

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

«__» червня 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньою програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

на тему: «Система виявлення дронів

на основі сенсорної мережі. Апаратна інфраструктура»

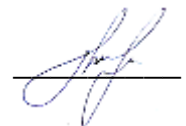
Виконав:

студент IV курсу, групи РЕ-11

Демарьов Костянтин Геннадійович



Керівник: ст. викл. Нікітчук Артем Валерійович

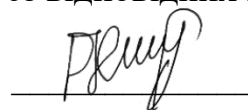


Рецензент: доц. Головін Володимир Андрійович



Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

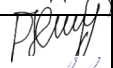
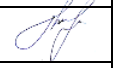

Студент



Київ — 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PE11.468213.001 ПЗ	Пояснювальна записка	59	
3	A3	PE11.468213.001 E1	Схема структурна	1	
4	A3	PE11.468213.001 E4	Схема електричних з'єднань	1	
5	A3	PE11.468213.001 E7	Схема розташування	1	
6	A4	PE11.468213.002	Алгоритм розгортання мережі	1	

				PE11.468213.001		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Демарьов К. Г.		05.06	Система виявлення дронів на основі сенсорної мережі. Апаратна інфраструктура	Лист	Листів
Керівн.	Нікітчук А. В.		13.06		1	1
Н/контр.	Головін В. А.		13.06		КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПРЕ Гр. PE-11	
Зав.каф.	Мовчанюк А.В.					

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проєкту
на тему: Система виявлення дронів
на основі сенсорної мережі. Апаратна інфраструктура

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

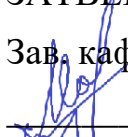
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Демарьова Костянтина Геннадійовича

1. **Тема проєкту:** «Система виявлення дронів на основі сенсорної мережі. Апаратна інфраструктура»

2. **Керівник проєкту** Нікітчук Артем Валерійович, затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. № 1840-с.

Строк подання студентом проєкту 10 червня 2025 року.

3. **Вихідні дані до проєкту:** можливість підключення сенсорів різних типів (акустичні, радіочастотні, оптичні); сенсори повинні бути оснащені Ethernet-інтерфейсом або модулем-перехідником для забезпечення зв'язку за стандартами моделі TCP/IP; відстань між сенсорами та центральним вузлом від 200 метрів; пропускна здатність мінімум 10 Мбіт/с; підтримка не менше 10 сенсорів; експлуатація на відкритому повітрі; випромінювання у навколишній простір мінімальне; стійкість до електромагнітних перешкод та механічних впливів підвищена; модульність, для підвищення швидкості розгортання та простоти транспортування; інструкція з розгортання мережі; використання стандартного комерційного обладнання.

4. **Зміст пояснювальної записки** (перелік завдань, які потрібно розробити): аналіз особливостей виявлення дронів, технічних характеристик сенсорів,

існуючих рішень; вибір оптимального мережевого обладнання; проектування топології мережі; вибір схеми розміщення сенсорних вузлів; економічні розрахунки; підтвердження працездатності.


5. **Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу** (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна схема апаратної інфраструктури системи виявлення дронів; схема електрична з'єднань (комунікаційних зв'язків); схема розташування (розгортання мережі у зоні проведення операції); презентація з обґрунтуванням прийнятих рішень (10 слайдів).

6. **Дата видачі завдання** 11 квітня 2025 року

Календарний план

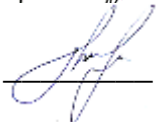
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз особливостей виявлення дронів, технічних характеристик сенсорів, існуючих рішень	14.04.25 – 19.04.25	виконано
2	Аналіз завдання та формування вимог	21.04.25 – 26.04.25	виконано
3	Вибір оптимального мережевого обладнання	28.04.25 – 3.05.25	виконано
4	Проектування топології мережі	5.05.25 – 10.05.25	виконано
5	Вибір схеми розміщення сенсорних вузлів	12.05.25 – 17.05.25	виконано
6	Економічні розрахунки	19.05.25 – 20.05.25	виконано
7	Підтвердження працездатності	21.05.25 – 24.05.25	виконано
8	Оформлення документації	26.05.25 – 31.05.25	виконано
9	Виправлення недоліків	2.06.25 – 5.06.25	виконано

Студент



Костянтин ДЕМАРЬОВ

Керівник



Артем НІКІТЧУК

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт містить: 66 с., 38 рис., 2 табл., 52 використаних джерела, а також графічний матеріал з 4-ма креслениками.

Дипломний проєкт присвячений розробці системи виявлення дронів на основі сенсорної мережі. Метою є проектування апаратної інфраструктури, яка забезпечує ефективне виявлення дронів за допомогою різноманітних сенсорів, таких як акустичні, радіочастотні та оптичні. У роботі проведено аналіз методів виявлення дронів, обґрунтовано вибір сенсорів, розроблено топологію мережі та схему розміщення сенсорних вузлів. Обрано оптимальне мережеве обладнання, включаючи комутатор, маршрутизатор та сервер, що відповідають вимогам завдання. Використано технологію PoE для живлення сенсорів через Ethernet, що знижує витрати на додаткові джерела живлення та спрощує монтаж. Розглянуто альтернативні варіанти живлення, включаючи автономні акумулятори, сонячні панелі та джерела безперебійного живлення. Окрім того, розраховано витрати на закупівлю обладнання та подано інструкцію з розгортання сенсорної мережі.

Ключові слова: СИСТЕМА, ВИЯВЛЕННЯ, ДРОНІВ, СЕНСОРНА, МЕРЕЖА, POE, АКУСТИЧНІ, РАДІОЧАСТОТНІ, ОПТИЧНІ, ТОПОЛОГІЯ.

ANNOTATION

The diploma project contains: 66 p., 38 figures, 2 tables, 52 references, and graphic material with 4 drawings.

The diploma project is devoted to the development of a drone detection system based on a sensor network. The goal is to design a hardware infrastructure that provides effective drone detection using a variety of sensors, such as acoustic, radio frequency, and optical. The paper analyzes the methods of drone detection, justifies the choice of sensors, and develops a network topology and a scheme for the placement of sensor nodes. The optimal network equipment, including a switch, router, and server, was selected to meet the requirements of the task. PoE technology was used to power the sensors via Ethernet, which reduces the cost of additional power supplies and simplifies installation. Alternative power options are considered, including autonomous batteries, solar panels, and uninterruptible power supplies. In addition, the costs of purchasing equipment are calculated and instructions for deploying the sensor network are presented.

Keywords: SYSTEM, DETECTION, DRONES, SENSOR, NETWORK, POE, ACOUSTIC, RADIO FREQUENCY, OPTICAL, TOPOLOGY.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	5
1 Аналіз методів виявлення дронів і технічних характеристик сенсорів .	6
1.1 Фізичні принципи детектування дронів	6
1.2 Огляд сенсорів (акустичні, радіочастотні, оптичні).....	9
1.3 Існуючі системи виявлення дронів	14
1.4 Висновки до розділу 1	19
2 Вибір оптимального мережевого обладнання.....	20
2.1 Аналіз завдання	20
2.2 Середовище передачі даних та мережеві інтерфейси	22
2.3 PoE-подовжувачі	25
2.4 Комутатор	26
2.5 Сервер.....	28
2.6 Маршрутизатор	31
2.7 Живлення	33
2.8 Висновки до розділу 2	35
3 Проектування сенсорної мережі.....	36
3.1 Структурна схема сенсорної мережі.....	36
3.2 Проектування топології мережі.....	37
3.3 Схема розташування мережі	39
3.4 Висновки до розділу 3	41

					PE11.468213.001 ПЗ			
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Система виявлення дронів на основі сенсорної мережі. Апаратна інфраструктура	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Демарьов К. Г.						1	59
Перевіриє	Нікітчук А. В.					PE-11, РТФ		
Н. Контр.	Головін В. А.							
Затвердив	Мовчанюк А. В.							

4 Підтвердження працездатності та економічні розрахунки.....	42
4.1 Розрахунки пропускнуої здатності і втрат	42
4.2 Моделювання мережі в середовищі Cisco Packet Tracer.....	44
4.3 Економічні розрахунки.....	47
4.4 Інструкція з розгортання мережі	49
4.5 Висновки до розділу 4	51
Висновки	53
Перелік джерел посилань	54

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		2

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ACK/NACK	–	acknowledgement/negative acknowledgement
AUDS	–	Anti-UAV Defence System (система захисту від БПЛА)
DHCP	–	dynamic host configuration protocol (протокол динамічного налаштування вузла)
FPV	–	first person view (вид від першої особи)
GUI	–	graphical user interface (графічний інтерфейс користувача)
I2C	–	inter-integrated circuit (взаємоінтегрована схема)
IP	–	internet protocol
LACP	–	link aggregation control protocol (протокол керування агрегацією каналів)
LAN	–	local area network (локальна мережа)
NAT	–	network address translation (перетворення мережевих адрес)
PoE	–	power over ethernet (живлення через Ethernet)
QoS	–	quality of service (якість обслуговування)
SDR	–	software defined radio (програмно-визначене радіо)
SNMP	–	simple network management protocol (простий протокол мережевого керування)
SPI	–	serial peripheral interface (послідовний периферійний інтерфейс)
SSH	–	secure shell (безпечна оболонка)
STP	–	spanning tree protocol (протокол покривного дерева)
TCP	–	transfer control protocol (протокол управління передачею)
UART	–	universal asynchronous receiver-transmitter
UDP	–	user datagram protocol (протокол користувачьких датаграм)
UPS	–	uninterruptible power supply (джерело безперебійного живлення)
USB	–	universal serial bus (універсальна послідовна шина)

<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

3

VPN	– virtual private network (віртуальна приватна мережа)
WAN	– wide area network (глобальна мережа)
БАС	– безпілотні авіаційні системи
БПЛА	– безпілотні літальні апарати
ЕО	– електрооптичне
ІЧ	– інфрачервоне випромінювання
ПЗ	– програмне забезпечення
ПЛІС	– програмована логічна інтегральна схема
ШІ	– штучний інтелект

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

Упродовж останніх років дрони активно впроваджуються у різні сфери людської діяльності. Вони застосовуються для аерофотозйомки, екологічного моніторингу, точного землеробства, логістики, охорони громадського порядку, а також у військовій сфері — для ведення розвідки, коригування вогню й нанесення ударів. Водночас зростає ризик несанкціонованого використання дронів у зонах з обмеженим доступом, поблизу стратегічно важливих об'єктів та критичної інфраструктури, що формує нагальну потребу у створенні ефективних систем виявлення та протидії цим загрозам.

Ключовими завданнями при проектуванні подібних систем є своєчасне виявлення дрона у реальному часі, стабільна робота в умовах дії перешкод та природних чинників, точна локалізація об'єкта у просторі, гнучкість та масштабованість архітектури, а також оперативне розгортання в різних умовах. З огляду на це, ефективним підходом є побудова розподіленої сенсорної мережі з використанням сенсорів — акустичних, радіочастотних і оптичних — що забезпечують багатоканальний контроль оточуючого простору та передають дані на центральний обчислювальний вузол.

Однак збір даних — лише перший етап. Реальна ефективність системи визначається здатністю до об'єднання, фільтрації та інтелектуального аналізу інформації, отриманої від сенсорних вузлів. Тому сенсорна мережа повинна бути тісно інтегрована з програмною платформою, яка реалізує алгоритми класифікації цілей, виявлення аномалій та прийняття рішень у режимі наближеному до реального часу.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ І ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРІВ

1.1 Фізичні принципи детектування дронів

Для виявлення дронів на сьогоднішній день застосовується низка різних фізичних принципів. Кожен із них базується на виявленні певних ознак дронів — їх випромінювання, руху, акустичних характеристик тощо. Вибір методу виявлення залежить від умов експлуатації, характеристик об'єкта і вимог до точності та надійності роботи системи.

Далі будуть описані основні методи виявлення дронів:

А. Акустичні (звукові).

Акустичні сенсори здійснюють детектування об'єктів за звуковими слідами, характерними для роботи двигунів і пропелерів дронів. Вони користуються спектрами звукових частот, характерними для дронів, щоб виявити їх на відстані в кілька сотень метрів. але будь-який аудіометричний метод виявлення стає марним через високий рівень шуму у міських районах [1].

Дальність виявлення сильно залежить від типу двигуна дрона та умов навколишнього середовища. За даними [2]:

- крилаті ракети можуть бути виявлені на відстані 7–9 км;
- літаки та гвинтокрили — на відстані 5–6 км;
- БПЛА з двигуном внутрішнього згоряння — 3–5 км;
- БПЛА з електричним двигуном — до 650 метрів.

У міських умовах ефективність акустичного виявлення значно знижується через високий рівень фонових шумів.

Слід зазначити, що, акустичні методи здатні виявляти дрони незалежно від способу їх керування, у тому числі дрони без активних радіосигналів або дотові дрони. Однак модифікація апаратів, наприклад, заміна гвинтів або оптимізація конструкції для зниження шуму, може ускладнити або зменшити дальність виявлення.

Переваги:

					РЕ11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		6

- працює, навіть коли дрон приховано від очей (пряма видимість не потрібна);
- корисно у віддалених або тихих місцях, де фоновий шум мінімальний.

Обмеження:

- обмежений діапазон виявлення;
- неефективний у шумному середовищі або проти тихих дронів.

В. Візуальні (оптичні).

Дрони виявляються за допомогою камер спостереження, що контролюють повітряний рухомий об'єкт, прагнучи розрізнити дрони та птахів за розміром, траєкторією польоту й стилем руху. Дальність дії камер обмежена до 350 метрів. Навіть із застосуванням комп'ютерних алгоритмів для відстеження моделей польоту важко однозначно визначити, чи це птах, чи дрон. Відомо, що деякі ключові характеристики польоту дрону, такі як ширяючий політ, також використовуються багатьма видами птахів. Гарним прикладом є чайки [3].

Переваги:

- надає візуальне підтвердження виявленого дрона;
- добре працює з передовим ШІ для точної ідентифікації об'єктів.

Обмеження:

- залежить від чіткої видимості, освітленості та погодних умов;
- обмежений діапазон виявлення порівняно з радіочастотними або радарними системами.

С. Радіочастотні.

Аналізують сигнали радіохвиль у частотних діапазонах, які використовуються для керування дроном. Це включає моніторинг частот 2,4 і 5,8 ГГц, а також виявлення SSID і MAC-адрес Wi-Fi, що транслюються доступними комерційними безпілотними літальними апаратами. Такі пристрої мають більшу дальність дії. Однак усім їм складно визначити напрямок, зокрема азимут чи кут місця, з якого прилітає дрон [3].

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги:

- може виявити як дрон, так і контролер (визначення місця розташування пілота);
- добре працює на великих відстанях.

Обмеження:

- неефективний для повністю автономних дронів, які не покладаються на радіозв'язок;
- можуть виникнути труднощі в середовищах з великою кількістю радіочастотних сигналів (переповнені частоти).

Точність роботи систем виявлення залежить від низки факторів:

- a) зі збільшенням відстані знижується інтенсивність акустичних, радіочастотних та оптичних сигналів, що ускладнює їх надійне фіксування. Найбільш критичним цей ефект є для малогабаритних дронів, оснащених електродвигунами;
- b) наявність будівель, рослинного покриву, складного рельєфу місцевості, а також атмосферних явищ (дощ, туман, сніг) може призводити до екранування, відбиття або поглинання сигналів різного типу, що погіршує ефективність виявлення;
- c) апарат із електродвигуном характеризується зниженою акустичною помітністю порівняно з БПЛА, що використовують двигуни внутрішнього згорання. Крім того, автономний режим польоту без активної передачі даних ускладнює виявлення такими методами, як радіочастотне сканування;
- d) висока інтенсивність акустичних або електромагнітних шумів у зоні моніторингу знижує співвідношення сигнал/шум, що ускладнює надійну ідентифікацію цільових об'єктів;
- e) висока чутливість сенсорних елементів, оптимальна роздільна здатність, а також застосування ефективних методів фільтрації шумів і обробки даних є критичними для забезпечення високої достовірності виявлення дронів [4].

					PE11.468213.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

1.2 Огляд сенсорів (акустичні, радіочастотні, оптичні)

Ефективність функціонування систем виявлення дронів визначається якістю роботи сенсорних пристроїв, що здійснюють первинний збір даних про об'єкт. Кожен із цих типів має власний набір критичних параметрів, що впливають на кінцеві результати роботи системи.

Основними характеристиками, які визначають ефективність таких пристроїв, є:

- чутливість мікрофонів у цільовому частотному діапазоні;
- дальність виявлення сигналів;
- співвідношення сигнал/шум у складних акустичних умовах.

Використання мікрофонних масивів із цифровою обробкою сигналів суттєво покращує можливості локалізації джерела шуму та дозволяє зменшити вплив фонових завад [1].

Ключовими параметрами для радіочастотних детекторів є:

- чутливість приймача;
- ширина робочого частотного діапазону;
- здатність ідентифікувати специфічні протоколи зв'язку.

Стандартними для моніторингу є діапазони 300–1050 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, які використовуються більшістю комерційних та розвідувальних дронів. Пристрої з розширеними можливостями аналізу спектра, зокрема на базі технологій SDR, дозволяють отримувати більш детальну інформацію про характеристики сигналу, що суттєво підвищує надійність виявлення. Проте варто зазначити, що автономні дрони, які не здійснюють активну передачу даних, є серйозною проблемою для суто радіочастотного моніторингу [5].

Оптичні сенсори, у свою чергу, здійснюють виявлення об'єктів на основі аналізу візуальної або інфрачервоної інформації. У таких системах критичними є:

- параметри роздільної здатності зображення;
- чутливість до освітлення;
- кут огляду камери [6].

					РЕ11.468213.001 ПЗ	Лист
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для побудови сенсорної мережі, орієнтованої на виявлення дронів, доцільно використовувати базові модулі збору даних, зокрема IP-мікрофони, IP-камери та радіоприймачі з підтримкою SDR. На відміну від інтегрованих комплексів, ці компоненти є модульними, відкритими до інтеграції, легко масштабуються й доступні на ринку.

Одним із найпростіших рішень для акустичного моніторингу є модуль MAX9814, що містить автоматичний контроль підсилення (AGC) і низький рівень шуму. Модуль працює в діапазоні 20 Гц – 20 кГц, споживає приблизно 3 мА при 5 В, що відповідає 0,015 Вт. Для підключення використовується аналоговий вихід (OUT), який може бути оцифрований за допомогою модуля АЦП та переданий далі через Ethernet або Wi-Fi.



Рисунок 1.1 — Модуль електретного мікрофона MAX9814 [7]

Більш функціональним рішенням є сенсор NW2 компанії Hazardous, який призначений для акустичного виявлення дронів з використанням фірмового алгоритму NWO. Пристрій має Ethernet-інтерфейс та можливість передачі акустичних характеристик у вигляді цифрових спектрограм. Споживання становить близько 5 Вт.



Рисунок 1.2 — Акустичний сенсор ZVOOK NW2 [8]

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		10

Також версію NWO бездротового акустичного детектора, адаптовану для встановлення на автомобілях. Він може інтегруватися у сенсорну мережу за допомогою Wi-Fi або мобільного зв'язку (4G).



Рисунок 1.3 — Акустичний бездротовий сенсор Zvook NOW [9]

Для задач відеоспостереження доцільно використовувати IP-камери з підтримкою RTSP або ONVIF. Наприклад, модель Dahua Imou IPC-C22EP підтримує роздільну здатність 1920×1080 пікселів, нічне бачення та кут огляду 112°. Вона має підтримку Ethernet (зі стандартом IEEE 802.3af PoE) і Wi-Fi. Споживана потужність – до 6,2 Вт.



Рисунок 1.4 — Оптичний сенсор Dahua IPC-C22EP [10]

Інший приклад – GreenVision GV-200-IP-H-DOS50VM-100-SD-Lite, розрахована на зовнішнє використання, оснащена варіофокальним об'єктивом

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

2,8–12 мм та має ступінь захисту IP67. Живлення через PoE, споживання – до 7 Вт.



Рисунок 1.5 — Оптичний сенсор GreenVision GV-200-IP [11]

Для промислових рішень доречно застосовувати камери Bosch NUC-51022-F4, які підтримують багатопотокову відеотрансляцію, WDR та H.265. Має гігабітний Ethernet і споживає до 12 Вт.



Рисунок 1.6 — Оптичний сенсор Bosch NUC-51022-F4 [12]

Для детектування дронів на основі аналізу радіочастотного спектра можна використовувати SDR-приймачі. Одним із доступних варіантів є RTL-SDR Blog V3, що покриває діапазон 500 кГц – 1,7 ГГц. Підключення здійснюється через USB, середнє енергоспоживання — 0,75–1 Вт.



Рисунок 1.7 — RTL-SDR Blog V3 [13]

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		12

Більш висококласним рішенням є Airspy Mini, який охоплює діапазон 24–1800 МГц, забезпечує високу динаміку (до 80 дБ) та частоту дискретизації до 6 МГц. Підключення – USB 2.0, споживання – до 1,6 Вт.



Рисунок 1.8 — Airspy Mini [14]

Для завдань фіксації спектра у широкому діапазоні підходить приймач Фобос SDR, який підтримує частотний діапазон 100 МГц – 6 ГГц, вбудовану обробку сигналу, а також має Ethernet-інтерфейс для інтеграції у сенсорну мережу. Типове споживання – до 5 Вт, живлення — 12 В DC або PoE.



Рисунок 1.9 — Фобос SDR [15]

Таблиця 1 — Основні характеристики сенсорів, що можуть бути інтегровані у сенсорну мережу для виявлення дронів

Тип сенсора	Приклад моделі	Діапазон/роздільність	Підключення	Споживання	Доступність
Акустичний	МАХ9814	20 Гц – 20 кГц	Аналог → АЦП	~0,015 Вт	+
Акустичний	Hazardous NW2	50 Гц – 8 кГц (спектрально)	Ethernet	~5 Вт	+
Акустичний	Hazardous NWO Wireless	50 Гц – 8 кГц	Wi-Fi / 4G	~5–6 Вт	+

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

13

Продовження таблиці 1

Тип сенсора	Приклад моделі	Діапазон/роздільність	Підключення	Споживання	Доступність
Оптичний	Dahua Imou IPC-C22EP	2 Мп (1920×1080), 112° кут	Ethernet / Wi-Fi	~6,2 Вт	+
Оптичний	GreenVision GV-200-IP	2 Мп, змінний фокус	Ethernet (PoE)	~7 Вт	+
Оптичний	Bosch NUC-51022-F4	1080р, багатопотокова трансляція	Gigabit Ethernet	~12 Вт	+
РЧ (SDR)	RTL-SDR Blog V3	0,5 – 1700 МГц	USB	~1 Вт	+
РЧ (SDR)	Airspy Mini	24 – 1800 МГц	USB	~1,6 Вт	+
РЧ (SDR)	Фобос SDR	100 МГц – 6 ГГц	Ethernet	~5 Вт	+

1.3 Існуючі системи виявлення дронів

На сучасному етапі розвитку засобів протидії дронам ключовою тенденцією є перехід від монолітних автономних детекторів до розподілених сенсорних мереж, які здатні забезпечити масштабоване покриття, високу достовірність виявлення і адаптацію до умов середовища. У цьому проаналізовано приклади існуючих комерційних або дослідницьких рішень, що реалізують або підтримують концепцію мережі сенсорів із централізованою або децентралізованою обробкою даних.

Одним з найбільш поширених прикладів є система DEDRONETracker [16], розроблена німецькою компанією DEDRONE. Вона інтегрує в єдину мережу

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

14

радіочастотні сенсори (Dedrone RF-360), відеокамери, тепловізори, радарні та акустичні модулі. Передача даних між вузлами здійснюється через IP-мережу з підтримкою PoE. Всі сенсори передають інформацію на централізований сервер, де здійснюється аналіз і ф'южн даних для підвищення точності ідентифікації загрози [16].

Архітектура системи дозволяє масштабування до кількох десятків сенсорів з гнучкою географією розташування. DedroneTracker підтримує інтеграцію сторонніх камер (ONVIF), SDR-приймачів і платформ типу Axis Radar. Система застосовується на об'єктах критичної інфраструктури та в аеропортах.



Рисунок 1.10 — Dedrone RF-360 [16]

Система AARTOS DDS [17] німецької компанії Aaronia базується на мережі пасивних радіочастотних приймачів із підтримкою SDR, які працюють у діапазоні від 10 МГц до 20 ГГц. Дані з сенсорів передаються на центральну станцію аналізу, де виконується обчислення положення дрону методом триангуляції. Платформа також підтримує інтеграцію відеокамер та акустичних датчиків, що дозволяє будувати багатофункціональні сенсорні мережі.

Мережева архітектура AARTOS передбачає як фіксоване розміщення приймачів, так і мобільне розгортання (на щоглах, автотранспорті, БПЛА). Всі компоненти підтримують IP-підключення та живлення через PoE або 24 В DC.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Система використовується в аеропортах, в'язницях, на об'єктах армії ФРН та НАТО.



Рисунок 1.11 — AARTOS DDS [17]

Детектор дронів «ОБРІЙ-1» [18] є високоспеціалізованим пристроєм, призначеним для виявлення безпілотних літальних апаратів в широкому радіочастотному діапазоні від 10 МГц до 6 ГГц.

До визначних характеристик цього детектора належить його здатність функціонувати в режимі реального часу, що забезпечує негайну реакцію на появу дронів у зоні виявлення. Завдяки налаштованій чутливості, пристрій може фіксувати активність на відстані від 1 до 1,5 км. Використання додаткових вузьконаправлених антен, таких як антена Вівальді, може розширити радіус дії до 4,5 км, що підвищує його ефективність навіть на значних відкритих просторах [18].



Рисунок 1.12 — Детектор дронів «ОБРІЙ-1» [19]

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

MDDSR1 [21] є мобільним пристроєм для виявлення дронів, головною перевагою якого виступає його портативність. Пристрій відрізняється малою вагою та компактними розмірами, що дозволяє легко вмістити його в сумку чи рюкзак або зручно закріпити зовні на обладнанні. Відзначається простота в експлуатації завдяки зручному інтерфейсу, що включає дисплей, кнопку живлення та навігаційні кнопки для управління меню, який користувач може налаштовувати за допомогою керівництва [21].

Мобільний дрон-детектор MDDSR1 здатний виявляти дрони на висоті до 500 метрів (тестовані параметри) і на відстані до 1000 метрів (тестовані параметри), навіть у складних умовах, таких як нічний час або погана видимість. Це дозволяє своєчасно реагувати на можливі загрози та забезпечувати захист від потенційних атак. Крім цього, застосування дрон-детекторів може сприяти зниженню втрат серед військових та зменшенню ризиків для цивільного населення. [20]



Рисунок 1.13 — Мобільна система виявлення дронів MDDSR1
0.9ГГц/2.4ГГц/5.8ГГц [21]

WhiteFox Skydome Network [22] передбачає мережу розосереджених сенсорів, які працюють у кооперації для виявлення, класифікації та локалізації дронів. Кожен вузол системи має RF-приймач і комп'ютер обробки сигналів. Вузли взаємодіють через захищену мережу, утворюючи розподілену систему раннього попередження. Система підтримує одночасне покриття кількох об'єктів.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ



Рисунок 1.14 — WhiteFox Skydome Network [22]

Система Xpeller [23] від Hensoldt підтримує розподілену архітектуру з декількома сенсорними вузлами — радарами, оптичними камерами, RF-аналізаторами. Всі сенсори під'єднуються до центрального вузла управління через IP-мережу. Архітектура дозволяє масштабування системи відповідно до географії об'єкта, що охороняється. Система підтримує автоматичне злиття даних і сценарії взаємодії з системами протидії.



Рисунок 1.15 — HENSOLDT's Xpeller [23]

Аналіз сучасних комерційних засобів для виявлення безпілотних літальних апаратів показує, що кожне з представлених рішень має ряд характерних обмежень, що впливають на їхню ефективність у різних умовах експлуатації.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

1.4 Висновки до розділу 1

Встановлено, що найбільш доцільним є поєднання акустичних, радіочастотних та оптичних сенсорів, оскільки їх комплексне застосування забезпечує підвищену надійність детекції в умовах реального середовища.

Акустичні сенсори (MAX9814, NW2, NWO Wireless) забезпечують виявлення дронів за характерними звуковими сигналами. Вони мають низьке енергоспоживання (0,015–6 Вт) та можуть інтегруватися до мережі через аналогові виходи, Ethernet або бездротові інтерфейси.

Радіочастотні сенсори (RTL-SDR Blog V3, Airspy Mini, Фобос SDR) здатні фіксувати радіосигнали в широкому діапазоні частот (від 0,5 МГц до 6 ГГц), мають USB або Ethernet-інтерфейси та споживають 1–5 Вт. Вони ефективні для виявлення комерційних дронів із активним радіозв'язком.

Оптичні сенсори (IP-камери Dahua IPC-C22EP, GreenVision GV-200-IP, Bosch NUC-51022-F4) здійснюють візуальний контроль за повітряним простором. Вони підтримують PoE або Wi-Fi, забезпечують передачу зображення у форматах Full HD та мають споживання до 12 Вт.

Усі вибрані сенсори підтримують інтеграцію до IP-мережі та можуть бути використані в складі розподіленої системи. При цьому критичними параметрами для проектування системи є: тип підключення (Ethernet, Wi-Fi, USB); споживана потужність; доступність стандартів передачі (ONVIF, RTSP, SDR API) та відповідність умовам зовнішньої експлуатації.

Існуючі системи виявлення дронів, побудовані на основі сенсорних мереж, зокрема Dedrone, AARTOS DDS, WhiteFox Skydome, Xpeller та інші. Вони підтверджують ефективність комплексного підходу та доцільність побудови багатосенсорної системи, у якій поєднуються різні типи сенсорів із можливістю мережевої взаємодії та централізованої обробки даних, що дозволяє мінімізувати вірогідність пропуску цілі, підвищити достовірність виявлення та адаптувати систему до конкретних умов експлуатації.

					PE11.468213.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

2 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МЕРЕЖЕВОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Аналіз завдання

Враховуючи специфіку експлуатації, обладнання повинно забезпечувати надійність передачі даних у реальному часі, стійкість до впливу зовнішнього середовища, а також відповідати характеристикам сенсорних вузлів щодо пропускної здатності, інтерфейсів підключення та енергоспоживання.

Одним з критичних аспектів є здатність пристроїв працювати у відкритому середовищі. Мережеве обладнання, що застосовується для зовнішнього розміщення, повинно мати захист згідно з класами IP65 або вище (наприклад, IP67), що забезпечує стійкість до пилу, дощу та температурних коливань. Згідно з [24], промислові мережеві пристрої, призначені для вуличного розгортання, мають допустимий температурний діапазон від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ та витримують вплив УФ-випромінювання, конденсації вологи й снігу.

Також важливо враховувати стійкість до електромагнітних завад та вібрацій. У польових умовах поблизу військової техніки або промислових об'єктів можливий високий рівень електромагнітного шуму. Обладнання повинно відповідати стандартам електромагнітної сумісності (наприклад, EN 55032, EN 61000-6-2), що гарантує захищеність інтерфейсів і стійкість до імпульсних перешкод [25]. У випадку мобільного розміщення (на щоглах, транспортних платформах) актуальною є механічна стійкість: згідно з [26], для обладнання, призначеного для рухомих об'єктів, тестуються вібрації на частотах до 200 Гц та прискорення до 5 g.

Ще одним ключовим фактором є пропускна здатність обраного каналу передачі. Сенсорна мережа, яка включає оптичні або акустичні модулі з передачею потоку даних (аудіо або відео), потребує забезпечення каналів із пропускною здатністю не менше 10–100 Мбіт/с на один вузол. Згідно з рекомендаціями ITU-T G.1010 [27], для передачі аудіо в режимі реального часу достатньо 100–300 Кбіт/с, однак для відео (наприклад, 720p при 15 fps) вже необхідно близько 2–5 Мбіт/с. Таким чином, у разі використання

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		20

комбінованих сенсорів (наприклад, акустика + оптика), слід орієнтуватися на мережі типу Fast Ethernet (100 Мбіт/с) або Gigabit Ethernet.

У разі бездротових рішень (наприклад, Wi-Fi або LoRa для low-power-сенсорів) необхідно враховувати стійкість до втрати пакетів та забезпечення QoS (якість обслуговування) для синхронної передачі критичних даних. Протоколи типу TCP/IP із контрольними механізмами підтвердження отримання (ACK/NACK) дозволяють забезпечити цілісність даних, однак збільшують затримку. У випадку використання UDP-з'єднань слід додатково реалізовувати надійність передачі на рівні прикладного ПЗ.

Окрему увагу слід звернути на енергоспоживання та можливість автономного живлення. Для розміщення у віддалених точках рекомендується використовувати обладнання з підтримкою PoE (Power over Ethernet) або з можливістю підключення до сонячних батарей/акумуляторів. Відповідно до стандарту IEEE 802.3af/at, типове споживання для промислових PoE-комутаторів не перевищує 10–15 Вт на порт [28].

Також критичною є наявність стандартних інтерфейсів для підключення до сенсорів (наприклад, Ethernet, UART, USB або SPI/I2C) та можливість інтеграції в TCP/IP-мережу з маршрутизацією трафіку. Обладнання повинно мати підтримку DHCP/Static IP, SNMP для моніторингу, а також можливість віддаленого керування та оновлення прошивки (через SSH або Web GUI).

Таким чином, правильний вибір мережевого обладнання повинен забезпечити:

- відповідність стандартам захисту IP для зовнішнього середовища;
- електромагнітну та механічну стійкість;
- достатню пропускну здатність;
- підтримку промислових або енергоефективних інтерфейсів;
- можливість інтеграції в TCP/IP-мережу;
- захищеність і надійність роботи у складних умовах.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		21

2.2 Середовище передачі даних та мережеві інтерфейси

Попри привабливість бездротових рішень (Wi-Fi, LoRa, 3G/4G), їх використання у сенсорних системах виявлення дронів має суттєві обмеження. Зокрема, технології Wi-Fi є чутливими до перешкод та мають обмежений радіус дії в умовах відкритого простору [29]. Стандарти LoRa і NB-IoT забезпечують мінімальну пропускну здатність (до 50–100 Кбіт/с), чого недостатньо для передавання відео- чи аудіопотоків [30]. Мобільні мережі (3G/4G) пов'язані з додатковими витратами, затримками та потребою в SIM-картах, що ускладнює масштабування та централізоване адміністрування мережі.

З огляду на це, найбільш оптимальним вибором є дротова передача даних, зокрема — на основі Ethernet. Вона забезпечує стабільну пропускну здатність, високу надійність та можливість одночасної передачі даних і електроживлення (технологія PoE).

Найпоширенішими стандартами є Fast Ethernet (до 100 Мбіт/с, IEEE 802.3u) та Gigabit Ethernet (до 1 Гбіт/с, IEEE 802.3ab), які сумісні з більшістю комутаторів, маршрутизаторів та інжекторів живлення. Вони легко інтегруються в TCP/IP-мережу та забезпечують достатню пропускну здатність для одночасної роботи кількох сенсорів.

Для фізичного підключення сенсорів також можуть використовуватись інтерфейси USB, UART, I²C або SPI — але лише у випадках, коли сенсор підключений безпосередньо до вбудованого вузла збору даних, наприклад, на базі одноплатного комп'ютера. Для мережевого з'єднання з використанням IP-протоколу пріоритетним залишається Ethernet.

У сенсорних мережах можуть застосовуватись кілька типів дротових середовищ: коаксіальні кабелі (застарілі у сфері IP-зв'язку), вита пара (найбільш поширений варіант) та оптоволоконні кабелі (для великих відстаней або потреб у високій пропускну здатності).

Найпоширенішим і економічно доцільним вибором є кабелі категорій Cat5e, Cat6 та Cat6a:

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		22

- Cat5e UTP: без екранування, до 100 МГц, до 1 Гбіт/с, довжина сегменту — до 100 м;
- Cat6 FTP/SFTP: екранована вита пара з фольгою, до 250 МГц, покращена стійкість до ЕМЗ;
- Cat6a SFTP: індивідуальне й загальне екранування, до 10 Гбіт/с, захист у промисловому середовищі [31].

Для експлуатації на відкритому повітрі використовуються модифікації із захистом від ультрафіолету, вологи та механічних пошкоджень:

- Cat6 Outdoor Shielded CMX — з поліетиленовою оболонкою, стійкою до вологи;
- Gel-filled Ethernet Cables — зі спеціальним гелевим заповненням для прокладання в ґрунті;
- UV-resistant Ethernet cables — для тривалої експлуатації на сонці.

Для реалізації сенсорної мережі в умовах відкритого простору обрано кабель FTP Cat6 Outdoor U/FTP (рис. 2.1) з поліетиленовою оболонкою типу PE (CMX), що забезпечує стійкість до ультрафіолетового випромінювання, атмосферної вологи та механічного впливу. Конструкція кабелю включає екранування кожної пари алюмінієвою фольгою, що суттєво знижує рівень електромагнітних завад, а зовнішнє загальне екранування дозволяє використовувати його в безпосередній близькості до джерел електричних перешкод.

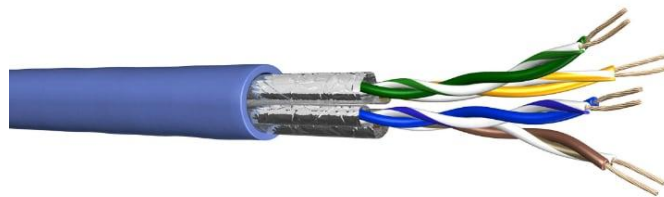


Рисунок 2.1 — Кабель FTP Cat6 Outdoor U/FTP [32]

Для з'єднання використовуються екрановані конектори RJ-45 типу FTP, які монтуються в герметизовані монтажні коробки з рівнем захисту не нижче IP65, що запобігає попаданню вологи та пилу в місця з'єднання. Додатково

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		23

передбачено заземлення екрана кабелю згідно з вимогами стандарту ANSI/TIA-607, що підвищує електробезпеку та завадостійкість мережі.

Обраний кабель відповідає вимогам стандарту IEEE 802.3at (PoE+), що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 1 Гбіт/с на відстань до 100 метрів, одночасно з живленням сенсорних вузлів потужністю до 25,5 Вт. Такий тип кабелю забезпечує оптимальне співвідношення вартості, довговічності та технічних характеристик. Зокрема, продукція Hyperline U/FTP Cat6 Outdoor CMX PE або Legrand Cat6 U/FTP PE є придатною для використання в умовах змінних температур і підвищеної вологості. Середня вартість погонного метра такого кабелю на ринку України становить 60–70 грн, що є економічно обґрунтованим вибором для розгортання середньої за масштабом сенсорної мережі [33].

Відповідно до стандарту IEEE 802.3, максимальна довжина сегменту витой пари без підсилення сигналу становить 100 метрів. Для подолання цього обмеження застосовуються:

- PoE-подовжувачі — дозволяють збільшити довжину сегмента ще на 100–200 м;
- проміжні комутатори — додають активну точку передачі;
- оптоволоконні лінії з медіаконвертерами — для відстаней до 10 км [34].

Технологія Power over Ethernet дозволяє передавати живлення разом із даними одним кабелем. Це спрощує монтаж, зменшує витрати на електроживлення та забезпечує централізоване керування. Згідно зі стандартами IEEE 802.3af/at, типове споживання становить 15,4–25,5 Вт, чого достатньо для IP-камер, мікрофонів та SDR-приймачів. Для зовнішніх застосувань слід обирати PoE-комутатори з підтримкою IEEE 802.3at або 802.3bt для потужних сенсорів.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		24

2.3 PoE-подовжувачі

У сенсорних мережах для виявлення дронів, де відстані між вузлами перевищують стандартні 100 метрів, застосування PoE-подовжувачів є доцільним. Вони дозволяють передавати як дані, так і електроживлення на більші відстані без необхідності додаткових джерел живлення. Нижче наведено огляд кількох моделей PoE-подовжувачів, які відповідають вимогам до зовнішнього використання, пропускну здатності та захисту від впливу навколишнього середовища.

A. Gigabit Waterproof PoE Extender POE-EX2001-W.

Цей подовжувач підтримує передачу даних на швидкості до 1 Гбіт/с і забезпечує вихідну потужність до 22 Вт. Максимальна власна споживана потужність пристрою — 2,5 Вт, що слід враховувати при розрахунку бюджету живлення для PoE-комутатора або інжектора. Він відповідає стандартам IEEE 802.3af/at і має металевий корпус з рейтингом захисту IP66, що дозволяє його використання в умовах температур від -40°C до +45°C. Вартість становить приблизно \$108.90.



Рисунок 2.2 — Gigabit Waterproof PoE Extender POE-EX2001-W [35]

B. BT90W Outdoor PoE Extender.

Модель BT90W від Linovision дозволяє розширити мережу на додаткові 100 метрів та забезпечує два виходи PoE: один з потужністю до 60 Вт, інший — до 30 Вт. Показник споживаної потужності становить до 4 Вт при роботі з повним навантаженням. Вона має алюмінієвий корпус з рейтингом IP67 та захистом від блискавки 4KV, що робить її придатною для суворих умов експлуатації. Вартість — близько €79,99.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		25



Рисунок 2.3 — BT90W Outdoor PoE Extender [36]

C. One Port Gigabit Outdoor PoE Extender POE-EXT3001GP – це подовжувач, який підтримує каскадне з'єднання до 300 метрів та забезпечує передачу даних на швидкості до 1 Гбіт/с. Власне енергоспоживання становить не більше 2,2 Вт. Він має рейтинг захисту IP67 і працює в температурному діапазоні від -10°C до +50°C. Вартість — приблизно €39,99.



Рисунок 2.4 — One Port Gigabit Outdoor PoE Extender POE-EXT3001GP [37]

2.4 Комутатор

Вибір комутатора є критичним для забезпечення стабільної та надійної роботи всієї мережі, особливо в умовах відкритого повітря та екстремальних температур.

Для виконання завдання необхідний комутатор з підтримкою PoE, щонайменше на 10 портів (бажано більше), з високою пропускнуою здатністю.

A. Inscapе Data LPS3802ATM-T1 – це керований 10-портовий Gigabit PoE комутатор з двома SFP-оптичними портами для високошвидкісного та

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

26

довготривалого з'єднання. Він має ступінь захисту IP68, що забезпечує повний захист від пилу та води, а також вбудований захист від перенапруги 6KV. Підтримує стандарти IEEE 802.3af/at з загальною потужністю PoE до 240 Вт. Робочий температурний діапазон від -10°C до +50°C робить його придатним для суворих умов експлуатації.



Рисунок 2.5 — Inscape Data LPS3802ATM-T1 [38]

В. MokerLink Outdoor 10 Port Gigabit PoE Switch — це некерований комутатор з вісьмома PoE-портами та двома Gigabit SFP-портами. Він має пластиковий корпус з захистом від дощу, що дозволяє встановлення на стовпах. Підтримує стандарти IEEE 802.3af/at з максимальною потужністю PoE до 120 Вт. Робочий температурний діапазон від -40°C до +45°C.



Рисунок 2.6 — MokerLink Outdoor 10 Port Gigabit PoE Switch [39]

С. TP-Link TL-SG1210P — це некерований 10-портовий Gigabit PoE комутатор з вісьмома PoE-портами та двома Gigabit SFP-портами. Підтримує стандарти IEEE 802.3af/at з загальною потужністю PoE до 63 Вт. Має

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		27

безвентиляторний дизайн, що забезпечує безшумну роботу, але не має спеціального захисту від погодних умов, тому підходить для встановлення в захищених місцях.



Рисунок 2.7 — TP-Link TL-SG1210P [40]

D. TP-Link JetStream TL-SG1218MPE - 16-портовий Easy Smart гігабітний PoE + комутатор з двома SFP-портами. Загальний споживана потужність PoE становить до 192 Вт. Розумне керування живленням дозволяє захищати комутатор від перевантажень.



Рисунок 2.8 — TP-Link JetStream TL-SG1218MPE [41]

Серед розглянутих варіантів, TP-Link JetStream TL-SG1218MPE є найкращим вибором для зовнішнього використання в сенсорних мережах виявлення дронів.

2.5 Сервер

Сервер виконує ключову роль у зборі, обробці та зберіганні даних, отриманих від сенсорних вузлів. Вибір відповідного серверного обладнання забезпечує надійність, масштабованість та ефективність функціонування всієї системи.

Відповідно до технічних рекомендацій розробників рішень відеоаналітики, таких як Milestone та Bosch, для роботи з мережею з 8–16 IP-камер у форматі Full HD (1080p) із частотою 15–25 кадрів/с потрібно використовувати сервер з процесором Intel Xeon або AMD EPYC,

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

28

щонайменше з 8 ядрами (16 потоками), об'ємом оперативної пам'яті від 64 до 128 ГБ DDR4 ECC, а також із швидким SSD-сховищем для буферизації відеопотоків (наприклад, NVMe SSD 1 ТБ) [42].

Потреба у використанні ECC RAM (оперативної пам'яті з корекцією помилок) обґрунтована вимогами до високої надійності безперервної роботи: помилки в пам'яті можуть спричинити критичні збої в програмній частині системи, що недопустимо в режимі 24/7. Це підтверджується даними дослідження Google, які показують, що без ECC при тривалому навантаженні ризик виникнення помилок у RAM зростає в десятки разів [43].

Dell PowerEdge R640 – компактний 1U сервер, що підтримує до двох процесорів Intel Xeon Scalable, до 64 ГБ оперативної пам'яті та до 12 2.5-дюймових накопичувачів. Оснащений вбудованими засобами безпеки та управління.



Рисунок 2.9 — Dell PowerEdge R640 [44]

HPE ProLiant DL380 Gen10 – універсальний 2U сервер з підтримкою до двох процесорів Intel Xeon Scalable, до 64 ГБ DDR4 SmartMemory та широкими можливостями масштабування. Підтримує до 20 NVMe-дисків для високошвидкісного зберігання даних.



Рисунок 2.10 — HPE ProLiant DL380 Gen10 [45]

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

HPE Apollo 4200 Gen10 – сервер, оптимізований для обробки великих обсягів даних, з підтримкою до 28 LFF або 54 SFF накопичувачів. Ідеально підходить для систем, що потребують високої ємності зберігання.



Рисунок 2.11 — HPE Apollo 4200 Gen10 [46]

Supermicro SuperServer SYS-322GA-NR – високопродуктивний сервер з підтримкою до двох процесорів Intel Xeon Scalable, до 128 ГБ DDR5 пам'яті та до 14 E1.S NVMe накопичувачів. Оснащений до 10 PCIe 5.0 x16 слотів для розширення.



Рисунок 2.12 — Supermicro SuperServer SYS-322GA-NR [47]

Усі ці сервери мають підтримку ECC, апаратного RAID, віддаленого управління (BMC/IPMI) та змінних блоків живлення. Пропускна здатність вбудованих мережевих інтерфейсів (двох або чотирьох портів 1/10GbE) дозволяє приймати відеопотоки від десятків сенсорів без втрат даних.

Звичайні настільні ПК зазвичай не мають ні ECC-пам'яті, ні апаратного RAID, ні дублювання живлення, а також не призначені для роботи в режимі 24/7. Саме тому їх використання доцільне лише в тестових або демонстраційних версіях системи, але не у виробничих умовах з підвищеною надійністю.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

30

2.6 Маршрутизатор

У системах виявлення дронів вибір маршрутизатора має базуватися на таких критеріях:

- підтримка високої швидкості передачі даних для обробки відео- та аудіопотоків;
- наявність достатньої кількості Gigabit Ethernet та SFP портів для підключення сенсорів та інших мережевих пристроїв;
- можливість живлення пристроїв через Ethernet-кабелі;
- стійкість до екстремальних температур та вологих умов, особливо при розгортанні в польових умовах;
- підтримка сучасних протоколів управління та безпеки.

Розглянуті варіанти маршрутизаторів:

А. Cisco ISR 4331 – пристрій, який забезпечує пропускну здатність до 300 Мбіт/с і оснащений трьома Gigabit Ethernet-портами. Він підтримує підключення модулів розширення, має вбудовані функції безпеки та допускає масштабування системи. Основне призначення — використання в серверних приміщеннях, тож для експлуатації на відкритому повітрі потребує додаткового захисту. Вартість пристрою є високою, що робить його орієнтованим переважно на корпоративний сегмент.



Рисунок 2.13 — Cisco ISR 4331 [48]

В. MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+. Цей пристрій забезпечує пропускну здатність до 16 Гбіт/с і обладнаний сімома Gigabit Ethernet-портами, одним комбінованим портом (SFP або Gigabit Ethernet) та одним

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		31

SFP+ портом. У ньому використовується 9-ядерний процесор, 2 ГБ оперативної пам'яті, а також реалізовано підтримку апаратного резервування. Для зручності моніторингу передбачено LCD-дисплей. Пристрій розрахований на встановлення в серверних приміщеннях і потребує додаткового захисту в разі експлуатації на відкритому повітрі. Попри досить високу ціну, він вирізняється вигідним співвідношенням вартості та продуктивності.



Рисунок 2.14 — MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+ [49]

С. Ubiquiti EdgeRouter 12. Цей пристрій забезпечує пропускну здатність до 6,8 Гбіт/с і оснащений десятьма Gigabit Ethernet-портами та двома SFP-інтерфейсами. Він підтримує комутацію на другому рівні моделі OSI, має функціональність PoE In/Out та вирізняється компактним дизайном. Діапазон робочих температур становить від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$, що дозволяє використовувати його на відкритому повітрі в умовах помірного клімату. Завдяки доступній ціні пристрій є оптимальним варіантом для малих і середніх мережевих рішень.



Рисунок 2.15 — Ubiquiti EdgeRouter 12 [50]

Обрано маршрутизатор MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+, оскільки він забезпечує лінійну пропускну здатність до 16 Гбіт/с, що суттєво перевищує потреби системи, навіть із запасом на майбутнє масштабування. Завдяки

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		32

наявності 7 гігабітних портів Ethernet, комбінованого порту та 1 SFP+ (10G), він дозволяє реалізувати гнучке зонування мережі, включно з оптоволоконними каналами. Потужний 9-ядерний процесор Tile-Gx та підтримка RouterOS з можливістю налаштування VLAN, VPN, Firewall і QoS дозволяють ефективно розмежовувати трафік між сервером, інтерфейсом адміністрування та зовнішнім доступом. У порівнянні з конкурентами, пристрій не потребує ліцензійної підтримки, а його ціна на ринку становить близько 20000 грн [49], що є прийнятною в межах бюджету невеликої або середньої сенсорної системи.

2.7 Живлення

Ефективне та надійне енергоживлення є критичним компонентом системи виявлення дронів, особливо в умовах мобільного розгортання, віддалених локацій або нестабільного електропостачання.

Сенсорні вузли системи отримують живлення через технологію PoE, що дозволяє передавати електроенергію та дані по одному кабелю Ethernet. Це спрощує інфраструктуру, зменшує кількість кабелів та підвищує надійність системи.

Комутатори, сервери та маршрутизатори зазвичай живляться від стандартної електромережі змінного струму (220 В). Однак, у випадках відсутності стабільного електропостачання або для забезпечення мобільності системи, необхідно передбачити альтернативні джерела живлення.

Загальна споживана потужність системи залежить від кількості сенсорних гілок і типу пристроїв у кожній з них. Одна типова гілка включає PoE-сенсор (наприклад, IP-камера або SDR-приймач), PoE-подовжувач та комунікаційний кабель. Наприклад, IP-камера Dahua IPC-C22EP споживає до 5 Вт, мікрофонний модуль на базі MAX9814 — до 0,5 Вт, а SDR-приймач Airspy Mini — до 2,5 Вт. Середній PoE-подовжувач, наприклад, POE-EX2001-W від UltraPoE, споживає $\approx 2,5$ Вт на передачу/підсилення сигналу в умовах максимального навантаження [35]. Таким чином, одна повноцінна сенсорна гілка (сенсор + подовжувач) може споживати 7–12 Вт.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

33

Система, що складається з 10 таких гілок — це вже 70–120 Вт. Додатково комутатор з підтримкою PoE (на кшталт TP-Link TL-SG1218MP) споживає до 50 Вт (без урахування навантаження на портах), маршрутизатор — до 30 Вт, сервер — до 300–500 Вт (залежно від конфігурації). Сумарне споживання всієї системи в активному режимі може досягати 500–700 Вт. Для автономної роботи протягом 8 годин необхідне джерело живлення з корисною ємністю 4–6 кВт·год, з урахуванням втрат у перетворювачах живлення та кабелях.

Варіанти організації енергоживлення:

А. Автономні блоки живлення. Портативні електростанції, такі як EcoFlow DELTA 2 Max, пропонують ємність до 2–6 кВт·год та підтримують потужність до 2400 Вт з можливістю короткочасного збільшення до 3600 Вт завдяки технології X-Boost. Ці пристрої можуть заряджатися від мережі, автомобіля або сонячних панелей, що робить їх універсальним рішенням для мобільних систем.

В. Живлення від стаціонарної мережі. У випадках доступності стабільного електропостачання, пристрої можуть житися безпосередньо від мережі змінного струму. Для захисту від перебоїв та коливань напруги рекомендується використовувати джерела безперебійного живлення (UPS), які забезпечують стабільне живлення та захист обладнання.

С. Акумуляторне живлення з використанням інверторів. У віддалених або тимчасових локаціях можна використовувати акумуляторні батареї в поєднанні з інверторами для перетворення постійного струму в змінний. Це дозволяє забезпечити живлення пристроїв без доступу до мережі. Наприклад, акумулятор ємністю 5 кВт·год може забезпечити роботу системи з потужністю 500 Вт протягом 10 годин.

Д. Сонячні панелі. Для автономної роботи системи можна використовувати сонячні панелі в поєднанні з акумуляторами. Наприклад, для забезпечення добового споживання 5 кВт·год при середньодобовому сонячному ресурсі 4 години необхідно встановити сонячні панелі сумарною потужністю близько 1.5 кВт. Це дозволить забезпечити цілодобову роботу

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

34

системи за умови правильного розрахунку потужності та ємності акумуляторів.

Додаткове обладнання:

А. Джерела безперебійного живлення (UPS). Для забезпечення безперервної роботи критичних компонентів системи, таких як сервери та комутатори, рекомендується використовувати UPS. Наприклад, моделі APC Smart-UPS або Eaton 9PX пропонують надійний захист та можливість моніторингу стану живлення .

В. Системи моніторингу енергоспоживання. Встановлення систем моніторингу дозволяє відстежувати споживання енергії в реальному часі, що сприяє оптимізації роботи системи та своєчасному виявленню потенційних проблем.

С. Резервні генератори. У випадках, коли інші джерела живлення недоступні або недостатні, можна використовувати резервні генератори на базі дизельного або бензинового палива. Вони забезпечують високу потужність та тривалий час роботи, але вимагають регулярного обслуговування та палива.

2.8 Висновки до розділу 2

У ході аналізу апаратної інфраструктури встановлено, що дротове з'єднання Ethernet на базі кабелю Cat6 з екрануванням є оптимальним вибором для сенсорної мережі виявлення дронів. Застосування PoE дозволяє значно спростити живлення сенсорних вузлів, а подовжувачі з енергоспоживанням 2–4 Вт дають змогу подолати обмеження по довжині ліній. Комутатор TP-Link JetStream TL-SG1218MPE обрано за оптимальне поєднання технічних характеристик і надійності. Сервер Dell PowerEdge R640 використовується в задачах обробки відео й аудіо потоків у режимі реального часу. Як маршрутизатор доцільно використати MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+ завдяки підтримці SFP+ інтерфейсів і масштабованості. Живлення системи реалізується за допомогою PoE, UPS та резервних джерел з урахуванням споживання до 500 Вт, що забезпечує її автономність та стійкість до збоїв.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		35

3 ПРОЕКТУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Структурна схема сенсорної мережі

Структурна схема (рис. 3.1) відображає принципову організацію мережі для збору, обробки та передачі даних від сенсорів до глобальної системи моніторингу.

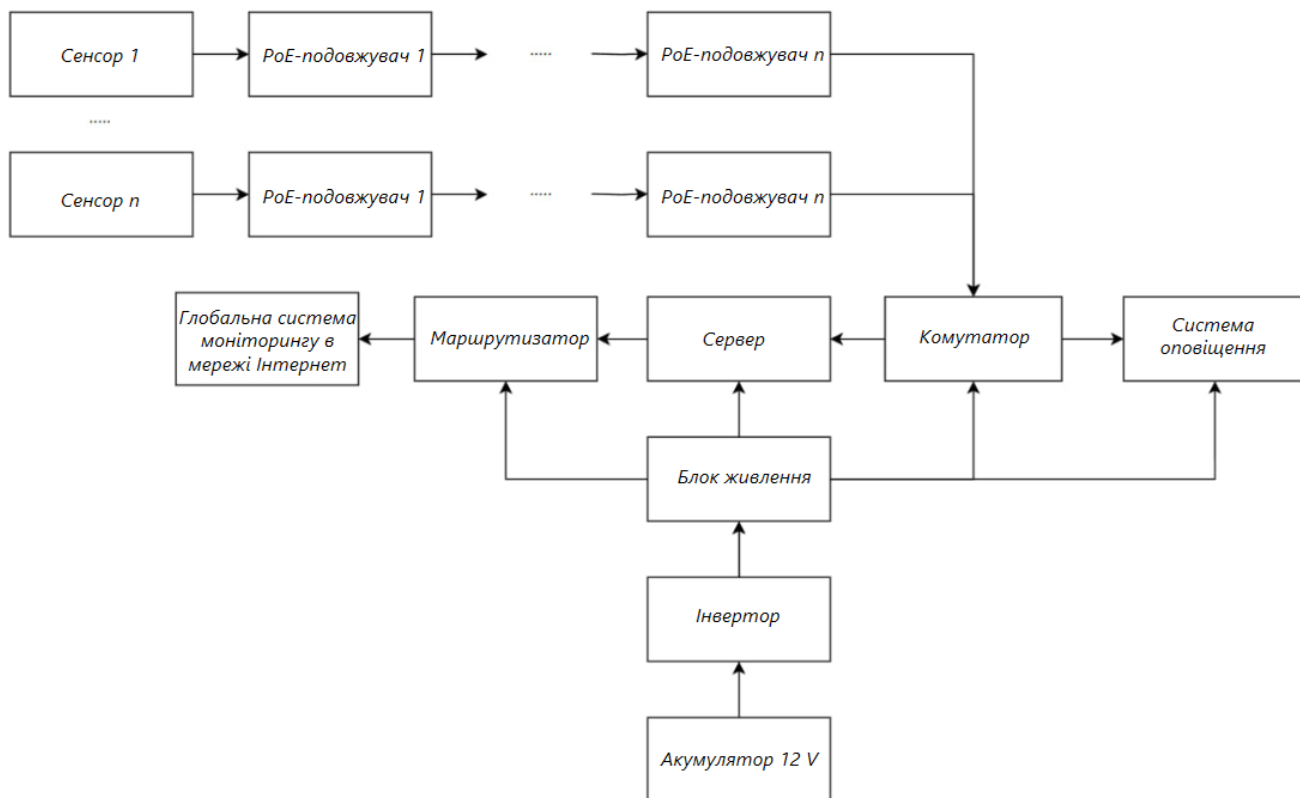


Рисунок 3.1 — Структурна схема сенсорної мережі

Сенсорні вузли різних типів — акустичні, оптичні та радіочастотні — здійснюють первинне виявлення дронів та передають дані до комутатора. Через PoE-подовжувачі передача сигналу і живлення можлива на відстань понад 100 метрів. Кожен сенсор з'єднаний з керованим PoE-комутатором, який виконує функцію розподілу живлення та маршрутизації трафіку.

З комутатора дані надходять на сервер, що відповідає за зберігання, попередню обробку та передачу виявлених подій. Сервер підключений до маршрутизатора, який забезпечує вихід у глобальну мережу (Інтернет), зокрема для передавання інформації оператору або до централізованої системи аналізу.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

36

Живлення до всієї інфраструктури подається від акумулятора 12 В через інвертор, що формує змінну напругу 220 В для живлення комутатора, сервера й маршрутизатора. Блок живлення забезпечує стабілізацію параметрів електроживлення та захищає обладнання.

Завдяки модульному підходу дана схема може масштабуватись до більшої кількості сенсорів, змінюватися залежно від сценаріїв розгортання та працювати в умовах відсутності стаціонарного електропостачання.

3.2 Проектування топології мережі

Топологія сенсорної мережі визначає спосіб з'єднання окремих вузлів — сенсорів, комутаційного обладнання, сервера та маршрутизатора — у єдину структуру, здатну ефективно забезпечити збір і передавання даних для виявлення дронів. Основним критерієм вибору топології є забезпечення надійності, простоти розгортання, економічної ефективності та масштабованості.

Для реалізації поставленого завдання найбільш доцільною є зіркоподібна топологія, за якої всі сенсорні вузли підключаються безпосередньо до центрального комутатора. Така конфігурація дозволяє кожному сенсору працювати незалежно від інших, мінімізує вплив відмови одного вузла на роботу всієї системи та значно спрощує ідентифікацію несправних компонентів. Крім того, зіркоподібна топологія добре сумісна з технологією PoE, що дає змогу передавати як дані, так і живлення по одному кабелю, істотно знижуючи витрати на прокладення інженерних мереж.

Вибір альтернативних конфігурацій, таких як повнозв'язна, сітчаста, шинна або кільцева топології, не виправданий у даному випадку. Повнозв'язна та сітчаста схеми забезпечують високу відмовостійкість, однак вимагають надмірної кількості кабельних з'єднань і мережевого обладнання, що неприйнятно з погляду вартості та складності реалізації у мобільних або тимчасових розгортаннях. Шинна топологія створює єдину точку відмови — у разі пошкодження магістрального кабелю втрачається зв'язок одразу з усіма вузлами. Кільцева структура хоча й дозволяє побудову резервних каналів,

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
						37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

однак ускладнює реалізацію PoE через обмеження стандартів та відсутність підтримки PoE-ретрансляції у більшості промислових комутаторів.

Зіркоподібна топологія забезпечує високу гнучкість — у разі потреби в масштабуванні достатньо додати новий сенсор до вільного порту комутатора або встановити додатковий комутатор. Це особливо актуально для систем, які працюють у змінних умовах або потребують адаптації до нових зон спостереження без складної реконфігурації мережі.

Основним обмеженням обраної конфігурації є залежність від центрального комутатора. У разі його виходу з ладу втрачається зв'язок з усіма підключеними вузлами. Для підвищення надійності в проєкті передбачено резервування критичних каналів зв'язку. Для магістральних ліній між комутатором і сервером можливе застосування двох фізично розділених каналів, що перемикаються автоматично за допомогою протоколів STP або LACP. У найбільш критичних ділянках мережі також допускається встановлення резервних комутаторів, які дублюють функції основних пристроїв.

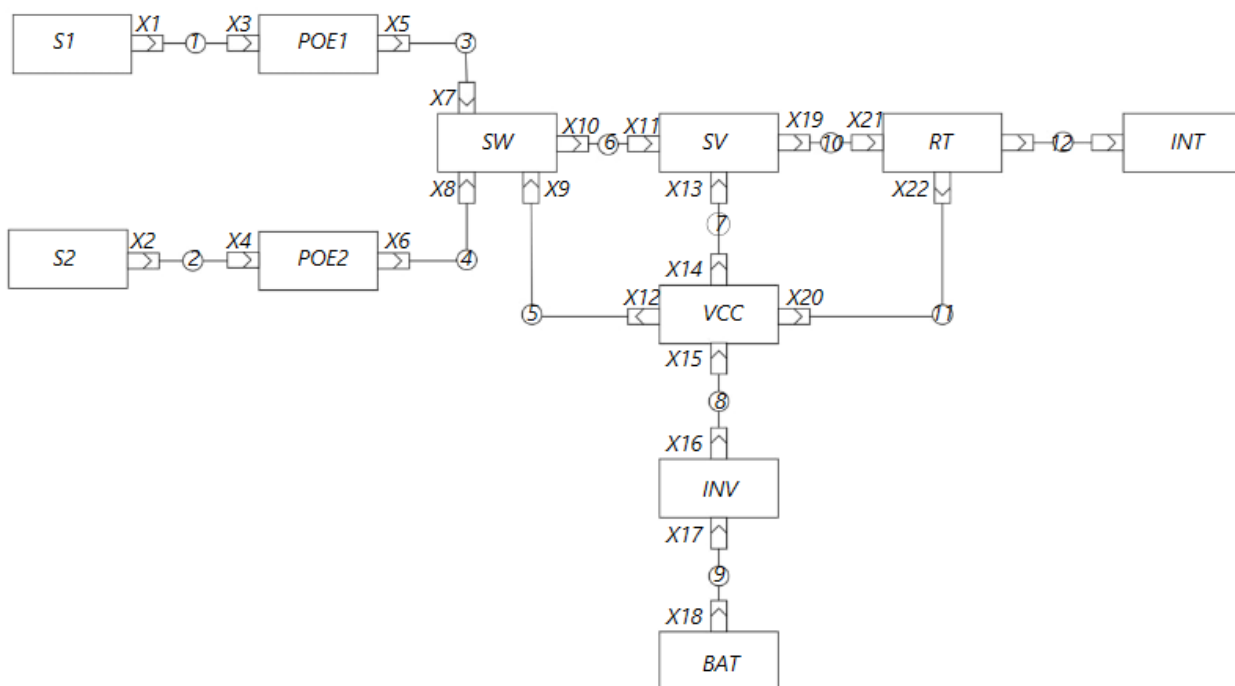


Рисунок 3.2 — Схема електрична з'єднань сенсорної мережі

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

3.3 Схема розташування мережі

Ефективність роботи сенсорної мережі для виявлення дронів значною мірою залежить від грамотного розміщення сенсорів з урахуванням особливостей рельєфу, наявності забудови, типу місцевості та джерел перешкод. Залежно від характеру середовища розгортання — міська територія чи відкритий простір — принципи встановлення сенсорів мають певні відмінності, проте підпорядковуються спільним критеріям: максимальне просторове покриття, мінімізація «сліпих зон», забезпечення лінії прямої видимості (для оптичних сенсорів), та зменшення впливу шумових і радіочастотних завад.

У відкритій місцевості, наприклад у полях, на периметрах військових об'єктів або в приаеродромних зонах, доцільним є розміщення сенсорів по периметру контрольованої території із частковим перекриттям зон виявлення. Оптичні сенсори (ІР-камери), що потребують прямої видимості, розміщуються на щоглах висотою 3–6 метрів, орієнтуючись на потенційні напрямки наближення дронів. Радіочастотні приймачі монтуються вище (6–10 м), оскільки висота антен суттєво впливає на якість прийому у відкритому просторі. Акустичні сенсори встановлюються на відстані 100–200 метрів один від одного, з урахуванням дальності їх ефективного виявлення (до 500–600 м для дронів з електродвигунами), із обов'язковим уникненням розміщення поблизу шумових джерел (генератори, дороги тощо).

У міських умовах, де значну роль відіграють багатоповерхова забудова, фонові шуми та електромагнітні завади, розміщення сенсорів вимагає особливої уваги. З метою уникнення «сліпих зон» через будівлі, оптичні сенсори слід розміщувати на дахах будівель або на освітлювальних опорах, спрямовуючи їх у зони з низькою забудовою або відкритими вулицями. Радіочастотні сенсори повинні розташовуватись на висоті щонайменше 5 метрів для зниження впливу міського затінення сигналів, а також подалі від зон з високою щільністю бездротових пристроїв (Wi-Fi, LTE). Акустичні сенсори у місті доцільно застосовувати лише у відносно тихих районах або на

дах, де зменшується рівень наземного шуму. Крім того, важливо враховувати відбиття та дифракцію звукових хвиль у вуличних каньйонах, що може призводити до хибних спрацьовувань.

Мінімізація відстаней між сенсорами забезпечує вищу щільність покриття, проте впливає на збільшення навантаження на мережу та споживання енергії — отже, необхідно досягти балансу між ефективністю виявлення та ресурсними обмеженнями.

Для оптичних сенсорів необхідно забезпечити вільну лінію прямої видимості у межах їх дальності дії — зазвичай 30–100 метрів для бюджетних ІР-камер, до 250–300 метрів для систем з оптичним зумом.

Приклад розгортання у полі зображено на рис. 3.3.

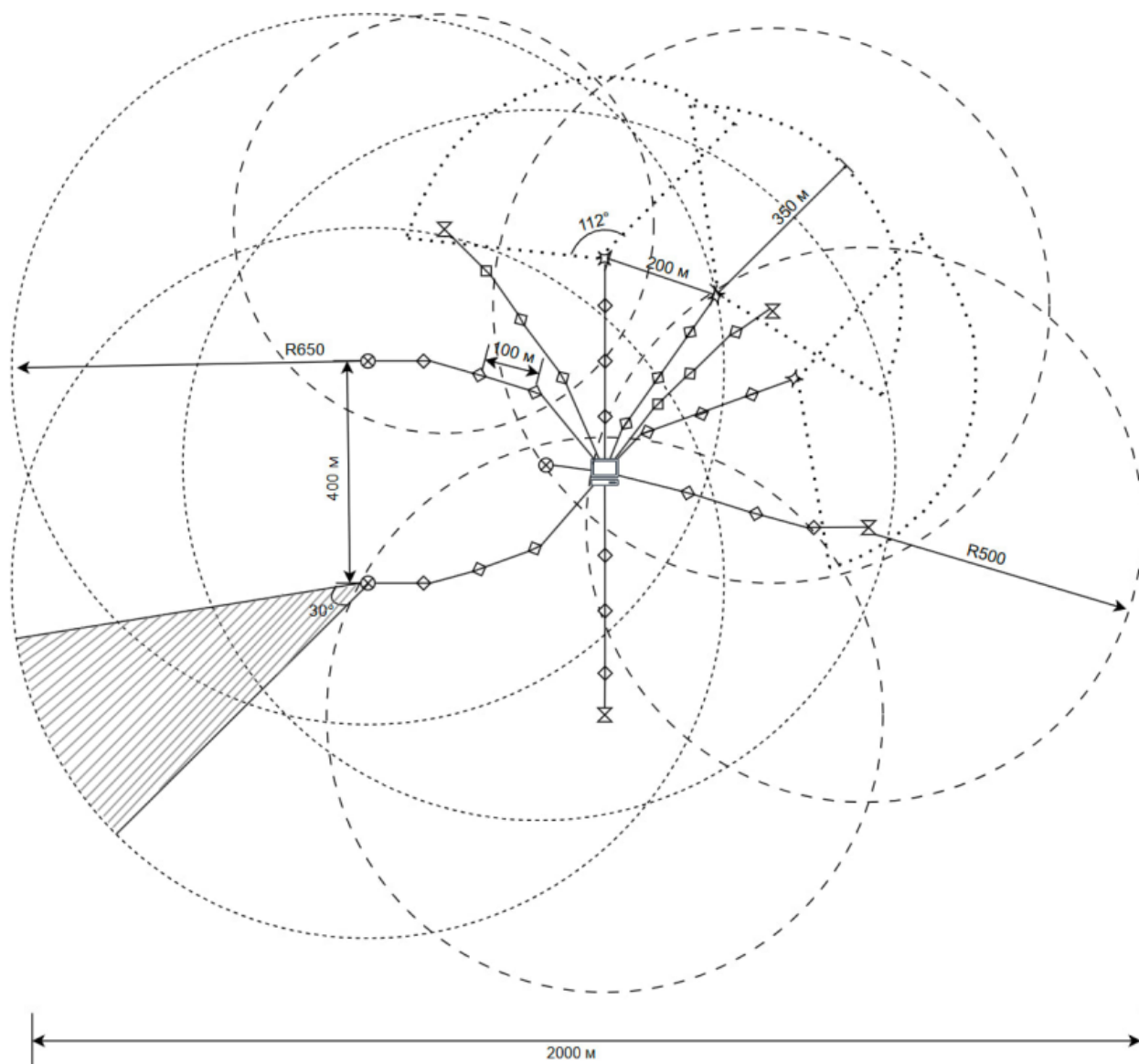


Рисунок 3.3 — Схема розташування сенсорної мережі у полі

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист
40

3.4 Висновки до розділу 3

Проведений етап проектування сенсорної мережі дозволяє виявити ключові вимоги до її архітектури та комунікаційної інфраструктури. Водночас було враховано необхідність підтримки резервування критичних компонентів для підвищення відмовостійкості.

Обґрунтування фізичного середовища передавання даних підтверджує переваги дротових рішень, зокрема використання кабелю FTP Cat6 Outdoor U/FTP із захистом від УФ-випромінювання, вологи та механічних пошкоджень. Такий вибір забезпечує надійне функціонування в умовах відкритого середовища, що є критично важливим для систем виявлення дронів.

Побудова принципової схеми комунікаційних зв'язків у поєднанні з аналізом зон покриття дозволяє врахувати фізичні та технічні обмеження при розміщенні сенсорних вузлів, зокрема з урахуванням прямих ліній видимості, електромагнітних перешкод та шумового фону. Результатом стало формування технічно обґрунтованого проєктного рішення, яке може бути покладене в основу реального впровадження мережі в умовах обмежених ресурсів і складного середовища експлуатації.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
						41
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 ПІДТВЕРДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

4.1 Розрахунки пропускної здатності і втрат

Кожен сенсорний вузол включає IP-камеру Dahua IPC-C22EP, що, відповідно до технічної документації, споживає пропускну здатність у межах 2–5 Мбіт/с за умов трансляції відеопотоку у форматі 720p з частотою 15 кадрів/с при використанні кодека H.264. Додатково, передача аудіосигналу з мікрофона на базі модуля MAX9814 потребує до 300 Кбіт/с. У випадку використання SDR-приймачів, зокрема Airspy Mini, споживана пропускна здатність досягає 6 Мбіт/с залежно від параметрів захоплення спектра (до 2,4 МГц) [14].

Сумарне навантаження на один сенсорний вузол становить 10–12 Мбіт/с. За умови використання десяти сенсорних вузлів у системі, загальна пропускна здатність всієї мережі не перевищує 150 Мбіт/с, що повністю укладається в межі стандарту Gigabit Ethernet (до 1 Гбіт/с).

Енергоспоживання одного вузла визначається сукупною потужністю всіх компонентів. Так, IP-камера Dahua IPC-C22EP споживає до 5 Вт, мікрофон — близько 0,5 Вт, SDR-приймач — до 2,5 Вт, а активний PoE-подовжувач (наприклад, POE-EX2001-W) — до 2,5 Вт [35]. Відповідно, середнє споживання одного сенсорного вузла становить 10–12 Вт.

Сумарне навантаження на систему можна оцінити наступним чином:

- сенсорні вузли — до 120 Вт;
- комутатор (типу Inscapе Data LPS3802ATM-T1) — до 80 Вт;
- сервер на базі AMD Ryzen 7 7700X — до 250–300 Вт;
- маршрутизатор — до 40 Вт.

Загальна потужність, необхідна для живлення всієї інфраструктури, становить 450–550 Вт.

Далі йде розрахунок максимальної кількості подовжувачів та відстані до сенсора.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		42

Вихідні дані для розрахунку:

- комутатор: IEEE 802.3at (PoE+) – до 80 Вт;
- споживання сенсорного вузла – до 12 Вт;
- один подовжувач (POE-EXT3001GP) споживає ~2.5 Вт [37];
- тип кабелю – Cat6 FTP Outdoor, опір по парі ≈ 6.5 Ом/100 м;
- напруга на виході PoE-комутатора – ~54 В;
- мінімальна напруга на сенсорі – ~44 В (згідно IEEE 802.3at);
- використовується каскадне підключення подовжувачів (до 3-х, згідно специфікацій Linovision [51])

Енерговтрати на кожні 100 м кабелю Cat6 (2 пари живлення, опір 13 Ом):

$$P_{\text{кабель}} = I^2 R.$$

При споживанні 12 Вт:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{12}{48} \approx 0,25 \text{ А.}$$

Втрати на 100 м:

$$P_{\text{втрати}} = 0,25^2 \cdot 13 = 0,8125 \text{ Вт.}$$

Втрати напруги:

$$U_{\text{втрати}} = I R = 0,25 \cdot 3,25 \text{ В.}$$

Загальні втрати по 3-х подовжувачах (3x100 м + споживання):

- кабельні втрати: $3 \times 3,25 \text{ В} \approx 9,75 \text{ В}$;
- подовжувачі: $3 \times 2,5 \text{ Вт} = 7,5 \text{ Вт} \approx 0,14 \text{ А} \rightarrow$ ще $\approx 2,5 \text{ В}$ втрати на подовжувачах;
- загальна втрата: $\sim 12,25 \text{ В} \rightarrow$ залишається $\sim 41,75 \text{ В}$.

Отже, максимально припустима кількість подовжувачів – не більше 3-х, якщо хочемо забезпечити напругу $> 44 \text{ В}$.

Для живлення відеосенсорів можливо використати до 2 PoE-подовжувачів, при цьому максимальна відстань до сенсора складе 200 м.

Для живлення акустичних сенсорів можливо використати до 3 PoE-подовжувачів, при цьому максимальна відстань — 300 м.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		43

Для SDR-приймачів на низьке споживання (до 1 Вт) — до 3 подовжувачів (300 м); для високопотужних (5 Вт) — до 2 подовжувачів (200 м).

Споживання потужностей кожного типу сенсору (з урахуванням споживання PoE-подовжувачем 2,5 Вт):

- акустичний сенсор – 17,5 Вт;
- оптичний сенсор – 12,5 Вт;
- РЧ-сенсор – 12 Вт.

4.2 Моделювання мережі в середовищі Cisco Packet Tracer

Для перевірки логічної побудови сенсорної мережі було розроблено спрощену модель у середовищі Cisco Packet Tracer (рис. 4.1). Модель ілюструє базову топологію на основі комутатора, десятих вузлів-сенсорів (умовно реалізованих як кінцеві пристрої) та центрального сервера обробки даних.

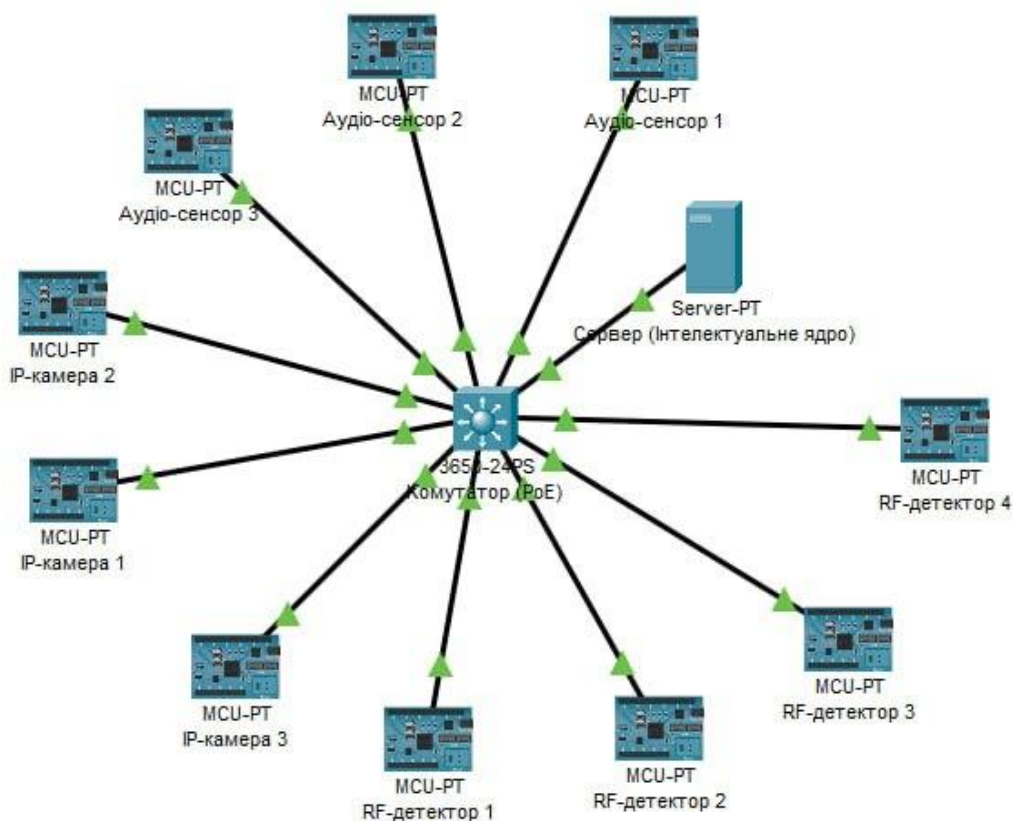


Рисунок 4.1 — Загальний вид моделі сенсорної мережі в Cisco Packet Tracer

У моделі сенсорної мережі було реалізовано розділення логічної адресації на три підмережі відповідно до функціонального призначення пристроїв.

Сенсорні вузли отримали IP-адреси в діапазоні 192.168.1.10 – 192.168.1.19 (підмережа датчиків), а сервер обробки даних має адресу 192.168.1.255 (підмережа керування та зберігання). Для всіх пристроїв задано стандартну маску підмережі 255.255.255.0.

Для перевірки коректності призначення IP-адрес між компонентами моделі було використано утиліту ping. Кожен сенсорний вузол успішно досягнув серверу обробки даних із середнім часом відгуку близько 1 мс, що підтверджує правильність конфігурації мережевого інтерфейсу.

Також було перевірено кількість доступних портів на комутаторі. У моделі реалізовано комутатор з 24 портами, з яких 10 зарезервовано для підключення сенсорів, 1 — для сервера. Таким чином, забезпечується достатня кількість портів для подальшого масштабування системи.

З метою перевірки працездатності мережі на прикладному рівні було змодельовано простий трафік передачі даних між сенсором та сервером за допомогою тестового HTTP-запиту. На рисунку 4.2 зображено налаштування DHCP-сервера.

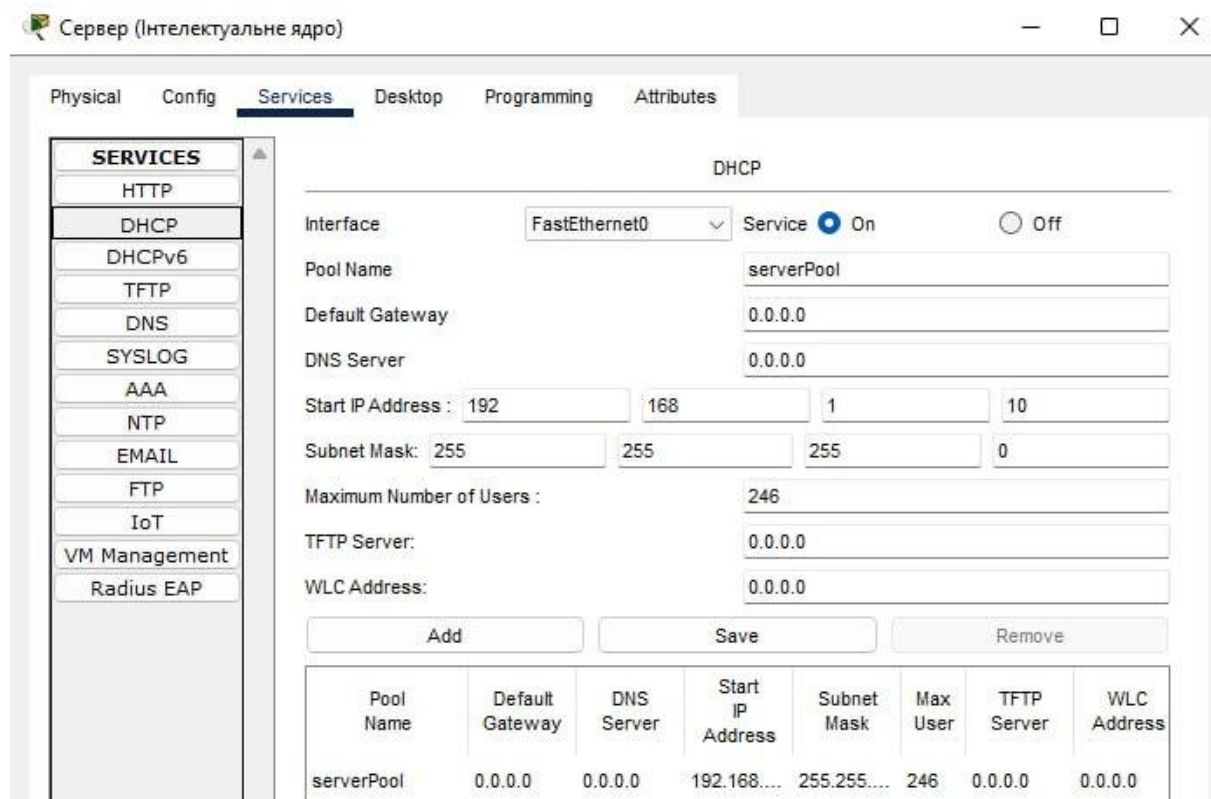
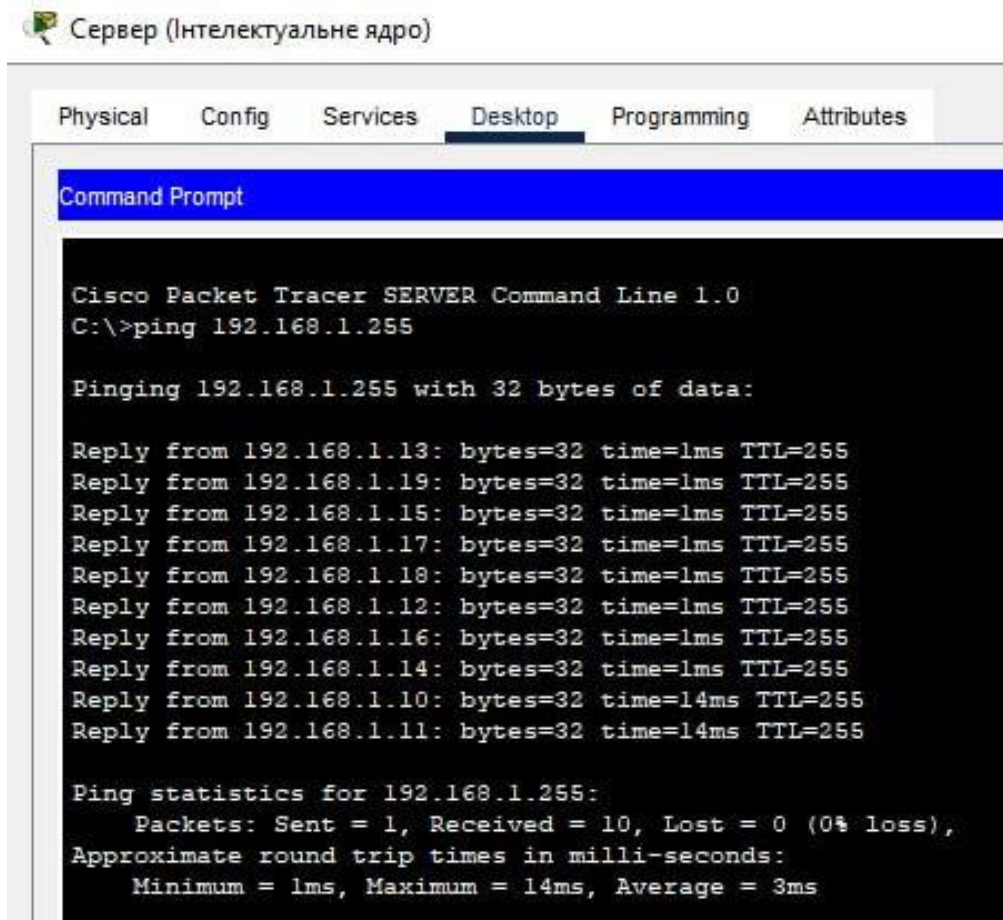


Рисунок 4.2 — Вікно налаштувань DHCP-сервера

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

На рисунку 4.3 зображено результат виконання діагностичної команди ping, що демонструє стабільний обмін пакетами без втрат.



```
Сервер (Інтелектуальне ядро)
Physical Config Services Desktop Programming Attributes
Command Prompt
Cisco Packet Tracer SERVER Command Line 1.0
C:\>ping 192.168.1.255

Pinging 192.168.1.255 with 32 bytes of data:

Reply from 192.168.1.13: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.19: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.15: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.17: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.18: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.12: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.16: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.14: bytes=32 time=1ms TTL=255
Reply from 192.168.1.10: bytes=32 time=14ms TTL=255
Reply from 192.168.1.11: bytes=32 time=14ms TTL=255

Ping statistics for 192.168.1.255:
    Packets: Sent = 1, Received = 10, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 1ms, Maximum = 14ms, Average = 3ms
```

Рисунок 4.3 — Результат перевірки з'єднання з усіма давачами та роботи DHCP-сервера

На рисунку 4.4 зображено список значень потужностей для кожного давача (з урахуванням споживаної потужності 3-х PoE-подовжувачів біля кожного сенсора).

```

Комутатор (PoE)
Physical Config CLI Attributes
IOS Command Line Interface

%LINK-3-UPDOWN: Interface GigabitEthernet1/0/6, changed state to down
%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface GigabitEthernet1/0/6, changed state to down
%ILPOWER-5-POWER_GRANTED: Interface Gig1/0/6: Power granted
%LINK-5-CHANGED: Interface GigabitEthernet1/0/6, changed state to up
%LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface GigabitEthernet1/0/6, changed state to up

Switch>show power inline
Available:390.0(w) Used:138.0(w) Remaining:252.0(w)

Interface Admin Oper Power Device Class Max
(Watts)
-----
Gig1/0/1 auto on 17.5 Аудио-сенсор 1n/a 30.0
Gig1/0/2 auto on 17.5 Аудио-сенсор 2n/a 30.0
Gig1/0/3 auto on 17.5 Аудио-сенсор 3n/a 30.0
Gig1/0/4 auto on 12.5 IP-камера 2 n/a 30.0
Gig1/0/5 auto on 12.5 IP-камера 1 n/a 30.0
Gig1/0/6 auto on 12.5 IP-камера 3 n/a 30.0
Gig1/0/7 auto on 12.0 RF-детектор 1n/a 30.0
Gig1/0/8 auto on 12.0 RF-детектор 2n/a 30.0
Gig1/0/9 auto on 12.0 RF-детектор 3n/a 30.0
Gig1/0/10 auto on 12.0 RF-детектор 4n/a 30.0
Gig1/0/11 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/12 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/13 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/14 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/15 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/16 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
Gig1/0/17 auto off 0.0 n/a n/a 30.0
--More--

```

Рисунок 4.4 — Список значень потужностей для кожного давача

Варто зазначити, що для повноцінної перевірки пропускної здатності, зокрема для відео- чи аудіопотоків, слід використовувати реальне обладнання або професійні середовища моделювання, що підтримують емуляцію мережевого трафіку на рівні протоколів RTP, RTSP тощо. Cisco Packet Tracer надає лише базову функціональність, достатню для первинної перевірки конфігурації, IP-адресації та взаємодії компонентів.

4.3 Економічні розрахунки

Для реалізації сенсорної мережі виявлення дронів було обрано низку апаратних компонентів. Нижче наведено перелік основного обладнання з орієнтовними цінами станом на травень 2025 року.

Таблиця 2 — Вартість всіх компонентів системи

№	Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	IP-камера Dahua IPC-C22EP	3	1800	5400
2	Акустичний датчик ZVOOK NW2	3	21110	63330
3	SDR-приймач Airspy Mini	4	3000	12000
4	PoE-подовжувач POE-EXT3001GP	20	1200	24000
5	Комутатор Inscape Data LPS3802ATM-T1	1	15000	15000
6	Сервер	1	пр. 50000	50000
7	Маршрутизатор з підтримкою Gigabit Ethernet	1	2500	2500
8	Кабель Cat6 FTP Outdoor	3000 м	15	45000
9	Герметичні коробки для з'єднань (IP65)	10	120	1200
10	Комплект кріплень для сенсорів	10	100	1000
11	Кабельні стяжки (100 мм, набір)	5	40	200
12	Ущільнюючі сальники для вводу кабелю	20	25	500
13	Клемна коробка (220 В, IP54)	2	180	360

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PE11.468213.001 ПЗ

Лист

48

Загальна вартість обладнання для побудови сенсорної мережі виявлення дронів становить 220490 грн. Ця сума також враховує запасні частини та витратні матеріали. Вартість може змінюватися залежно від конкретних умов закупівлі, обраних постачальників та ринкових коливань цін.

4.4 Інструкція з розгортання мережі

Розгортання сенсорної мережі для виявлення дронів потребує чітко структурованого алгоритму дій, який враховує як топологічні, так і інженерні особливості території. Нижче наведено послідовність дій, необхідних для впровадження апаратної інфраструктури (рис.4.3).

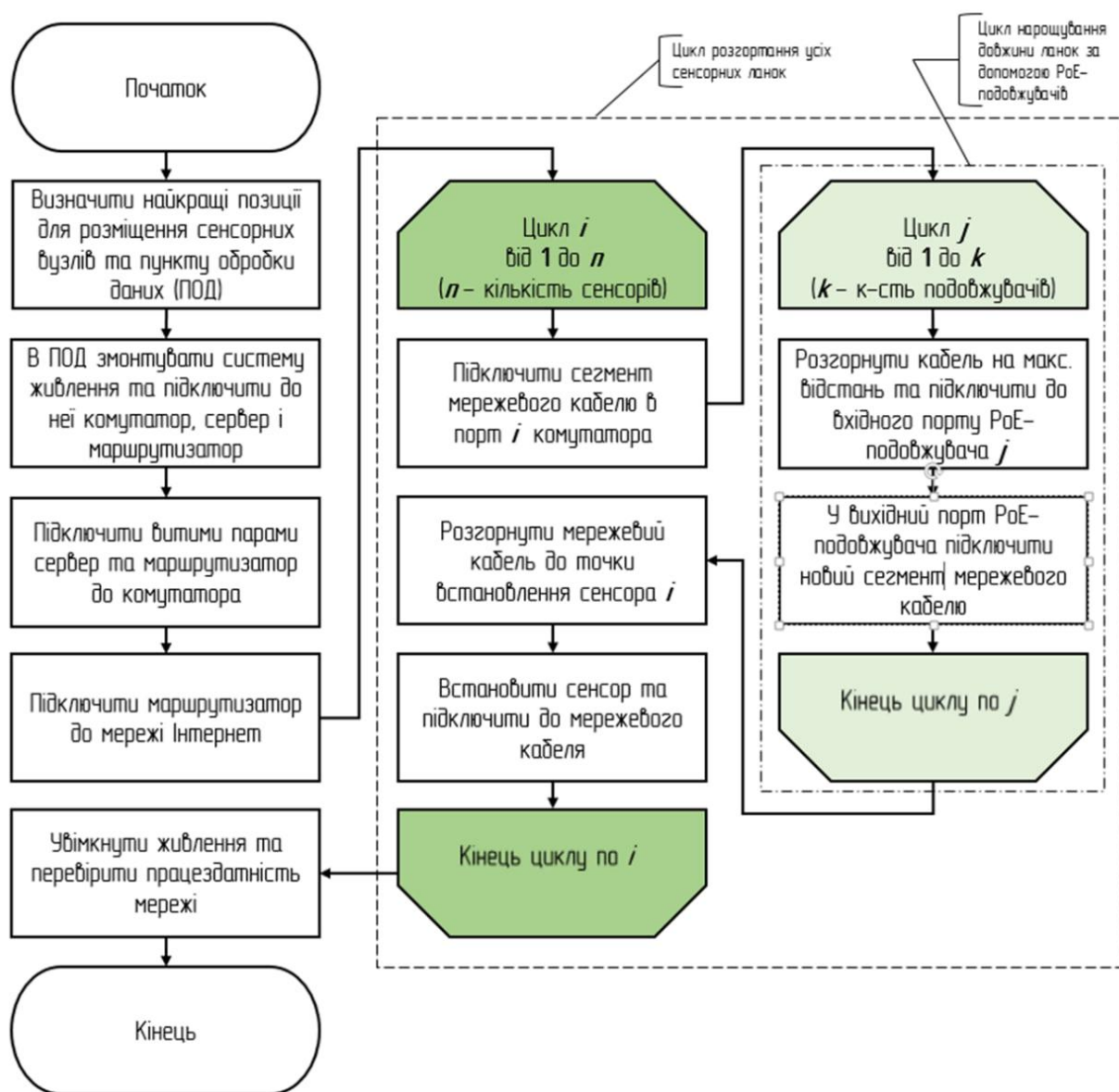


Рисунок 4.5 — Алгоритм розгортання мережі

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

А. Аналіз об'єкта розгортання. На початковому етапі здійснюється аналіз географічних та інженерних характеристик території. Визначаються ключові параметри: рельєф, наявність перешкод (будівель, лісонасаджень), зони акустичних або радіочастотних завад, а також площа покриття, яку має забезпечувати сенсорна мережа. На підставі аналізу формуються вимоги до кількості та типів сенсорних вузлів.

В. Визначення місць встановлення сенсорних вузлів. Проводиться планування точок монтажу сенсорів відповідно до карти покриття. Основними критеріями розміщення є: забезпечення прямої лінії видимості для оптичних сенсорів, мінімізація шумових перешкод для акустичних пристроїв, а також відсутність джерел сильного електромагнітного випромінювання поблизу SDR-приймачів. Оптимальна висота розміщення вузлів визначається згідно з характеристиками сенсорів.

С. Прокладання ліній зв'язку. Мережа реалізується на базі екранованої вити пари типу Cat6 (FTP/SFTP) зі спеціалізованим зовнішнім покриттям (наприклад, CMX). Прокладання виконується в захисних гофрованих трубах або кабельних каналах із дотриманням максимально допустимої довжини сегмента (100 метрів згідно зі стандартом IEEE 802.3). У випадках перевищення цієї довжини планується встановлення PoE-подовжувачів.

Д. Монтаж PoE-подовжувачів. На відрізках мережі, довжина яких перевищує 100 метрів, передбачається встановлення PoE-подовжувачів, таких як Linovision POE-EXT3001GP або POE-EX2001-W. Кожен подовжувач монтується у водонепроникному корпусі з рівнем захисту IP66/67. Подовжувачі встановлюються послідовно через кожні 90–100 м та підключаються згідно з розведенням портів Ethernet (IN/OUT).

Е. Встановлення комутаційного обладнання. PoE-комутатор, наприклад, Inscare Data LPS3802ATM-T1, розміщується у захищеній герметичній шафі (мінімальний рівень захисту IP65). До комутатора під'єднуються всі лінії від сенсорів через PoE-подовжувачі. У разі потреби масштабування передбачається резерв кількох вільних портів.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		50

Ф. Підключення сервера обробки даних. Сервер, що відповідає за обробку та зберігання потокових даних, підключається до комутатора через Gigabit Ethernet або SFP-інтерфейс. Після підключення здійснюється налаштування програмного забезпечення, призначеного для відеоаналітики, зберігання журналів, керування сенсорами та віддаленого доступу.

Г. Інтеграція маршрутизатора. Маршрутизатор MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+ підключається до комутатора або безпосередньо до сервера для забезпечення доступу до зовнішніх мереж. Конфігуруються базові параметри безпеки, маршрутизація, адресація, а також можливі канали VPN-з'єднання для захищеного зовнішнього доступу.

Н. Підключення джерел живлення. Основне живлення здійснюється від мережі 220 В через джерела безперебійного живлення (UPS). У випадках мобільного або віддаленого розгортання застосовуються автономні рішення: портативні електростанції (EcoFlow Delta Max), інвертори з акумуляторними батареями, а також сонячні панелі з контролерами заряду. Споживання кожного сегмента розраховується окремо, а вся система проєктується на основі пікових навантажень.

І. Тестування та запуск системи. Після завершення монтажу виконується поетапне тестування кожного вузла: перевірка живлення, зв'язку, правильності підключень, а також стабільності передачі відео- та аудіопотоків. Верифікується робота сервера, цілісність бази даних, журнали подій та можливість віддаленого доступу для операторів системи.

Для кращої наочності, було побудовану блок-схему з коротким описом кожного пункту з інструкції з розгортання мережі (див. Додаток Д).

4.5 Висновки до розділу 4

Вибрані сенсорні модулі (оптичні, акустичні, радіочастотні) можуть ефективно функціонувати в складі єдиної мережі за умови забезпечення необхідних параметрів каналу зв'язку (пропускна здатність не менше 10 Мбіт/с) та електроживлення (в середньому 5–12 Вт на вузол через PoE).

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		51

Орієнтовний бюджет розгортання мережі на 10 сенсорів становить від 160 до 200 тис. Грн, залежно від конфігурації. Інструкцію з розгортання мережі у відкритому середовищі з урахуванням кліматичних та механічних впливів забезпечує адаптацію системи до реальних умов експлуатації.

					<i>PE11.468213.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

ВИСНОВКИ

Запропоноване апаратне рішення забезпечує відповідність усім вихідним вимогам: пропускна здатність мережі, відстані до сенсорів, обсяг енергоспоживання та особливості умов експлуатації були враховані на етапі розрахунків і обґрунтовані відповідними інженерними рішеннями.

Вибір зіркоподібної топології мережі, з резервуванням каналів зв'язку, дозволяє забезпечити відмовостійкість та гнучкість у масштабуванні. Така архітектура дає змогу адаптувати систему до різних сценаріїв розгортання без значних змін конфігурації.

Використання реальних компонентів, доступних на ринку, таких як IP-мікрофони, IP-камери, SDR-приймачі, PoE-комутатори, подовжувачі, сервери, джерела живлення, доводить практичну реалізованість проєкту.

Змодельована в Cisco Packet Tracer мережа підтвердила працездатність проєктного рішення та відповідність конфігурації умовам, що висуваються до польових систем виявлення дронів.

Економічний розрахунок вартості реалізації системи показав адекватне співвідношення витрат до функціональних можливостей, а енергетичні розрахунки довели доцільність використання PoE-живлення та можливість автономної роботи за допомогою альтернативних джерел живлення.

Результати дипломного проєкту повністю відповідають поставленій меті та завданню. Архітектура проєкту є адаптивною, масштабованою та технічно обґрунтованою для практичного застосування. Розроблена апаратна інфраструктура може бути впроваджена у реальні системи охорони об'єктів критичної інфраструктури, аеропортів, військових зон або використовуватись у мобільних розгортаннях для периметрової безпеки.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		53

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Lee J., Yoon D., Jeong G. Acoustic anomaly detection on UAM propeller defect with acoustic dataset for crack of drone propeller (ADCP). P. 5–6. URL: <https://arxiv.org/pdf/2503.00790> (дата звернення: 14.04.2025).
2. Lahmann R. Deep-Sea acoustic neutrino detection and the AMADEUS system as a multi-purpose acoustic array. P. 2–5. URL: <https://arxiv.org/pdf/0901.0239> (дата звернення: 14.04.2025).
3. Krivonos A. Системи виявлення дронів і протидронні системи. URL: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/obzor/sistemy-obnaruzheniya-dronov-i-protivodronnye-sistemy/?srsltid=AfmBOooNthEJj5tRfPx0eA-vvYHIMo1IXLVuhP28PAyeSIFd9pIXFbLt> (дата звернення: 15.04.2025).
4. Counter drone technology: a review / H. González-Jorge et al. P. 2. URL: https://www.researchgate.net/publication/378122862_Counter_Drone_Technology_A_Review (дата звернення: 16.04.2025).
5. Unauthorized drone detection: experiments and prototypes / M. Asif Khan et al. P. 1–2. URL: <https://arxiv.org/pdf/2212.01436> (дата звернення: 16.04.2025).
6. Securing your airspace: detection of drones trespassing protected areas / A. Famili et al. P. 5–6. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.03760> (дата звернення: 16.04.2025).
7. Модуль електретного мікрофона MAX9814 купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod3912-modyl-mikrofona-max9814> (дата звернення: 17.04.2025).
8. Акустичний датчик ZVOOK NW2. *Hazardous – інтернет-магазин амуніції та спорядження*. URL: <https://hazardous.com.ua/akustychnyi-datchyk-nw2/> (дата звернення: 18.04.2025).
9. Акустичний сенсор Zvook NWO від FPV Offline на авто. *Hazardous – інтернет-магазин амуніції та спорядження*.

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		54

- URL: <https://hazardous.com.ua/nwo-vid-fpv-offline-na-avto/> (дата звернення: 18.04.2025).
10. Камера відеоспостереження IMOU Cue 2 (IPC-C22EP-A) 2Мп Wi-Fi внутрішня з мікрофоном. *NADZOR.UA*. URL: <https://nadzor.ua/uk/product/ip-kamera-dahua-imou-ipc-c22ep> (дата звернення: 19.04.2025).
11. Зовнішня IP-камера GreenVision GV-200-IP-H-DOS50VM-100 SD (Lite). *GreenVision - Україна*. URL: <https://greenvision.ua/ua/ip-kamery-videonablyudeniya/naruzhnaya-ip-kamera-greenvision-gv-200-ip-h-dos50vm-100-sd-lite> (дата звернення: 20.04.2025).
12. IP відеокамера Bosch NUC-51022-F4. *SMARTEL™ інтернет-магазин: офіційний сайт системного інтегратора в Україні | Київ, Харків*. URL: <https://smartel.ua/ua/product/ip-kamera-bosch-nuc-51022-f4> (дата звернення: 20.04.2025).
13. RTL SDR Blog V3 ▷ Купити SDR приймач RTL SDR V3 в Києві – A-Radio. *A-Radio – Інтернет-магазин зв'язку, радіо та електроніки*. URL: <https://a-radio.com.ua/rtl-sdr-blog-v3/> (дата звернення: 21.04.2025).
14. Airspy R2 SDR приймач «Radioscan» - *Радіостанції, рації, gps, навігатори, антени, відеореєстратори, радіоняні, відеоняні*. URL: <https://radioscan.com.ua/ua/p2071721018-airspy-sdr-priyomnik.html> (дата звернення: 21.04.2025).
15. Fobos SDR приймач 0.1 МГц-6 ГГц. *SHOP-GSM.UA*. URL: <https://shop-gsm.ua/products/Fobos-SDR/> (дата звернення: 21.04.2025).
16. DEDRONETracker – Multi-sensor Drone Detection Platform. *Dedrone by Axon: Counter-Drone Defense Solutions & Systems*. URL: <https://www.dedrone.com> (дата звернення: 24.04.2025).
17. Product Overview AARTOS Drone Detection System (AARTOS DDS). *AARTOS Drone Detection*. URL: <https://drone-detection-system.com/aartos-dds/product-overview/> (дата звернення: 24.04.2025).

18. Стратегії виявлення дронів FPV, Mavic та БПЛА. *Radiozir*. URL: <https://www.radiozir.in.ua/vyivlennia-droniv/> (дата звернення: 24.04.2025).
19. Детектор дронів «ОБРІЙ-1». *Radiozir*. URL: <https://www.radiozir.in.ua/product/detektor-droniv-obrij-1/> (дата звернення: 24.04.2025).
20. Мобільна система виявлення дронів MDDSR1. *Интернет-магазин Vario*. URL: <https://vario.com.ua/mobilna-systema-vyivlennia-droniv-mddsr1/?srsltid=AfmBOoq6p9tnYqJzEYrS88m8AAq8DgUv4S8SzQ1u7WgeUqEE5ZXGrbfY> (дата звернення: 24.04.2025).
21. Аналізатор спектру 2.4, 5.8, 4.9-5.2, 0.9 Ghz MDDSR1 "Ксеон-М". *Kseonics Technology*. URL: <https://kseonics-smart.com.ua/ua/p2334542337-analizator-spektru-ghz.html> (дата звернення: 24.04.2025).
22. Advanced Counter-Drone Solutions for a Safer World. *WhiteFox Defense Technologies*. URL: <https://www.whitefoxdefense.com/> (дата звернення: 24.04.2025).
23. HENSOLDT's Xpeller: protection from dangerous high flyers. *Asian Defence Directory*. URL: <https://asiandefencedirectory.com/products/view/hensoldt-s-xpeller-protection-from-dangerous-high-flyers> (дата звернення: 24.04.2025).
24. Industrial Ethernet Switches. *Advantech*. URL: https://www.advantech.com/en-eu/products/industrial-ethernet-switches/sub_1-2mljyv (дата звернення: 01.05.2025).
25. EN IEC 61000-6-2:2019. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-2: Generic standards - Immunity standard for industrial environments.. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/6cfd8fa2-dfaf-459d-8d98-814154d1bfde/en-iec-61000-6-2-2019> (дата звернення: 02.05.2025).
26. MIL-STD-810H. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. Department of Defense Test Method Standard. URL:

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		56

<https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/>

[MIL-STD-810H 55998/](#) (дата звернення: 03.05.2025).

27. Recommendation G.1010 (11/2001) - End-user multimedia QoS categories. *ITU*. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010-200111-I> (дата звернення: 03.05.2025).
28. Explanation of IEEE 802.3af Power over ethernet. *Visiotech*. URL: <https://support.visiotechsecurity.com/hc/en-us/articles/4414599185810-Explanation-of-IEEE-802-3af-Power-over-ethernet> (дата звернення: 05.05.2025).
29. Difference Between Wi-Fi and Ethernet. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-wi-fi-and-ethernet/> (дата звернення: 06.05.2025).
30. LoRaWAN: Advantages and Disadvantages. *RFWirelessWorld*. URL: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/lorawan-advantages-disadvantages> (дата звернення: 06.05.2025).
31. Difference Between UTP, STP, FTP & S/FTP. *CablesAndKits*. URL: <https://www.cablesandkits.com/learning-center/what-is-the-difference-between-utp-stp-ftp-sftp> (дата звернення: 06.05.2025).
32. UC400 S23 U/FTP Cat.6 Cca s1a d1 a1. *Prysmian*. URL: https://www.prysmian.com/en/en_multimedia_datacom_draka-uc300-u1500_installation_6-installation-cables_UC400_S23_Cat.6_U-FTP_Cca (дата звернення: 06.05.2025).
33. Каб.4 Пари Кат.6 Ftp Lszh. *legrand*. URL: <https://www.legrand.ua/uk/каталог/продукція/каб4-пари-кат6-ftp-lszh-032756> (дата звернення: 06.05.2025).
34. How Long Can an Ethernet Cable Be? Length Limits and Extension Solutions. *Anker*. URL: <https://www.anker.com/blogs/hubs-and-docks/how-long-can-an-ethernet-cable-be> (дата звернення: 06.05.2025).
35. Gigabit Waterproof PoE Extender. *UltraPOE*. URL: <https://ultrapoe.com/products/poe-ex2001-w> (дата звернення: 07.05.2025).

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		57

36. BT90W Outdoor PoE Extender, Gigabit PoE Repeater with Two PoE Outputs. *Linovision Europe Store*. URL: https://linovision.com/products/poe-ext6002gp?srsId=AfmBOoqV1_k12_VIxpMMKPQdvoISss7wP86fYmfeCZGykgJE7TeN19Ij (дата звернення: 07.05.2025).
37. One Port Gigabit Outdoor PoE Extender, Waterproof PoE Ethernet Repeater. *Linovision Europe Store*. URL: <https://eu.linovision.com/products/poe-ext3001gp> (дата звернення: 07.05.2025).
38. Inscape Data Managed IP68 Outdoor PoE Switch, LPS3802ATM-T1, 10-Port. *Amazon*. URL: <https://www.amazon.com/LinkPower-LPS3802ATM-T1-Inscape-Switches-Data/dp/B074PGNT4G> (дата звернення: 07.05.2025).
39. MokerLink Outdoor 10 Port Gigabit PoE Switch. *Amazon*. URL: <https://www.amazon.com/MokerLink-Port-Gigabit-IEEE802-3af-Weatherproof/dp/B0C9994Q8C> (дата звернення: 07.05.2025).
40. TP-Link TL-SG1210P Unmanaged 10-Port POE Gigabit Fanless Switch Review. *Mighty Gadget*. URL: <https://mightygadget.co.uk/tp-link-tl-sg1210p-unmanaged-10-port-poe-gigabit-fanless-switch-review/> (дата звернення: 08.05.2025).
41. TP-Link JetStream TL-SG1218MPE. *Omada*. URL: <https://www.tp-link.com/uk-ua/business-networking/easy-smart-switch/tl-sg1218mpe/> (дата звернення: 08.05.2025).
42. Milestone product system requirements. *Milestone*. URL: <https://www.milestonesys.com/support/help-and-documentation/system-requirements/> (дата звернення: 10.05.2025).
43. Bianca S., Eduardo P., Wolf-Dietrich W. A large-scale field study. *DRAM errors in the wild*. URL: <https://doi.org/10.1145/1555349.1555372> (дата звернення: 12.05.2025).
44. Dell EMC PowerEdge R640 Technical Specifications. *Dell*. URL: https://i.dell.com/sites/csdocuments/shared-content_data-sheets_documents/en/us/poweredge-r640-technical-guide.pdf (дата звернення: 12.05.2025).

					PE11.468213.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		58

45. HPE ProLiant DL380 Gen10 Server Data Sheet. *HPE GreenLake*. URL: <https://www.hpe.com/psnow/doc/PSN1010026818USEN.pdf> (дата звернення: 12.05.2025).
46. HPE Apollo 4200 Gen10 Server - Features & Specs. *HPE*. URL: <https://buy.hpe.com/us/en/storage/disk-storage-systems/storage-servers/apollo-4200/hpe-apollo-4200-gen10-server/p/1011147097> (дата звернення: 12.05.2025).
47. SuperServer SYS-322GA-NR. *Supermicro*. URL: <https://www.supermicro.com/en/products/system/iot/3u/sys-322ga-nr> (дата звернення: 12.05.2025).
48. Cisco 4000 Family Integrated Services Router Data Sheet. *Cisco*. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/4000-series-integrated-services-routers-isr/data_sheet-c78-732542.html (дата звернення: 13.05.2025).
49. MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+ Datasheet. *MikroTik*. URL: <https://mikrotik.com/product/CCR1009-7G-1C-1Splus#fndtn-gallery> (дата звернення: 13.05.2025).
50. Ubiquiti EdgeRouter 12 Datasheet. *Ubiquiti*. URL: https://dl.ui.com/guides/edgemax/EdgeRouter_ER-12_QSG.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
51. IEEE 802.3af/at. Standard Specification.
52. Інтернет-магазин "ROZETKA". *Rozetka*. URL: <https://rozetka.com.ua/> (дата звернення: 20.05.2025).