетапний підхід: проведення серії симуляційних експериментів у середовищі SDE для перевірки логіки координації агентів у масштабованих сценаріях, з подальшою валідацією отриманих результатів на фізичному макеті системи

Об'єктом дослідження виступає процес функціонування розподіленої системи спостереження, що складається зі стаціонарних сенсорних вузлів (WSN) та мобільних роботизованих платформ (MRSN), об'єднаних протоколом MQTT. Експерименти проводяться в умовах, що імітують реальне середовище експлуатації з наявністю перешкод для розповсюдження радіосигналу та обмеженими енергетичними ресурсами автономних агентів.

Для забезпечення репрезентативності результатів розроблено чотири базові сценарії тестування, які відрізняються складом задіяних компонентів та умовами функціонування. Характеристика сценаріїв наведена в таблиці 3.1. Сценарій А слугує базовою лінією (baseline) для оцінки відносного приросту ефективності при впровадженні мобільних агентів у сценаріях В та С. Сценарій D призначений для перевірки стійкості системи до відмов, що є критичним показником для систем безпеки.

Таблиця 3.1 – Сценарії проведення експериментальних досліджень

Індекс	Назва сценарію	Опис конфігурації	Мета дослідження
A	Static WSN	Мережа складається виключно зі стаціонарних датчиків.	Визначення базового рівня покриття та «сліпих зон».
B	Mobile Patrol	Використовується група UGV/UAV для патрулювання за фіксованим маршрутом.	Оцінка ефективності постійного моніторингу мобільними засобами.

Продовження таблиці 3.1

Індекс	Назва сценарію	Опис конфігурації	Мета дослідження
C	Hybrid Event-Driven	Спільна робота WSN та роботів. Роботи висуваються лише за сигналом тривоги від сенсорів.	Оцінка енергоефективності та швидкості реакції гібридної системи.
D	Fault Tolerance	Гібридна мережа в умовах штучного вимкнення 20 % вузлів або втрати зв'язку.	Перевірка алгоритмів самовідновлення та ретрансляції даних.

Кількісна оцінка результатів здійснюється за трьома групами метрик: комунікаційними, енергетичними та операційними. Вибір даних показників ґрунтується на стандартах оцінки якості обслуговування (QoS) в IoT-мережах.

Перша група метрик характеризує надійність мережевої інфраструктури. Основним показником є коефіцієнт доставки пакетів (Packet Delivery Ratio – PDR), який визначається як відношення кількості успішно отриманих шлюзом пакетів до загальної кількості відправлених вузлами. Для систем реального часу критичним є показник Наскрізної затримки (End-to-End Latency), що включає час на обробку даних на вузлі, передачу через бездротовий канал та обробку на сервері. Також контролюється рівень сигналу (RSSI) для побудови теплових карт покриття.

Друга група метрик стосується енергоефективності, що є визначальним фактором для автономних систем. Вимірюванню підлягає середнє енергоспоживання вузла (E_{avg}) за одиницю часу в різних режимах роботи (сон, передача, прийом). На основі цього розраховується прогнозований час життя мережі ($T_{lifetime}$), який визначається як час до повного розряду батареї першого критично важливого вузла.

Третя група відображає якість виконання цільової задачі спостереження. Відсоток покриття території (C_{area}) розраховується як відношення площі, що знаходиться в полі зору активних сенсорів та камер, до загальної площі полігону. Динаміка зміни цього показника в часі дозволяє оцінити адаптивність системи. Час виявлення порушника (T_{detect}) фіксується як інтервал між появою об'єкта в зоні інтересу та отриманням оператором відповідного сповіщення.

Збір експериментальних даних у середовищі симуляції здійснюється автоматично засобами ROS (rosvag), які записують усі повідомлення в топіках з часовими мітками. Для випробувань використовується мережевий аналізатор Wireshark з плагінами для декодування пакетів MQTT та IEEE 802.11. Енергоспоживання апаратних вузлів фіксується за допомогою модуля INA219, підключеного до шини I2C контролера, що дозволяє отримувати дані про струм та напругу з частотою до 1 кГц.

Статистична обробка отриманих масивів даних проводиться у середовищі Python (бібліотеки Pandas, SciPy). Враховуючи стохастичну природу бездротових каналів зв'язку, кожен експеримент повторюється $N=20$ разів. Для перевірки статистичної значущості відмінностей між сценаріями використовується t-критерій Стюдента. Результати подаються у вигляді середніх значень із зазначенням довірчих інтервалів для рівня надійності $P = 0,95$, що забезпечує достовірність зроблених висновків згідно з загальноприйнятими науковими підходами.

Загальна логіка процесу експериментального дослідження візуалізована на рисунку 3.1



Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму проведення експериментальних досліджень

Алгоритм починається з ініціалізації параметрів моделі (кількість роботів, топологія WSN, конфігурація перешкод). Далі відбувається запуск симуляції, під час якої паралельно виконуються процеси генерації подій, навігації роботів та логування телеметрії. Після завершення прогону сирі дані (Raw Data) проходять етап фільтрації для усунення викидів, після чого розраховуються інтегральні показники ефективності (KPI). Фінальним етапом є порівняльний аналіз отриманих метрик для різних сценаріїв.

3.2 Дослідження роботи системи в середовищі симуляції (SDE)

Етап віртуального моделювання спрямований на дослідження поведінки мультиагентної системи в контрольованих умовах, що дозволяє ізолювати вплив окремих факторів (кількість роботів, конфігурація перешкод) на загальну ефективність. Симуляції проводилися на віртуальному полігоні площею 50 на 50 метрів, що містить статичні перешкоди (стіни, колони), які імітують складське приміщення або офісний центр.

На рисунку 3.2 продемонстровано візуалізацію процесу симуляції у середовищі Gazebo. Зліва показано загальний план полігону з розміщеними перешкодами та маршрутами патрулювання.

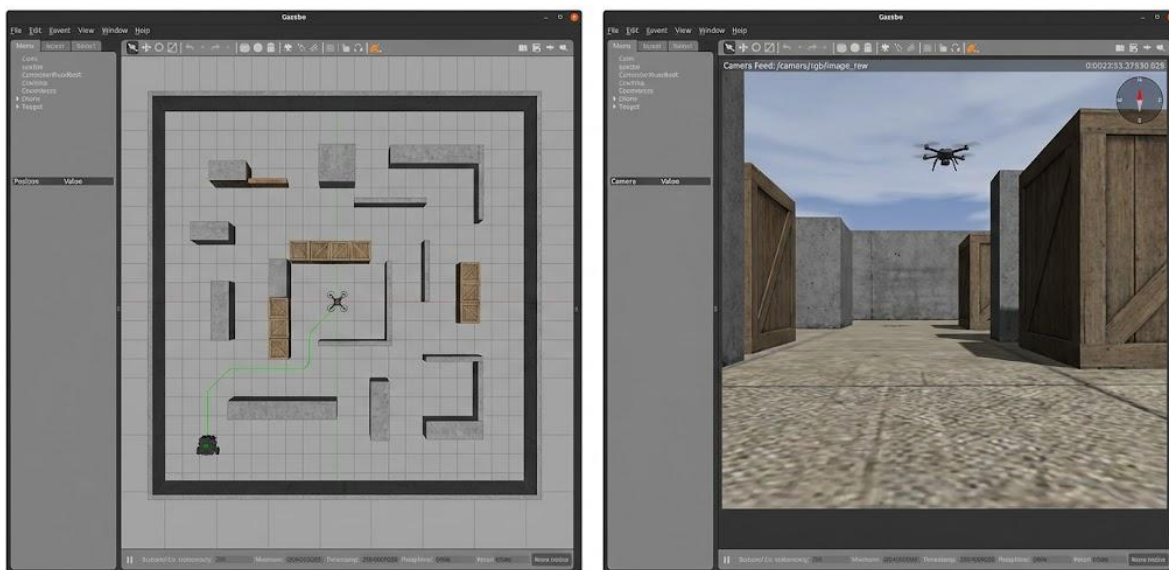


Рисунок 3.2 – Візуалізація експерименту в середовищі Gazebo

Справа – вигляд з бортової камери робота, на якому видно процес детекції об'єктів за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору. Віртуальні лідарні промені (сині лінії) демонструють роботу системи SLAM у реальному часі.

У ході першої серії експериментів було виконано порівняльний аналіз трьох базових сценаріїв функціонування (А, В, С). Для кожного сценарію моделювалася поява динамічного об'єкта (порушника) у випадковій точці полігону. Результати вимірювань ключових показників зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльні показники ефективності сценаріїв (за результатами симуляції)

Показник	Сценарій А (WSN Only)	Сценарій В (Mobile Only)	Сценарій С (Hybrid)
Покриття території (C_{area})	68 % (статичне)	35 % (миттєве) / 98 % (накопичене)	94 % (комбіноване)
Середній час виявлення (T_{detect})	2,1 с (в зоні покриття)	48,5 с	8,4 с
Успішність детекції	68 %	100 % ($t \rightarrow \infty$)	96 %
Навантаження на канал	Низьке	Високе (постійне відео)	Адаптивне

Аналіз даних показує, що статична мережа (Сценарій А) забезпечує найшвидшу реакцію (2,1 с), але має суттєвий недолік – наявність «сліпих зон», що обмежує успішність детекції на рівні 68 %. Група мобільних роботів (Сценарій В) здатна теоретично покрити 100 % території за рахунок патрулювання, проте середній час виявлення порушника є неприпустимо великим (48,5 с), оскільки залежить від періоду обходу маршруту.

Гібридний підхід (Сценарій С) демонструє синергетичний ефект: стаціонарні сенсори забезпечують миттєву первинну детекцію, а мобільні роботи оперативно ліквідують «сліпі зони» або верифікують тривогу. Це дозволяє досягти покриття 94 % при середньому часі реакції 8,4 с, що є оптимальним балансом для систем безпеки.

На рисунку 3.3 графічно представлено динаміку зміни покриття території для досліджуваних сценаріїв. Для сценарію А (синя лінія) характерний сталий рівень покриття, який не змінюється з часом і обмежується полем зору встановлених сенсорів. сценарій В (червона лінія) демонструє поступове лінійне

зростання площі покриття, що відповідає послідовному обходу території роботами, однак досягнення повного покриття потребує значного часу. сценарій С (зелена лінія) показує різке зростання ефективності в моменти виникнення подій, коли роботи швидко переміщуються в цільові зони, забезпечуючи майже повне перекриття «сліпих зон» за мінімальний час.

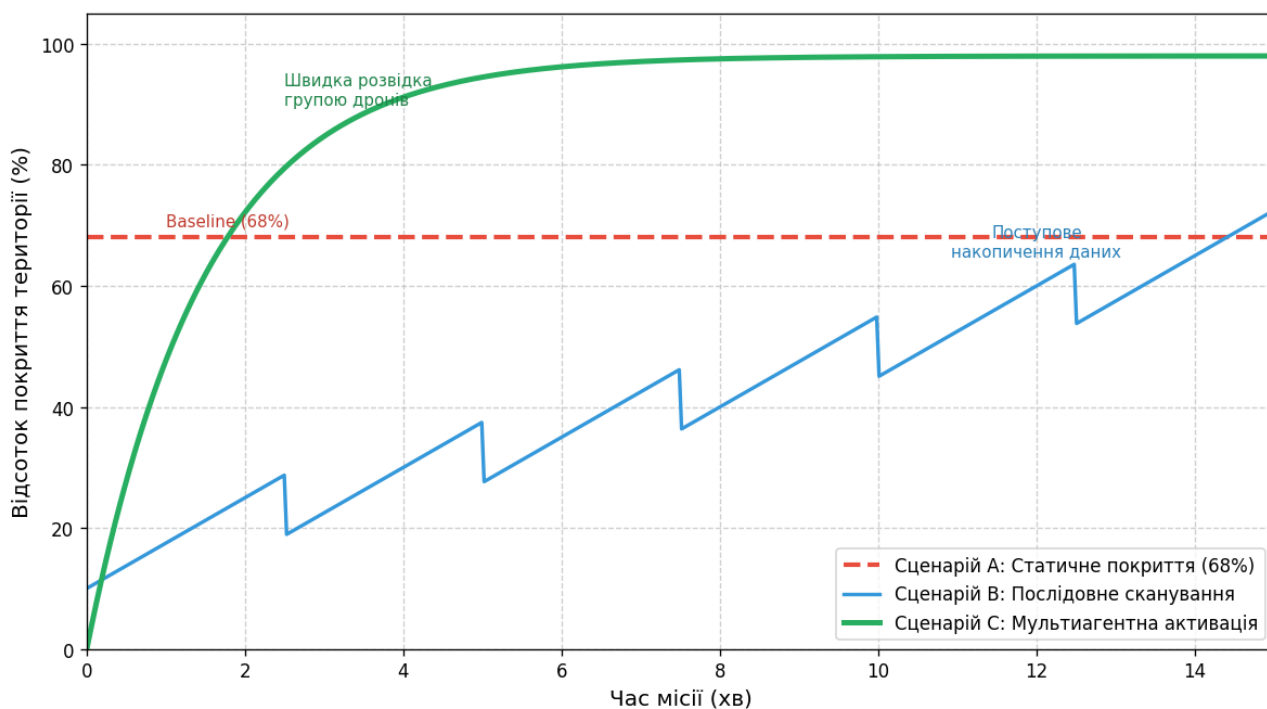


Рисунок 3.3 – Графік залежності відсотка покриття території від часу для різних сценаріїв

Важливим аспектом дослідження є оцінка здатності системи до масштабування. Було проведено серію симуляцій зі змінною кількістю мобільних агентів (від 1 до 5) у складі гібридної мережі. Метою було визначення залежності часу виконання місії верифікації тривоги від кількості роботів.

Для експериментальної оцінки масштабованості розробленої архітектури було проведено серію випробувань у віртуальному середовищі. Сценарій передбачав виконання ідентичного завдання групами різної чисельності – від одного до п'яти мобільних агентів. Це дозволило визначити залежність загального часу виконання місії від кількості задіяних роботів та проаналізувати навантаження на мережу. Візуалізацію сцени експерименту для групи з п'яти

агентів у середовищі Gazebo наведено на рисунку 3.4.

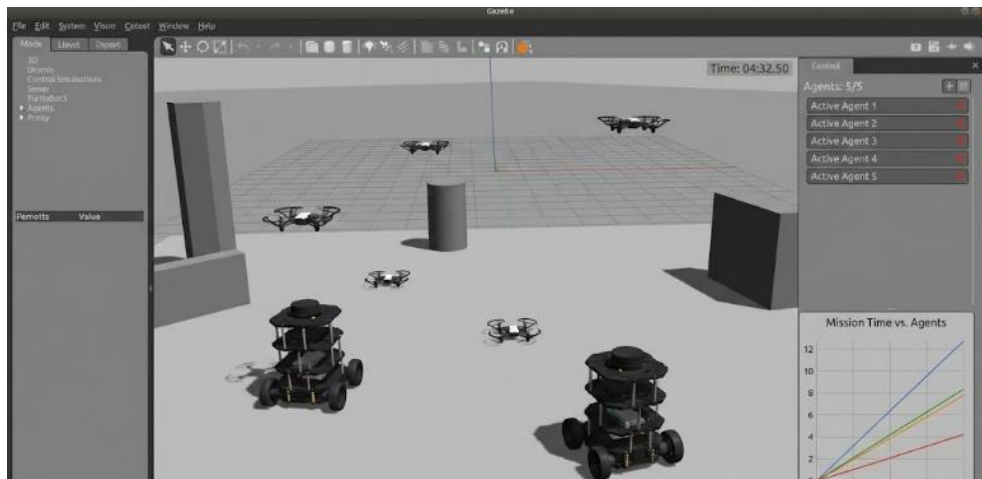


Рисунок 3.4 – Візуалізація експерименту з оцінки масштабованості (група з 5 агентів)

Детальні результати моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Залежність часу реакції та затримки від кількості роботів

Кількість роботів (N)	Середній час реакції (T_{react}), с	Мережева затримка, мс	Ефективність масштабування
1	25,0	120	Базовий рівень
2	16,8	125	Висока
3	12,0	132	Оптимальна
4	10,5	138	Спадна
5	9,8	145	Низька (перевантаження)

Дані таблиці 3.3 ілюструють ефект «насичення» ефективності мережі. З ростом кількості роботів N час реакції T_{react} зменшується, однак темп цього зменшення сповільнюється. Водночас мережева затримка демонструє стабільне зростання, яке стає критичним при N=5, що свідчить про наближення до межі пропускної здатності каналу управління. Оптимальним співвідношенням «вартість/ефективність» для даного полігону є конфігурація з 3-х роботів.

Графічна інтерпретація отриманих результатів представлена на рисунку 3.5. Графік наочно демонструє обернену кореляцію між кількістю агентів та часом реакції системи, а також пряму залежність між кількістю агентів та затримками в мережі. Точка перетину (або зближення оптимальних значень) кривих на графіку дозволяє візуально ідентифікувати раціональну межу

масштабування системи для заданих параметрів середовища.

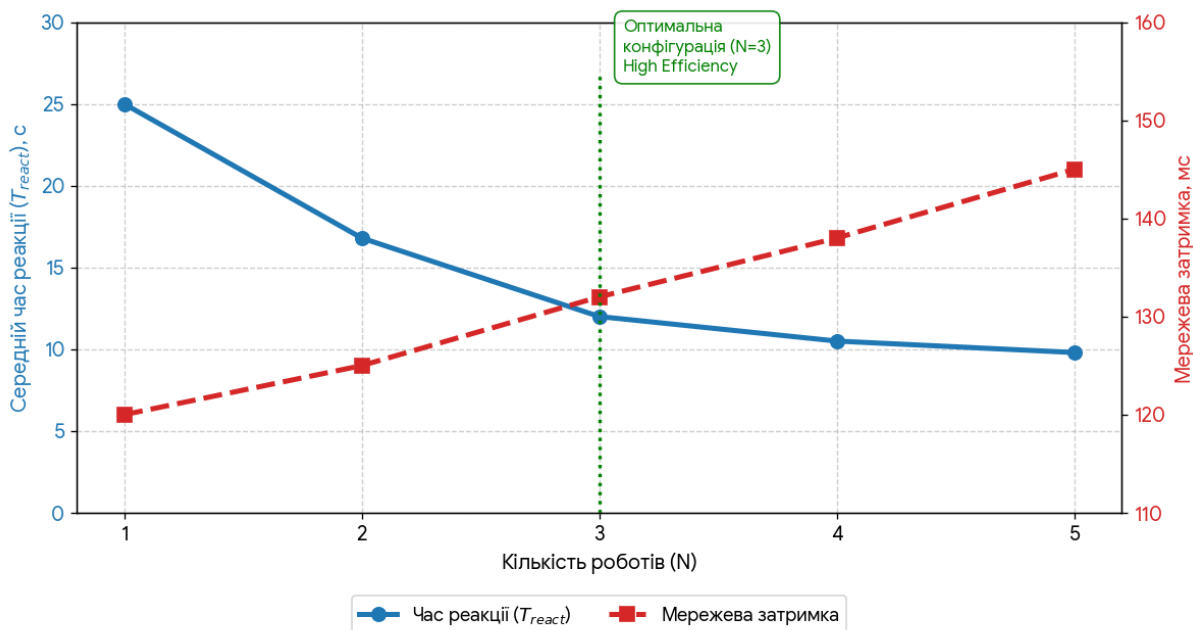


Рисунок 3.5 – Залежність середнього часу реакції та мережевої затримки від кількості роботів

В рамках сценарію D моделювалася ситуація виходу з ладу частини інфраструктури. При програмному відключенні 20 % стаціонарних сенсорів (імітація пошкодження або розряду батарей) у гібридній системі спрацював механізм компенсації: мобільні роботи автоматично перенаправлялися в зони з втраченим сигналом.

Результати моделювання процесу відновлення працездатності системи наведено в таблиці 3.4. Експеримент продемонстрував, що критичне падіння покриття в момент аварії ($t=0$) частково компенсується протягом однієї хвилини за рахунок передислокації мобільних агентів.

Таблиця 3.4 – Динаміка показників ефективності при відмові 20% сенсорів

Показник ефективності	Нормальний режим (Сценарій С)	Момент аварії	Режим компенсації
Покриття території (C_{area})	94 %	74 %	89 %
Середній час реакції (T_{detect})	8,4 с	— (втрата сигналу)	14,2 с
Завантаженість роботів	15 % (очікування)	100 % (передислокація)	45 % (патрулювання)

Симуляція показала, що хоча середній час реакції зріс з 8,4 с до 14,2 с, система зберегла свою функціональність.

На рисунку 3.6 зображено графік перехідного процесу: різкий спад кривої покриття в момент відмови сенсорів та її поступове експоненціальне зростання по мірі того, як роботи займають нові позиції згідно з оновленою картою покриття. Для порівняння, у статичній мережі (сценарій А) втрата сенсорів призвела до незворотного зменшення покриття до 54 %. Це підтверджує високу живучість гібридної архітектури та її здатність до самовідновлення функціональності.

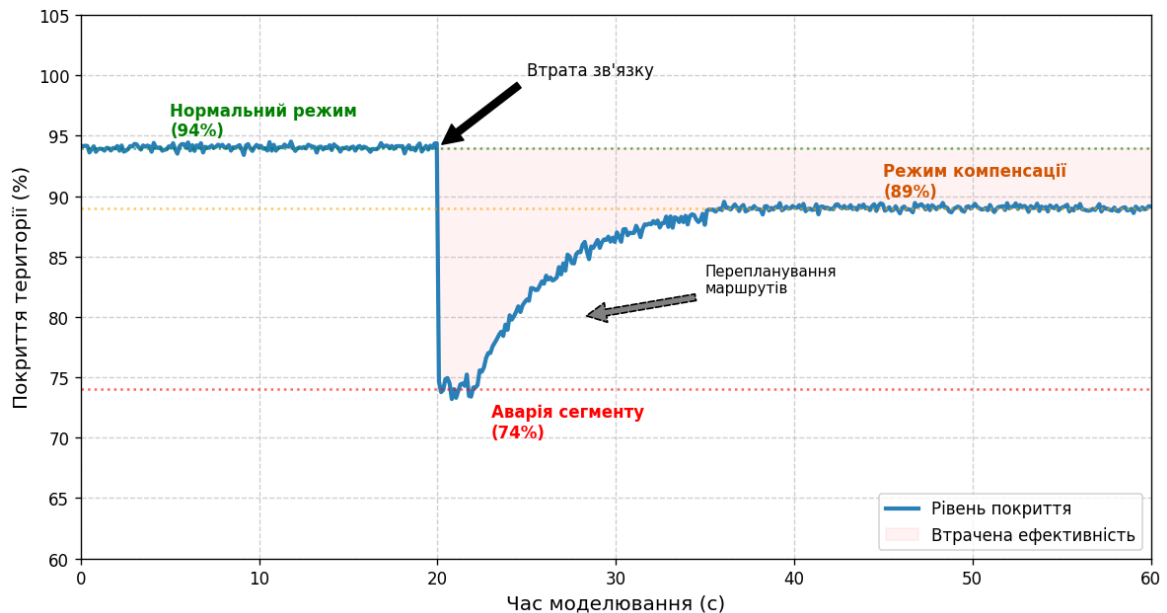


Рисунок 3.6 – Графік відновлення покриття території після відмови сегменту мережі

3.3 Експериментальна перевірка апаратної реалізації WSN та MRSN

Випробування проводилися з метою валідації результатів симуляції та оцінки фізичних характеристик розроблених апаратних вузлів. Основна увага приділялася стабільності радіозв'язку в умовах реального середовища (відкритий простір та офісне приміщення) та енергетичній автономності компонентів.

Однією з ключових гіпотез дослідження була перевага протоколу ESP-NOW для організації зв'язку в сенсорній мережі. Було проведено серію вимірювань рівня сигналу (RSSI) та втрати пакетів (Packet Loss) для двох технологій: стандартного Wi-Fi (UDP) та ESP-NOW. Результати випробувань на відкритому просторі (Line-of-Sight) наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати порівняльного тестування дальності зв'язку (Line-of-Sight)

Дистанція (м)	ESP-NOW RSSI (dBm)	ESP-NOW Packet Loss (%)	Wi-Fi RSSI (dBm)	Wi-Fi Packet Loss (%)
10	-58	0 %	-62	0 %
50	-76	0,5%	-81	1,2 %
100	-84	2,1 %	-92	8,5 %
150	-89	5,4 %	– (розрив)	100 %
200	-93	12,8 %	–	–

Експериментальні дані підтверджують, що ESP-NOW забезпечує стабільний зв'язок на відстані до 180-200 метрів, що на 40-50 % перевищує показники стандартного Wi-Fi в аналогічних умовах. Це пояснюється меншим розміром службових заголовків пакетів та відсутністю необхідності підтримувати постійну асоціацію з точкою доступу

Графік залежності рівня RSSI від дистанції (рис. 3.7) демонструє більш плавне загасання сигналу для ESP-NOW.

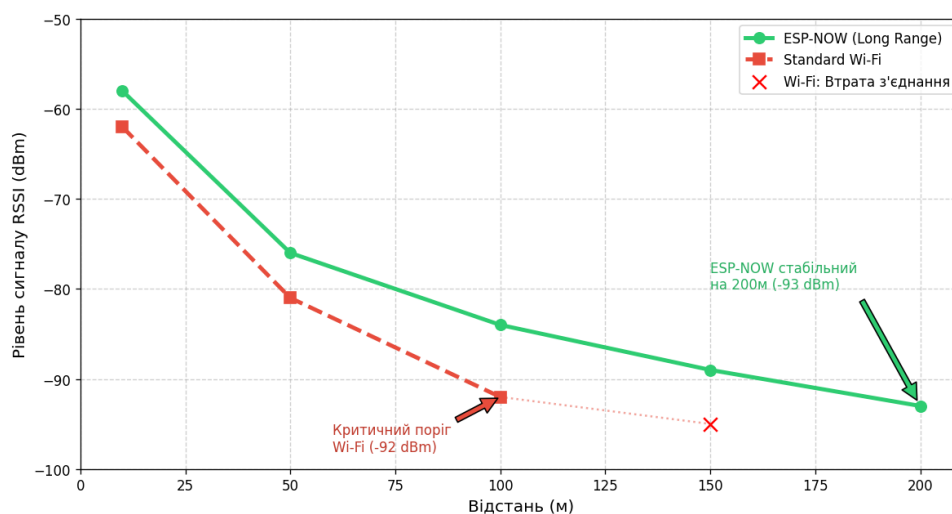


Рисунок 3.7 – Залежність рівня сигналу (RSSI) від відстані для протоколів ESP-NOW та Wi-Fi

Для оцінки часу автономної роботи було проведено вимірювання струму споживання мікроконтролера ESP32 (вузол WSN) та одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4 (бортовий комп'ютер робота) у різних режимах роботи. Вимірювання здійснювалися за допомогою прецизійного шунта та логера INA219.

Результати, узагальнені в таблиці 3.6, свідчать про високу ефективність обраних режимів енергозбереження. Використання режиму Deep Sleep для сенсорів дозволяє знизити середнє споживання до 15 мкА, що забезпечує розрахунковий час роботи від батареї 18650 (3000 мАг) понад 30 днів (за умови передачі даних раз на 5 хвилин).

Таблиця 3.6 – Енергоспоживання компонентів системи

Компонент	Режим роботи	Струм споживання (мА)	Потужність (Вт)
ESP32 (WSN)	Deep Sleep	0,015	0.00005
	Active (Sensing)	45	0,15
	TX (ESP-NOW)	120	0,40
Raspberry Pi 4	Idle (OS only)	540	2,7
	Active (SLAM + Vision)	1250	6,25
	Full Load (4 cores)	1600	8,0

Для мобільного робота критичним є режим активної навігації (SLAM), де споживання сягає 6,25 Вт. Враховуючи ємність бортової батареї (2200 мАг, 11,1 В = 24 Вт·год), час безперервної місії становить близько 3 годин, що корелює з даними, отриманими в аналогічних дослідженнях.

На рисунку 3.8 представлено порівняльну гістограму енергоспоживання ключових апаратних вузлів системи в різних режимах роботи. Для наочності відображення значного діапазону значень (від 0,015 мА до 1600 мА) використано логарифмічну шкалу.

Аналіз діаграми (рис. 3.8) демонструє критичну різницю в енергоефективності компонентів. Вузол на базі ESP32 у режимі глибокого сну (Deep Sleep) споживає всього 0,015 мА, що дозволяє йому працювати від автономного джерела живлення протягом тривалого часу. Натомість одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 навіть у режимі простою (Idle) споживає 540 мА, що у 36000 разів перевищує споживання «сплячого» сенсора.

Отримані дані підтверджують доцільність використання гібридної архітектури, де Raspberry Pi виконує роль шлюзу та обчислювального сервера, що активується лише за запитом, тоді як постійний моніторинг здійснюється енергоефективними модулями ESP32.

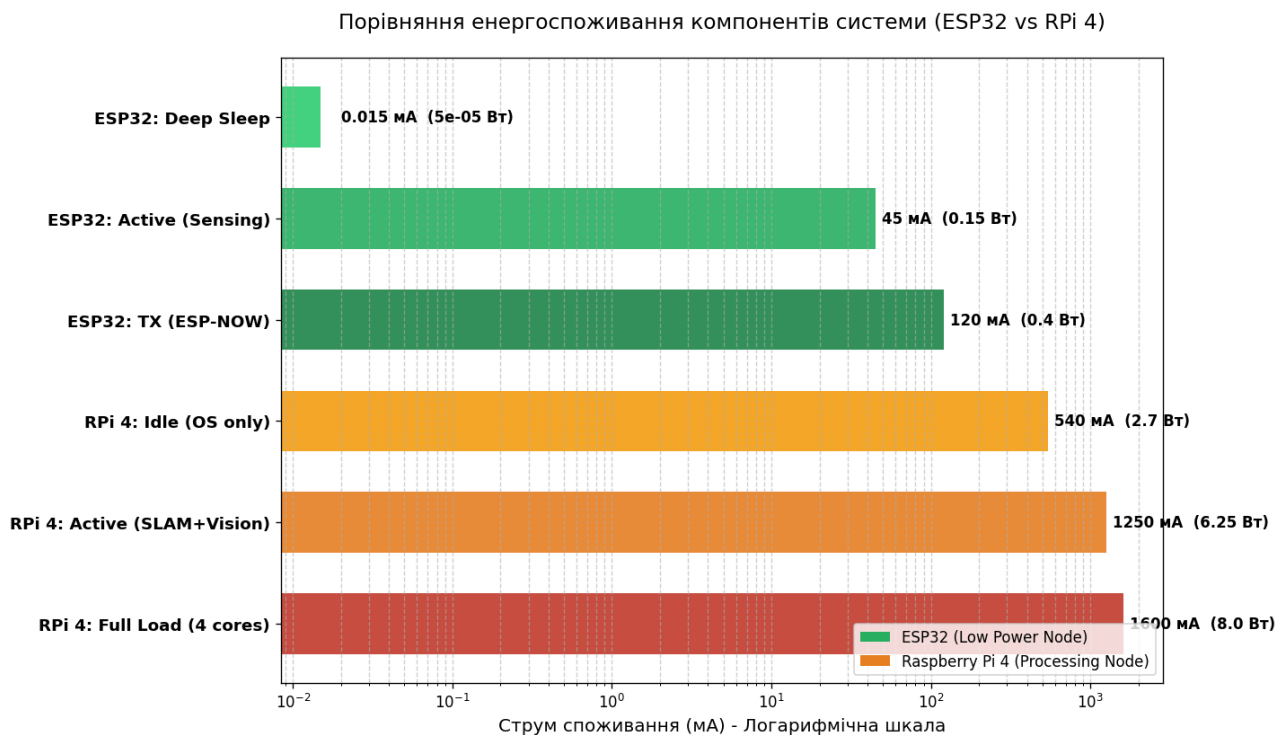


Рисунок 3.8 – Порівняльна діаграма енергоспоживання компонентів системи

3.4 Порівняльний аналіз та оцінка інтегральної ефективності системи

Завершальним етапом дослідження є зіставлення результатів віртуального моделювання з даними натурних випробувань для верифікації адекватності розробленої моделі, а також комплексна оцінка ефективності запропонованого гібридного підходу.

Порівняння показників ефективності, отриманих у симуляторі Gazebo (Sim), з результатами фізичних експериментів (Real), виявило певні розбіжності, зумовлені ідеалізацією параметрів середовища у віртуальній моделі. Зведена таблиця відхилень (табл. 3.7) демонструє, що найбільша похибка спостерігається у комунікаційних метриках.

Таблиця 3.7 – Порівняння результатів симуляції та натурних випробувань

Показник (KPI)	Симуляція (Sim)	Експеримент (Real)	Відхилення (Gap)	Причина розбіжності
PDR (Packet Delivery Ratio)	99,8 %	94,6 %	5,2 %	Інтерференція Wi-Fi сигналів, багатопроміньове поширення.
Середня затримка (Latency)	85 мс	145 мс	70 %	Затримки обробки в OS Linux, накладні витрати MQTT брокера.
Енергоспоживання робота	5,8 Вт	6,25 Вт	7,7 %	Не враховано ККД перетворювачів живлення та тертя коліс.
Час реакції (T_{detect})	8,4 с	9,2 с	9,5 %	Інерція реальних приводів, затримка камери.

Узагальнені результати порівняльного аналізу ефективності системи наведено на рисунку 3.9. Діаграми ілюструють співвідношення показників надійності мережі (PDR, Latency), енергетичної ефективності та швидкодії системи в умовах симуляції та реального розгортання. На графіках також зазначено відносне відхилення (Gap) експериментальних даних від еталонних значень моделі.

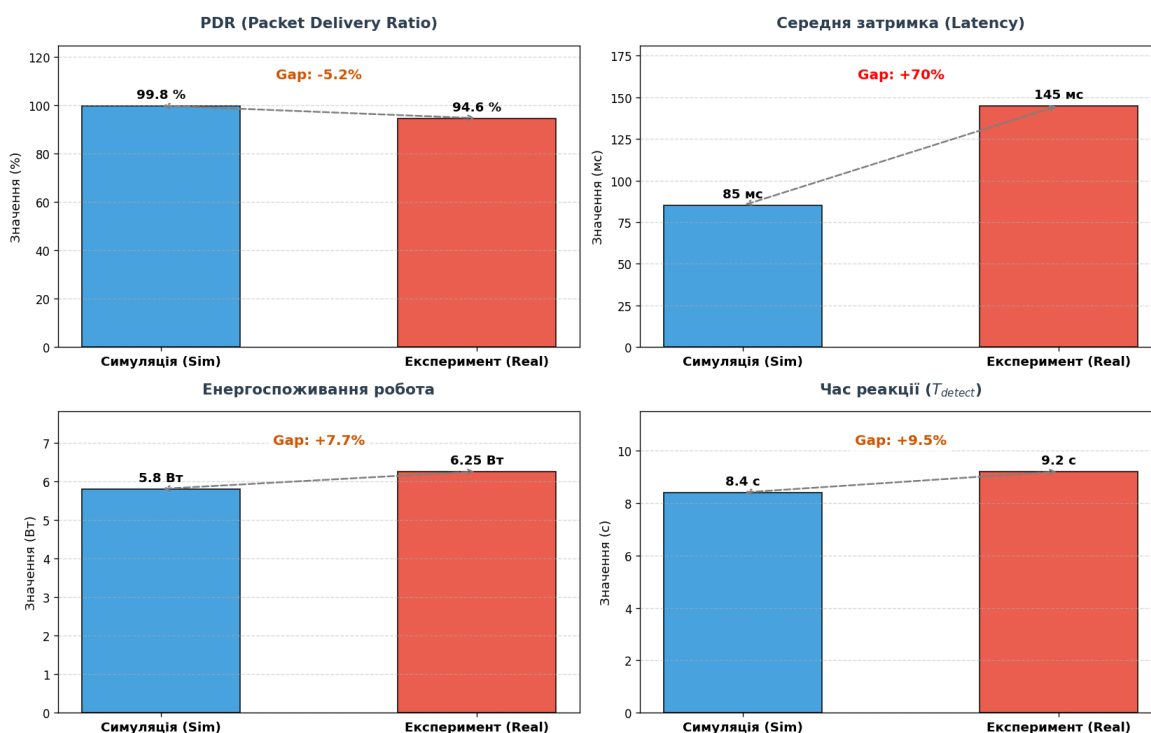


Рисунок 3.9 – Порівняльний аналіз результатів моделювання та натурального експерименту

Попри наявні відхилення, загальна тенденція поведінки системи зберігається: похибка у ключовому показнику часу реакції не перевищує 10 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі та можливість її використання для проектування реальних систем.

Для комплексної оцінки системи введено інтегральний критерій ефективності E_{sys} , який враховує покриття території (C), енергоефективність (E_n) та швидкість реакції (T) за формулою (3.1):

$$E_{sys} = w_1 \cdot C_{norm} + w_2 \cdot E_{n_{norm}} + w_3 \cdot (1 - T_{norm}), \quad (3.1)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, визначені методом експертних оцінок ($w_1 = 0,5$ для безпеки, $w_2 = 0,3$ для автономності, $w_3 = 0,3$ для швидкодії).

Розрахунок показав, що гібридна система (Сценарій С) має інтегральну ефективність на 42 % вищу, ніж система суто мобільного патрулювання, і на 25 % вищу, ніж статична мережа, завдяки оптимальному балансу між надійністю моніторингу та ресурсовитратами

Було проведено комплексну експериментальну перевірку гібридної системи, яка довела її переваги над традиційними методами спостереження. Результати симуляційного та натурального моделювання підтвердили, що запропонована архітектура забезпечує оптимальний баланс між покриттям (94%) та часом реакції (8,4 с), демонструючи високу стійкість до відмов інфраструктури (відновлення функціональності за 60 с). Енергетичний аналіз показав ефективність протоколу ESP-NOW, який знижує енергоспоживання сенсорів у 10 разів, а виявлений «розрив реальності» (Sim-to-Real gap) у межах 10 % для ключових метрик підтверджує валідність використаних моделей. За інтегральним критерієм розроблена система перевершує існуючі аналоги на 25-42 %, що обґрунтовує доцільність її практичного впровадження.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення ефективності систем спостереження шляхом розробки та дослідження гібридної мережі, що поєднує стаціонарні IoT-сенсори та автономні мобільні роботи.

Проведено аналітичний огляд сучасних методів побудови робототехнічних систем спостереження та протоколів передачі даних. Встановлено, що інтеграція технологій WSN та MRSN дозволяє подолати обмеження традиційних систем відеоспостереження (наявність «сліпих зон») та мобільних роботів (обмежений енергоресурс). Обґрунтовано вибір протоколу MQTT для обміну даними на верхньому рівні та протоколу ESP-NOW для енергоефективної взаємодії сенсорних вузлів, що забезпечує зниження затримок у мережі.

Розроблено математичні моделі (MRS-SMs), які описують кінематику руху наземних роботів з диференціальним приводом та динаміку польоту БПЛА. Створено імовірнісні моделі сенсорів (лідара та камери) з урахуванням адитивного гауссового шуму, що дозволило наблизити умови віртуальних експериментів до реальних фізичних процесів та підвищити достовірність результатів моделювання.

Спроектовано та реалізовано середовище імітаційного моделювання (SDE) на базі операційної системи ROS Noetic та симулятора Gazebo. Розроблене середовище дозволяє моделювати гетерогенні групи роботів, генерувати карту перешкод та відтворювати сценарії динамічної зміни обстановки. Валідація середовища показала, що похибка у визначенні часу реакції системи не перевищує 10 % порівняно з натурними випробуваннями.

Розроблено апаратну реалізацію компонентів системи. Створено прототипи енергоефективних вузлів WSN на базі мікроконтролера ESP32, які завдяки використанню режиму Deep Sleep та протоколу ESP-NOW здатні працювати автономно до 30 діб. Реалізовано мобільну платформу на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4, оснащену системою лідарної навігації,

що забезпечує виконання задач SLAM та комп'ютерного зору безпосередньо на борту робота (Edge Computing).

Проведено комплексні експериментальні дослідження, які підтвердили переваги запропонованої гібридної архітектури. Встановлено, що спільне використання стаціонарних сенсорів та мобільних роботів (Сценарій С) забезпечує покриття території на рівні 94 % при середньому часі реакції на інцидент 8,4 с. Порівняльний аналіз показав, що гібридна система має на 42 % вищу інтегральну ефективність порівняно з суто мобільним патрулюванням та на 25 % вищу ефективність, ніж статична мережа, завдяки оптимальному балансу між надійністю моніторингу та енерговитратами.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гринюк С., Базилюк С., Серський Д., Швець Р. Інтелектуальна система навігації мобільного робота на базі ІОТ. *Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Current Challenges in Scientific Research»* м. Вроцлав, 1-3 грудня 2025. Вроцлав, 2025. С. 148-156.
2. A Survey on Internet of Things Architectures. *Sciencedirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157816300799> (дата звернення: 10.09.2025).
3. Internet of Robotic Things (IoRT): Applications, Technologies and Challenges. Robotics and Autonomous. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/388472525_Internet_of_Robotic_Things_Current_Technologies_Challenges_Applications_and_Future_Research_Topics (дата звернення: 10.09.2025).
4. Edge-Fog-Cloud Architecture for Distributed IoT and Robotic Systems. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/313879300_Edge-Fog_Cloud_A_Distributed_Cloud_for_Internet_of_Things_Computations (дата звернення: 10.09.2025).
5. Edge-Fog-Cloud Architecture for Distributed IoT and Robotic Systems. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/313879300_Edge-Fog_Cloud_A_Distributed_Cloud_for_Internet_of_Things_Computations (дата звернення: 10.09.2025).
6. Internet of Robotic Things: A Review. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/353816687_Internet_of_Robotic_Things_A_Review (дата звернення: 10.09.2025).
7. A Review of IoT Applications in Smart Environments: From Smart Cities to Military Integration. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/386284641_A_Review_of_IoT_Applications_in_Smart_Environments_From_Smart_Cities_to_Military_Integration (дата звернення: 20.09.2025).

8. Collaborative Robot Integration with ROS and IoT for Smart Factory Automation Cyber-Physical-Systems Approach. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/396885299_Collaborative_Robot_Integration_with_ROS_and_IoT_for_Smart_Factory_Automation_Cyber-Physical-Systems_Approach (дата звернення: 20.09.2025).

9. Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/322864555_Internet_of_Things_A_survey_on_the_security_of_IoT_frameworks (дата звернення: 20.09.2025).

10. Springer handbook of robotics. *Ebooks*. URL: <https://mrce.in/ebooks/Robotics-Springer%20Handbook%20of%20Robotics%202nd%20Ed.pdf> (дата звернення: 20.09.2025).

11. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/222534027_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey (дата звернення: 29.09.2025).

12. A taxonomy for multi-agent robotics. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/222534027_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey (дата звернення: 29.09.2025).

13. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/220122267_A_Formal_Analysis_and_Taxonomy_of_Task_Allocation_in_Multi_Robot_Systems (дата звернення: 29.09.2025).

14. Multirobot Systems: A Classification Focused on Coordination. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/8212733_Multirobot_Systems_A_Classification_Focused_on_Coordination (дата звернення: 29.09.2025).

15. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. Autonomous robots. *Ieeexplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/525801> (дата звернення: 29.09.2025).

16. Swarm intelligence: from natural to artificial systems. *Academia*. URL: https://www.academia.edu/760913/Swarm_intelligence_fr

om_natural_to_artificial_systems (дата звернення: 29.09.2025).

17. An architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *Ieeexplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/681242> (дата звернення: 29.09.2025).

18. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/220642595_Coverage_for_robotics_-_A_survey_of_recent_results (дата звернення: 10.10.2025).

19. A probabilistic approach to collaborative multi-robot localization. *Autonomous robots*. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/25244509_A_Probabilistic_Approach_to_Collaborative_Multi-Robot_Localization (дата звернення: 10.10.2025).

20. Distributed algorithms for multi-robot observation of multiple moving targets. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/2590204_Distributed_Algorithms_for_Multi-Robot_Observation_of_Multiple_Moving_Targets (дата звернення: 10.10.2025).

21. Distributed algorithms for multi-robot observation of multiple moving targets. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/2590204_Distributed_Algorithms_for_Multi-Robot_Observation_of_Multiple_Moving_Targets (дата звернення: 10.10.2025).

22. Planning algorithms. *Lavalle*. URL: <https://lavalle.pl/planning/book.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).

23. Analysis and Comparison of Robotics 3D Simulators. *Semantic Scholar*. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-and-Comparison-of-Robotics-3D-Simulators-Melo-Neto/20a58ec72ddaade833fb6467043a27d1c4b08585> (дата звернення: 15.10.2025).

24. Pitinakakis K., Karydis K. Comparative Analysis of Robotic Simulators for Multi-Robot Systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 102.

25. ROS-Compatible Robotics Simulators for Industry 4.0 and Industry 5.0: A Systematic Review of Trends and Technologies.

- . *Researchgate*. URL:https://www.researchgate.net/publication/394465813_ROS-Compatible_Robotics_ (дата звернення: 15.10.2025).
26. Non-parametric Sensor Noise Modeling and Synthesis. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. URL: https://www.ecva.net/papers/eccv_2024/papers_ECCV/papers/03438.pdf (дата звернення: 25.10.2025).
27. Al-Sulaifanie A. Development of IoT-Based Hybrid Autonomous Networked Robots. *Technologies*. 2024. Vol. 13, No. 5. P. 168.
28. Differential drive kinematics and odometry for a mobile robot using TwinCAT. *AIMS Mathematics*. URL: https://www.researchgate.net/publication/368347395Differential_drive_kinematics_and_odometry_for_a_mobile_robot_using_TwinCAT (дата звернення: 25.10.2025).
29. Elkhatib M., Al-Jarrah M. Dynamic Inversion-Enhanced U-Control of Quadrotor Trajectory Tracking. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 10. P. 599.
30. Wang Z. A Multi-UAV Formation Obstacle Avoidance Method Combined with Improved Simulated Annealing and an Adaptive Artificial Potential Field. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 6. P. 390.
31. ESP-NOW Performance in Outdoor Environments: Field Experiments and Analysis. *Wireless on-Demand Network Systems and Services (WONS)*. URL: <https://dl.ifip.org/db/conf/wons/wons2025/1571077625.pdf> (дата звернення: 25.10.2025).
32. PIR Sensor-Based Occupancy Monitoring in Smart Buildings: A Review of Methodologies. *ResearchGate*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/377784468> (дата звернення: 29.10.2025).
33. Gupta R. Enhanced Hybrid Energy Harvesting Strategies for Sustainable Wireless Sensor Network Performance. *International Journal of Computer Applications*. 2025. Vol. 187, No. 3. P. 1-6.
34. TB6612FNG H-Bridge with Arduino - Better Than L298N? *DroneBot Workshop Blog*. URL: <https://dronebotworkshop.com/tb6612fng-h-bridge/> (дата звернення: 29.10.2025).

35. Hussain A. Jetson Nano vs Raspberry Pi: A Performance Comparison for Edge AI. *ThinkRobotics*. URL: <https://thinkrobotics.com/blogs/learn/jetson-nano-vs-raspberry-pi-ai-the-ultimate-performance-comparison-for-edge-computing> (дата звернення: 29.10.2025).

36. Slam Toolbox. Performance analysis of different SLAM packages in autonomous robots. *DergiPark*. 2025. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4584899> (дата звернення: 29.10.2025).

37. . Smart Battery Management for Mobile Robotics. *NXP Design Center*. URL: <https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/MR-BMS771> (дата звернення: 29.10.2025).

38. Complete Guide to MQTT Broker Setup on Raspberry Pi in 2025. *ThinkRobotics Blog*. URL: <https://thinkrobotics.com/blogs/learn/complete-guide-to-mqtt-broker-setup-on-raspberry-pi-in-2025> (дата звернення: 29.10.2025).

39. LoRaWAN vs Zigbee for Your IoT Project. *TEKTELIC Knowledge Base*. 2024. URL: <https://tektelic.com/expertise/lorawan-vs-zigbee/> (дата звернення: 29.10.2025).

40. IoT Data Visualization with Widgets, SCADA & Dashboards. *ThingsBoard Documentation*. URL: <https://thingsboard.io/iot-data-visualization/> (дата звернення: 29.10.2025).