

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**на тему: «Магнітометрична система для автоматизованого пошуку вибухонебезпечних предметів »**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-01  
Якотюк Владислав Сергійович

\_\_\_\_\_

Керівник:

асистент  
Самборська В. В.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

Кандидат технічних наук, асистент  
Івасенко Віталій Михайлович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

**ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ**

| № з/п | Формат | Позначення                  | Найменування                   | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                             | Завдання на дипломний проєкт   | 2                |          |
| 2     | A4     | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i>   | Пояснювальна записка           | 90               |          |
| 3     | A1     | <i>ДП 1760 00.000.00 Е2</i> | Схема електрична функціональна | 1                |          |
| 4     | A1     | <i>ДП 1760 00.000.00 Е3</i> | Схема електрична принципова    | 1                |          |
| 5     | A1     | <i>ДП 1760 00.000.00 СК</i> | Складальне креслення           | 1                |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |
|       |        |                             |                                |                  |          |

|           |                  |       |      | <i>ДП 1760 00.000.00 ПЗ</i>                         |        |  |
|-----------|------------------|-------|------|---|--------|--|
|           | ПІБ              | Підп. | Дата |   |        |  |
| Розробн.  | Якотюк В.С.      |       |      | Лист  | Листів |  |
| Керівн.   | Самборська В. В. |       |      |   |        |  |
| Консульт. |                  |       |      | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. АСНК<br>Гр. ПК-01 |        |  |
| Н/контр.  |                  |       |      |   |        |  |
| Зав.каф.  | Киричук Ю. В.    |       |      |   |        |  |

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Магнітометрична система для  
автоматизованого пошуку вибухонебезпечних предметів »**

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Якотюку Владиславу Сергійовичу**

1. Тема проєкту «Магнітометрична система для автоматизованого пошуку вибухонебезпечних предметів », керівник проєкту Самборська В. В. асистент, затверджені наказом по університету від « 28 » 05 2024 р. № 2121-с \_\_\_\_\_
2. Термін подання студентом проєкту 04.06.2024 \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до проєкту : Максимальна відстань виявлення ВВП діаметром 20 мм. – 0.4 м, роздільна здатність датчику не менше 5 мікрогаусів, загальна похибка системи не більше 0.1% \_\_\_\_\_
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, аналітичний огляд, розробка та розрахунок вузлів функціональної схеми, підбір елементів системи, розробка елементів корпусу \_\_\_\_\_
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична функціональна, схема електрична принципова, складальне креслення корпусу, 2 плакати А1 \_\_\_\_\_

6. Дата видачі завдання 14.04.2024

---

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|---|---------------------------------|----------|
| 1     | Формулювання завдання проєкту             | 20.04.2024                      | виконано |
| 2     | Проведення аналітичного огляду            | 30.04.2024                      | виконано |
| 3     | Систематизація теоретичного матеріалу     | 05.05.2024                      | виконано |
| 4     | Розробка структурної схеми                | 15.05.2024                      | виконано |
| 5     | Підбір компонентів                        | 20.05.2024                      | виконано |
| 6     | Розробка креслиників                      | 25.05.2024                      | виконано |
| 7     | Формування загальних висновків            | 30.05.2024                      | виконано |
| 8     | Остаточне оформлення дипломного проєкту   | 02.06.2024                      | виконано |
|       |   |                                 |          |
|       |   |                                 |          |

Студент

Якотюк Владислав

Керівник

Самборська В. В.

## АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячений розробці магнітометричної системи для автоматизованого пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП). У контексті зростаючої необхідності підвищення безпеки та ефективності виявлення ВНП, така система може стати важливим інструментом для захисту та розмінування територій. В проєкті проведено аналіз принципів функціонування магнітометричних систем та існуючих рішень у цій галузі. Досліджено різні типи магнітометрів, такі як ферозондові, оптичні та квантові магнітометри, а також алгоритми обробки та аналізу даних.

Розглядаються потенційні застосування магнітометричної системи в сфері військової безпеки, цивільної оборони, а також для використання в робототехніці та автономних системах. Основною метою дипломного проєкту є вдосконалення магнітометричної системи шляхом оптимізації алгоритмів обробки та аналізу даних, розробки нових типів датчиків та їх інтеграції у систему. Також розглядається можливість розширення функціональних можливостей системи, включаючи додаткові параметри вимірювання та можливість безпроводового передавання даних для оперативного реагування.

Обсяг роботи складається з 90 сторінок (без додатків), 4 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, містить 1 таблицю, 36 рисунків та 58 літературних джерел.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, виявлення, магнітометри, БпЛА.

## **ABSTRACT**

The diploma project is dedicated to the development of a magnetometric system for the automated search for explosive ordnance (EOD). In the context of the growing need to improve the safety and efficiency of detecting explosive ordnance, such a system can become an important tool for protecting and demining territories. The project analyzes the principles of operation of magnetometer systems and existing solutions in this area. Different types of magnetometers, such as ferroelectric, optical, and quantum magnetometers, as well as data processing and analysis algorithms, are investigated.

Potential applications of the magnetometer system in the field of military security, civil defense, as well as for use in robotics and autonomous systems are considered. The main goal of the thesis project is to improve the magnetometric system by optimizing data processing and analysis algorithms, developing new types of sensors, and integrating them into the system. The possibility of expanding the functionality of the system, including additional measurement parameters and the possibility of wireless data transmission for rapid response, is also being considered.

The work consists of 90 pages (without appendices), 4 chapters, general conclusions, references, contains 1 table, 36 figures and 58 references.

**Keywords:** explosive objects, detection, magnetometers, UAVs.

## ЗМІСТ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>ВСТУП.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд .....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1. Актуальність створення систем пошуку вибухонебезпечних предметів .....             | 12        |
| 1.2. Огляд існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів                          | 14        |
| 1.2.1. Візуальний метод пошуку ВВП.....   | 15        |
| 1.2.2. Телевізійний метод пошуку ВВП.....   | 17        |
| 1.2.3. Пошуку ВВП за допомогою георадару.....   | 19        |
| 1.2.4. Магнітометричний метод пошуку ВВП .....  | 20        |
| 1.2.5. Пошуку ВВП за допомогою лазерного сканування .....                               | 22        |
| 1.3. Обґрунтування вибору магнітометричного методу пошуку ВВП .....                     | 23        |
| 1.4. Аналіз видів магнітометрів .....   | 25        |
| 1.4.1. Ферозондовий магнітометр .....   | 26        |
| 1.4.2. Оптичний магнітометр .....   | 27        |
| 1.4.3. Квантові магнітометр.....  | 27        |
| 1.4.4. Магнітометр на основі ефекту Оверхаузуена .....                                  | 28        |
| 1.4.5. Градієнтометр магнітометр .....  | 29        |
| 1.5. Огляд існуючих рішень для магнітометричного пошуку ВВП із використанням БПЛА ..... | 30        |
| 1.5.1. DJI Matrice 300 RTK.....   | 31        |
| 1.5.2. Yuneec H520 .....  | 32        |
| 1.5.3. Asctec Falcon 8 .....  | 32        |
| 1.5.4. Skydio 2.....  | 33        |
| 1.6. Локалізація магнітних аномалій .....   | 34        |
| 1.7. Постановка завдання та синтез структурної схеми .....                              | 36        |
| 1.8. Висновки до розділу 1 .....  | 38        |
| <b>РОЗДІЛ 2. Розробка та розрахунок вузлів функціонування схеми .....</b>               | <b>39</b> |
| 2.1. Аналіз та вибір датчиків .....   | 39        |
| 2.1.1. Магніторезистивний магнітометр .....   | 40        |
| 2.1.2. Магнітометр на ефекті Холла .....  | 42        |
| 2.1.3. Магнітометр на ефекті Фарадея .....  | 43        |
| 2.1.4. Магнітометр на ефекті Джозефсона.....  | 43        |
| 2.2. Розробка функціональної схеми .....  | 44        |

|           |                  |          |        |      |  |            |      |         |
|-----------|------------------|----------|--------|------|--|------------|------|---------|
|           |                  |          |        |      | <b>ПК01.241760.000 ПЗ</b>  |            |      |         |
| Змн.      | Арк.             | № докум. | Підпис | Дата |  |            |      |         |
| Розроб.   | Якотюк В. С.     |          |        |      | <i>Магнітометрична система для автоматизованого пошуку вибухонебезпечних предметів</i> | Літ.       | Арк. | Аркушів |
| Перевір.  | Самборська В. В. |          |        |      |  | 8          | 90   |         |
| Н. Контр. |                  |          |        |      |  | ПБФ, ПК-01 |      |         |
| Затверд.  |                  |          |        |      |  |            |      |         |



|   |           |
|---|-----------|
| 2.3. Розробка алгоритму роботи системи .....                      | 45        |
| 2.4. Визначення максимальної глибини виявлення ВВП .....          | 47        |
| 2.5. Математичне забезпечення локалізації магнітних аномалій..... | 51        |
| 2.6. Висновки до розділу 2 .....                                  | 56        |
| <b>РОЗДІЛ 3. Підбір елементів системи.....</b>                    | <b>58</b> |
| 3.1. Вибір магнітометричного датчика .....                        | 58        |
| 3.2. Вибір гіроскопа та акселерометра.....                        | 61        |
| 3.3. Вибір LTE модуля .....                                       | 63        |
| 3.4. Вибір джерела живлення .....                                 | 64        |
| 3.5. Вибір пам'яті .....  | 66        |
| 3.6. Вибір мікроконтролера.....                                   | 68        |
| 3.7. Розрахунок похибок.....                                      | 71        |
| 3.8. Висновки до розділу 3 .....                                  | 73        |
| <b>РОЗДІЛ 4. Розробка елементів корпусу.....</b>                  | <b>75</b> |
| 4.1. Розробка корпусу .....                                       | 75        |
| 4.2. Кріплення до корпусу .....                                   | 77        |
| 4.3. Висновки до розділу 4 .....                                  | 79        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>   | <b>81</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                           | <b>83</b> |

|           |      |                  |        |      |  |      |      |         |
|-----------|------|------------------|--------|------|--|------|------|---------|
|           |      |                  |        |      | <b>ПК01.241760.000 ПЗ</b>  |      |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.         | Підпис | Дата |  |      |      |         |
| Розроб.   |      | Якотюк В. С.     |        |      | <i>Магнітометрична система для<br/>автоматизованого пошуку<br/>вибухонебезпечних предметів</i> | Літ. | Арк. | Акрушіє |
| Перевір.  |      | Самборська В. В. |        |      |  |      | 8    | 90      |
| Н. Контр. |      |                  |        |      | <b>ПБФ, ПК-01</b>  |      |      |         |
| Затверд.  |      |                  |        |      |  |      |      |         |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВНП - вибухонебезпечний предмет

БПЛА - безпілотних літальних апаратів

DP - discriminatory power

RTK - Real-Time Kinematic

LiPo - Літій-полімерних

INS - інерціальна навігаційна система

ВАХ - вольт-амперна характеристика

PC - персональний комп'ютер

ВЧ - вісь чутливості

МП - магнітометричні датчики

IGRF - міжнародного геомагнітного опорного поля

SPI - Serial Peripheral Interface

I2C - Inter-Integrated Circuit

|             |             |                 |               |             |                           |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                           | 10   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

## ВСТУП

Створення систем пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП) є критично важливим для забезпечення безпеки в багатьох контекстах. Вони допомагають захищати цивільне населення від небезпеки вибухів, зменшують ризик терористичних актів у громадських місцях та транспортуванні, а також є необхідними для розмінування територій після військових конфліктів або катастроф. Розвиток новітніх технологій, таких як робототехніка, дрони та штучний інтелект, дозволяє вдосконалювати ці системи, роблячи їх більш ефективними та надійними, що в кінцевому підсумку підвищує рівень безпеки та сприяє відновленню територій [1].

Для України це має особливе значення через тривалі наслідки конфліктів та окупації окремих регіонів, які залишили велику кількість вибухонебезпечних предметів і мін. Розмінування таких територій є складним та небезпечним процесом, і новітні системи пошуку вибухонебезпечних предметів можуть значно полегшити це завдання, підвищуючи ефективність і безпеку. Використання технологій, таких як дрони і штучний інтелект, може забезпечити швидке і точне виявлення мін, зменшуючи ризик для саперів і прискорюючи процес відновлення [2].

Таким чином, створення та впровадження сучасних систем пошуку вибухонебезпечних предметів є важливим кроком на шляху до відновлення безпеки та стабільності в Україні. Це дозволить безпечно повертати території до цивільного використання, забезпечить безпечні умови для життя та сприятиме загальному відновленню країни після конфліктів.

Метою дипломної роботи є розробка системи яка автономно зможе проводити пошук ВНП з передачею даних на сервер та з їх подальшою обробкою. Проаналізовано види методів для даної системи, недоліки та їх переваги, описано перспективні області використання системи та подальше вдосконалення даної розробки.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1. Актуальність створення систем пошуку вибухонебезпечних предметів

Системи виявлення вибухонебезпечних предметів відіграють ключову роль у гарантуванні громадської безпеки, захисту інфраструктури та запобіганні терористичним атакам. Вибухонебезпечні пристрої, такі як міни, саморобні вибухові пристрої та бомби, становлять серйозну загрозу для людей і можуть спричинити значні руйнування. Тому використання передових технологій для їх виявлення та знешкодження має вирішальне значення [3].

Новітні технології у цій галузі дозволили створити точні системи виявлення, що включають рентгенівські сканери, детектори слідів вибухових речовин, дрони та роботизовані пристрої. Рентгенівські сканери допомагають перевіряти багаж та вантажі в аеропортах, на залізничних станціях та інших місцях масового скупчення людей, дозволяючи виявляти підозрілі предмети без потреби їх розкривати. Детектори слідів вибухових речовин можуть виявити навіть мінімальні кількості вибухових речовин, що дозволяє своєчасно виявити потенційні загрози.

Гуманітарне розмінування є ще однією важливою сферою, де системи виявлення вибухонебезпечних предметів мають велике значення. У районах, які постраждали від збройних конфліктів, залишаються міни та інші небезпечні предмети, які становлять загрозу для мирних жителів (рис.1.1.). Завдяки дронам з камерами високої роздільної здатності, металодетекторам та роботизованим пристроям ці території можна ефективно очищати, що допомагає людям повернутися додому та відновити економічну діяльність.

Розвиток систем пошуку вибухонебезпечних предметів потребує міждисциплінарної співпраці між інженерами, хіміками, фізиками та спеціалістами з інформаційних технологій. Така співпраця сприяє інноваціям у сфері безпеки та створює нові можливості для розробки ефективних інструментів для виявлення і знешкодження вибухових пристроїв [4].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 12   |

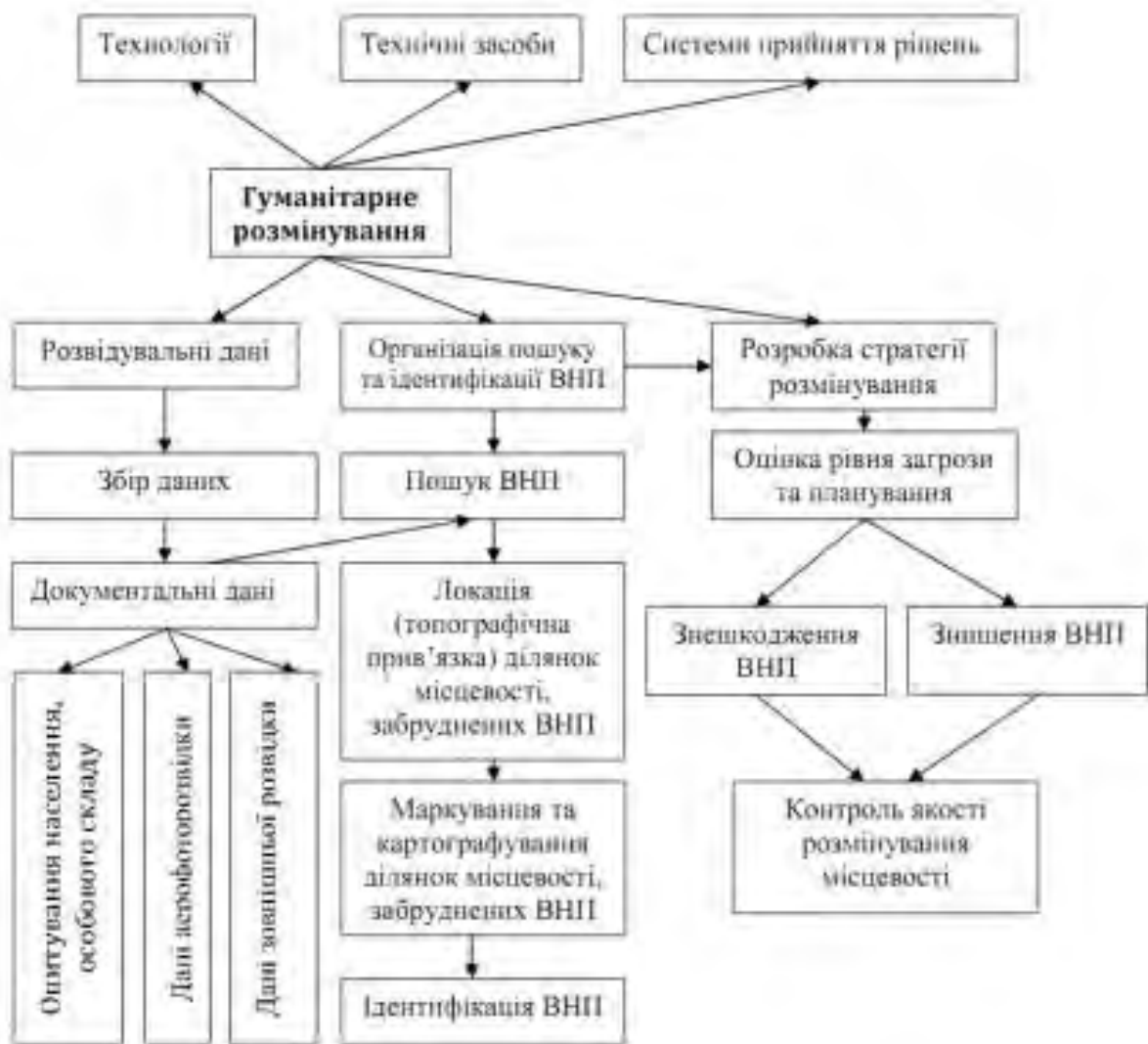


Рис.1.1.Схема гуманітарного розмінування

Міжнародна співпраця також має важливе значення в цьому контексті. Країни, які потребують допомоги у розмінуванні та забезпеченні безпеки, можуть використовувати ці технології для відновлення миру та стабільності. Така співпраця сприяє обміну досвідом та знаннями, що підвищує загальний рівень безпеки у світі.

Системи виявлення вибухонебезпечних предметів також відіграють важливу роль у захисті довкілля. Вибухонебезпечні пристрої можуть забруднювати ґрунт і воду, створюючи загрозу для екосистем (рис.1.2.). Використання сучасних технологій для їх виявлення та знешкодження допомагає зменшити екологічну шкоду.

Таким чином, розробка та застосування систем виявлення вибухонебезпечних предметів – це комплексне завдання, яке охоплює аспекти безпеки, гуманітарного розмінування, науково-технічного прогресу, міжнародної співпраці та захисту довкілля. Усі ці аспекти підкреслюють важливість подальших інвестицій у розвиток нових методів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних пристроїв для забезпечення безпеки людей та навколишнього середовища.

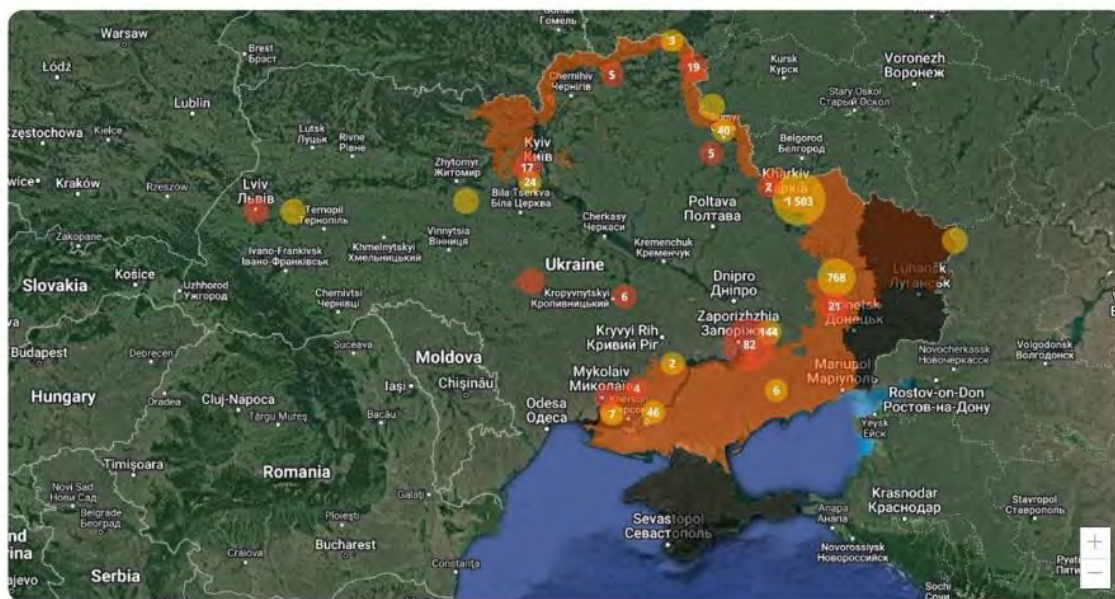


Рис.1.2. Карта замінованих територій України

## 1.2. Огляд існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів

Існує різноманіття методів пошуку ВВП, кожен з яких має свої переваги та обмеження, в залежності від умов та контексту використання [5].

Один з таких методів - візуальний огляд. Цей підхід передбачає візуальне оглядання території для виявлення підозрілих предметів. Він дозволяє операторам швидко сканувати область і виявляти незвичайні об'єкти, але може бути обмежений умовами поганої видимості або прихованими предметами.

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      |                    | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ПК01.241760.000 ПЗ |      |

Інший метод - магнітний пошук, який використовує магнітні властивості для виявлення металевих об'єктів, включаючи ВВП. Він ефективний для виявлення металевих предметів, але не може виявляти неметалеві ВВП.

Також існує тепловізійний метод пошуку, який використовує теплове випромінювання для виявлення об'єктів з відмінними температурами від навколишнього середовища. Цей метод дозволяє виявляти об'єкти навіть при поганій видимості, але він може бути обмежений тим, що не всі об'єкти мають відмінну температуру від тла [6].

Георадарний пошук використовує електромагнітні хвилі для виявлення об'єктів під землею. Цей метод ефективний для виявлення неметалевих об'єктів, таких як міни, але може бути обмежений глибиною проникнення хвиль та складністю обробки отриманих даних.

Лазерне сканування використовує лазерні промені для створення тривимірної моделі поверхні та виявлення нерівностей. Цей метод може бути ефективним для виявлення навіть найдрібніших об'єктів на поверхні, але він може бути обмежений об'ємом обробки даних та вимагати додаткового часу для аналізу результатів.

### **1.2.1. Візуальний метод пошуку ВВП**

Візуальний пошук ВВП передбачає огляд території з метою виявлення мін або інших об'єктів, які можуть становити загрозу (рис.1.3.). Цей метод включає в себе застосування окулярів та уважне спостереження за земельною поверхнею або навколишнім середовищем навіть з висоти, щоб виявити будь-які незвичайності чи підозрілі об'єкти [7].

Основні принципи використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для візуального пошуку ВВП включають наступні аспекти: БПЛА, оснащені візуальними сенсорами, можуть швидко просканувати великі території з повітря, виявляючи будь-які аномалії чи ознаки, які можуть свідчити про наявність мін або інших вибухонебезпечних об'єктів. Цей підхід дозволяє проводити огляд

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 15   |



території швидше та ефективніше, зменшуючи ризик для життя людей. Перед початком місії необхідно ретельно спланувати дії, включаючи визначення конкретних цілей та зон обстеження, а також оцінку місцевості для виявлення можливих перешкод чи ризиків. Важливо вибрати БПЛА з відповідними характеристиками та оснащенням для максимальної ефективності у пошуку ВВП. Використання БПЛА для візуального пошуку ВВП зменшує ризик для персоналу, оскільки огляд відбувається з безпечної висоти. Це також дозволяє швидко просканувати великі площі та зібрати значну кількість інформації. Проте важливо дотримуватися протоколів безпеки та місцевих законів для забезпечення безпечного використання дронів [8].

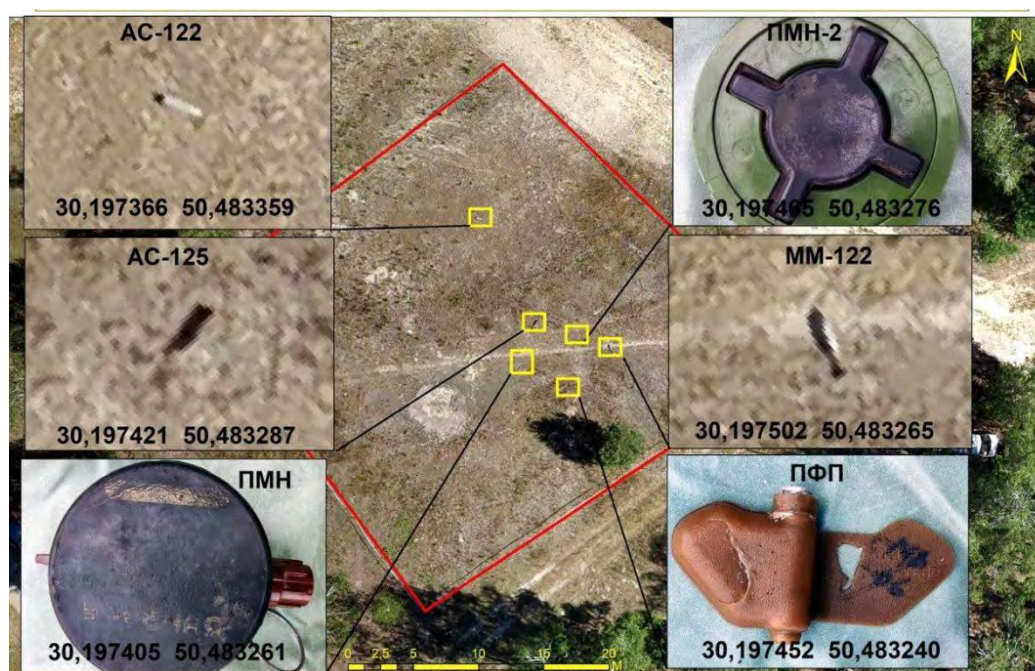


Рис.1.3. Візуальний пошук ВНК

Метод візуального пошуку виступає як складова частина комплексної системи розмінування, і його можна поєднувати з іншими підходами, такими як використання технічних засобів або обробка інформації з супутників, щоб підвищити точність та ефективність процесу.



Для аналізу фотомозаїки багатоспектральних зображень використовувався метод бінарної логістичної регресії, де кожен піксель може бути призначений до одного з двох класів: перший клас відображає наявність міни в місцевості, другий - його відсутність. Однак при аналізі виникли проблеми, пов'язані як з різноманіттям фонів, так і з тим, що міни можуть мати непрямі ознаки, ускладнюючи чітке виділення їх сигналів від інших об'єктів. Тому був розроблений спеціальний алгоритм структуризації навчальної вибірки та введений критерій роздільності DP (discriminatory power), що дозволив значно підвищити ефективність класифікації фотомозаїк багатоспектральних зображень.

### 1.2.2. Телевізійний метод пошуку ВВП

Тепловізійний метод пошуку ВВП базується на використанні тепловізійних технологій для виявлення об'єктів з відмінними температурними характеристиками в порівнянні з навколишнім середовищем (рис.1.4.). Цей метод є особливо корисним у виявленні вибухонебезпечних об'єктів, таких як міни, які можуть нагріватися або мати відмінне тепловипромінювання порівняно з навколишнім середовищем [9].



Рис.1.4. Міне поле в екрані тепловізора

Тепловізійний пошук мін базується на використанні тепловізійних камер, які виявляють та відображають температурні відмінності між об'єктами та навколишнім середовищем. Міни можуть бути розпізнані через їх вищу або нижчу температуру порівняно з ґрунтом або іншими об'єктами. Теплові камери зафіксують інфрачервоне випромінювання, яке випромінюють усі об'єкти, включаючи міни, і на його основі створюють теплові карти, що відображають розподіл температур на різних об'єктах. Оператори аналізують ці зображення, шукаючи температурні аномалії, які можуть вказувати на місце розташування мін або інших вибухонебезпечних предметів. Часто тепловізійний пошук комбінується з іншими методами, такими як візуальний пошук, для забезпечення більшої ефективності та точності виявлення.

Використання тепловізійного пошуку підвищує можливість виявлення мін та інших об'єктів, особливо в умовах, коли їх важко або неможливо помітити звичайним оглядом.

Звіт аналітичного відділу Військової школи "Борівітер" підкреслив, що тепловізійний метод може бути лише частиною загального підходу до пошуку мін. Він ефективний лише в обмежених умовах, таких як певний тип мін та певні погодні умови і час доби. Однак він може давати неточні результати через різкі температурні коливання, зумовлені сонцем, та об'єкти, що недостатньо виділяють тепло, наприклад, уламки або каміння в пустельній місцевості [10].

Експерти також відзначили важливість використання різноманітних джерел інформації, таких як зведення розвідгруп, радіоперехоплення, сліди техніки, помітки саперів, свідчення місцевого населення та обмін даними з іншими підрозділами. Хоча тепловізійний метод є інноваційним, він має високий ризик. Тепловізори не виявляють розтяжки та неметалеві міни, і не ефективні для прикопаних пристроїв. Їх ефективність залежить від погодних умов і температури, та їх здатності точно виявляти міни обмежені через можливі помилкові спрацювання на камінні та інших металевих об'єктах, що може створити ілюзію безпеки. При цьому противник може наміряно розкидати металеві предмети, щоб ускладнити процес розмінування [11].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 18   |

Аналітичний відділ настоює на необхідності включення спеціалістів з мінної безпеки у процес пошуку та розмінування вибухонебезпечних об'єктів. З урахуванням усіх потенційних небезпек, використання цього методу як єдиного способу виявлення мін не рекомендується.

### 1.2.3. Пошуку ВВП за допомогою георадару

Метод пошуку ВВП за допомогою георадару базується на використанні георадіолокаційної техніки для виявлення об'єктів, таких як міни, під поверхнею землі або інших матеріалів (рис.1.5.). Основний принцип роботи георадару полягає в тому, що він випромінює електромагнітні сигнали, які проникають у ґрунт і відбиваються від підземних об'єктів. Потім георадар приймає відбиті сигнали і аналізує їх, визначаючи характеристики об'єктів, такі як їх глибина, розмір і форма [12].

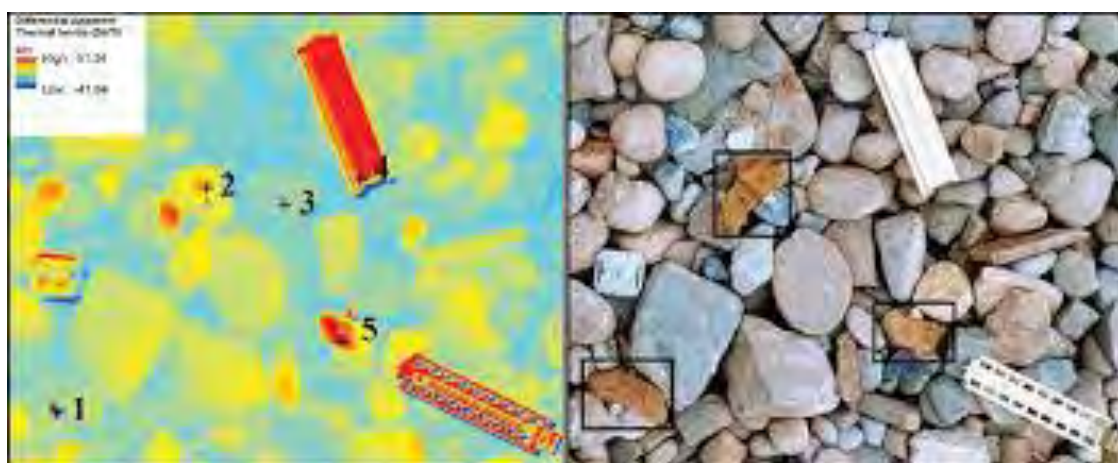


Рис.1.5.Пошук ВВП за допомогою георадару

Основні етапи методу пошуку мін за допомогою георадару включають кілька кроків. Спершу георадар випромінює короткочасні електромагнітні імпульси через антенну систему. Ці сигнали проникають у глибину ґрунту або інших поверхонь, що підлягають обстеженню. Антенна система георадару сконструйована так, щоб забезпечити точне та ефективне передавання імпульсів, які поширюються через ґрунт та інші матеріали.

Коли електромагнітні імпульси проходять через верхні шари ґрунту, вони можуть змінювати свою форму або потужність залежно від властивостей середовища, таких як щільність, вологість і склад. Це дозволяє георадару досліджувати структуру ґрунту і виявляти приховані об'єкти або аномалії, пов'язані з наявністю мін або інших вибухонебезпечних предметів.

Відбиття сигналу виникає тоді, коли електромагнітний імпульс, що виходить із георадару, стикається з об'єктом, як-от міною. Частина цього сигналу відбивається назад до георадару, що фіксується системою. Характеристики відбиття, такі як сила, час повернення та форма, залежать від розмірів, складу і глибини об'єкта, а також від характеристик середовища, через яке проходить сигнал. Георадар використовує ці відбиття для створення зображення підземної структури, допомагаючи виявляти можливі мінні загрози або інші аномалії, які можуть вимагати додаткового обстеження або знешкодження.

Останнім кроком є приймання та аналіз сигналу. Георадар приймає відбитий сигнал і аналізує його, щоб визначити характеристики підземних об'єктів, включаючи міни. Отримані дані можуть бути візуалізовані у вигляді профілю глибини, який показує місце розташування та характеристики об'єктів, допомагаючи фахівцям приймати рішення щодо подальших дій [13].

Використання георадарів дозволяє ефективно шукати підземні об'єкти, такі як міни, без руйнування поверхні землі. Це особливо корисно для виявлення мін, незалежно від їх складу, включаючи пластикові міни, які важко знайти металевими детекторами.

#### **1.2.4. Магнітометричний метод пошуку ВМП**

Метод пошуку ВМП за допомогою магнітометра базується на вимірюванні магнітного поля навколо об'єктів, які можуть містити феромагнітні матеріали, як-от металеві міни (рис.1.6.). Феромагнітні об'єкти впливають на магнітне поле, і ці зміни можна виявити магнітометром [14].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 20   |

Основним етапом методу є вимірювання магнітного поля магнітометром, який визначає інтенсивність поля в певній зоні, реєструючи зміни (рис.1.7.), що можуть свідчити про наявність металевих або магнітних об'єктів. Зібрані дані використовуються для створення профілю магнітного поля, який аналізується для виявлення аномалій. Феромагнітні об'єкти, такі як металеві міни, спричиняють аномалії, що проявляються у вигляді змін у вимірах магнітометра.

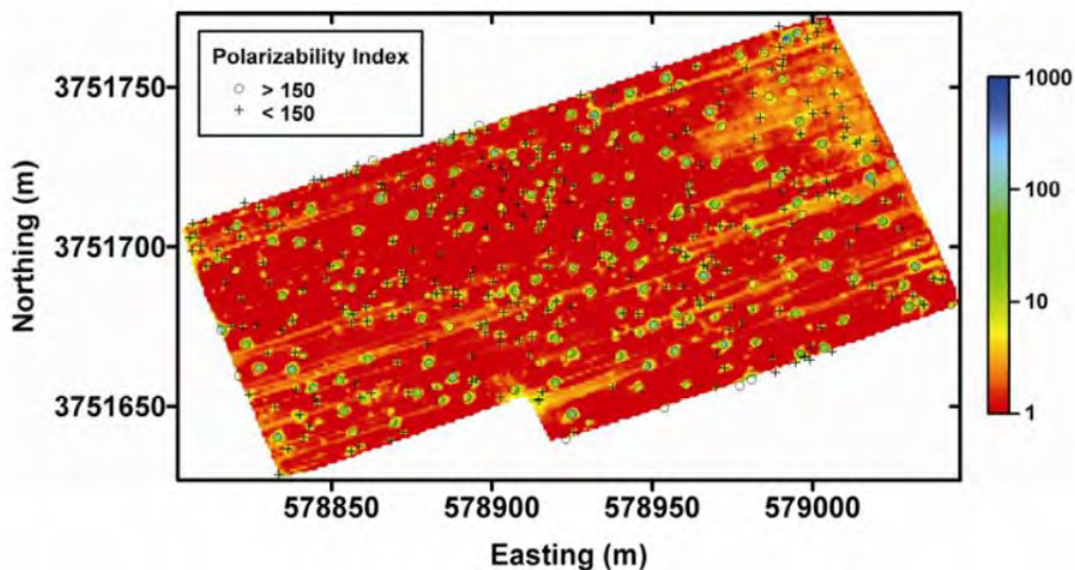


Рис.1.6. Карта магнітних аномалій

Аналіз і інтерпретація зібраних даних включають вивчення вимірювань для виявлення потенційних місць розташування мін або інших феромагнітних об'єктів. Фахівці шукають аномалії чи відхилення, щоб зрозуміти, чи вони спричинені феромагнітними об'єктами або іншими чинниками. Для цього використовують спеціалізоване програмне забезпечення для ідентифікації та візуалізації магнітних аномалій[15].

На основі аналізу визначають зони, де можуть бути міни або інші небезпечні об'єкти. Коли магнітометр виявляє відхилення у магнітному полі, ці дані вивчаються для визначення потенційно небезпечних ділянок. Такі області позначаються як можливі місця розташування мін або інших металевих об'єктів. Після визначення таких зон проводиться додаткове дослідження для підтвердження наявності небезпечних предметів та визначення подальших дій.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Цей метод корисний для виявлення металевих мін, оскільки вони зазвичай містять феромагнітні матеріали. Однак не всі міни мають металеві складові, і деякі сучасні міни можуть бути виготовлені з неметалевих матеріалів для уникнення виявлення металевими детекторами.



Рис.1.7. Магнітометр на БПЛА

### 1.2.5. Пошуку ВВП за допомогою лазерного сканування

Лазерне сканування є ефективним способом виявлення мін та інших вибухонебезпечних об'єктів (рис.1.8.), заснованим на використанні БПЛА з лазерними сенсорами. Ці сенсори випромінюють лазерний промінь, спрямований на поверхню землі. Відбитий промінь повертається до сенсора, який аналізує зміни у часі та напрямку відбиття. Це дозволяє виявляти навіть невеликі відхилення на поверхні, що можуть вказувати на наявність мін або вибухонебезпечних предметів [16].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 22   |



Зібрані дані використовуються для створення тривимірної карти території з точними координатами та висотними змінами, що можуть вказувати на потенційно небезпечні об'єкти. Ці карти допомагають фахівцям ідентифікувати місця з мінами або іншими небезпечними предметами. Після визначення координат інформацію передають операторам для подальшого маркування та знешкодження об'єктів [17].

Метод лазерного сканування за допомогою БПЛА корисний у різних умовах, включаючи території з густою рослинністю або сніговим покривом, де інші методи менш ефективні. Він забезпечує високу точність і надає операторам важливу інформацію для безпечного та ефективного нейтралізації вибухонебезпечних об'єктів.

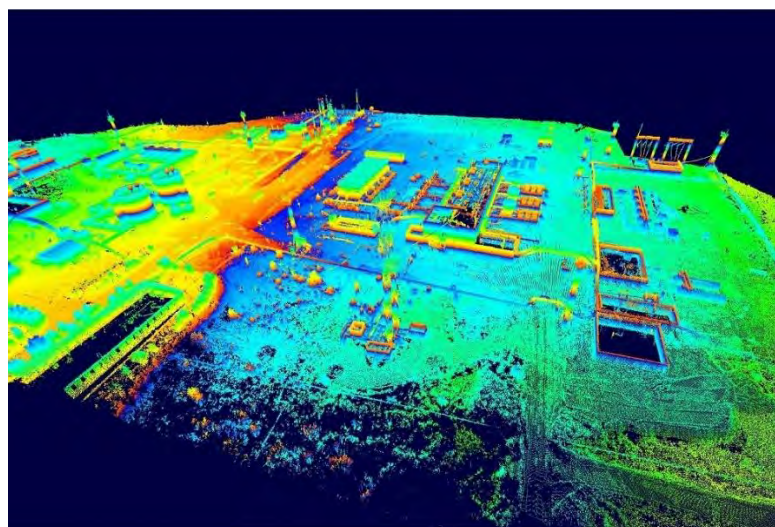


Рис.1.8.Лазерне сканування місцевості

### 1.3. Обґрунтування вибору магнітометричного методу пошуку ВНП

Магнітометричний метод пошуку ВНП є важливим і ефективним інструментом завдяки своїй здатності виявляти феромагнітні об'єкти на значних глибинах та в умовах, де інші методи можуть бути менш ефективними або непрактичними [18]. Порівняно з активними металопрошукачами, які виявляють предмети за їхньою металевією суттю або провідністю, магнітометри виявляють предмети за їхніми магнітними властивостями представлено в табл.1.1.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 23   |

Табл.1.1.Порівняння пасивних градієнтометра і активних металошукачів

| Характеристики методів                                       | Експертна оцінка             |                             |
|--|------------------------------|-----------------------------|
|  | Пасивний градієнтометра      | Активний металошукач        |
| Електроспоживання, Вт  | 0,1-0,2                      | 1-2                         |
| Час неперервної роботи від акумулятора, ч                    | 30-120                       | 5-20                        |
| Знаходження металу   | Тільки чорний (феромагнетик) | Любий                       |
| Глибина пошуку, м  | 3/8                          | 0,3(антена Ø1м)             |
| Робота в металевих ґрунтах                                   | неприпустимо                 | Припустимо                  |
| Робота в воді, в так же в сольній                            | да                           | Ні                          |
| Вплив електропровідності ґрунту на ефективність роботи       | ні                           | суттєва                     |
| Залежність корисного сигналу від глибини                     | $\sim 1/R^3 \dots 1/R^3$     | $\sim 1/R^3$                |
| Чутливість до малих феромагнітним предметам поблизу поверхні | Підвищена                    | Висока                      |
| Чутливість до металевого неферомагнітного мусору             | ні                           | Підвищена                   |
| Ефективність функціонування при нерівному рельєфі            | Висока                       | Помірна                     |
| Точність локалізації цілі, см                                | 3 – 5                        | 10-15                       |
| Оцінка глибини залягання ВВП                                 | Да                           | Незначна                    |
| Оцінка розміру і положення ВВП                               | Да                           | Незначна                    |
| Об'єднання в мультисенсорну систему,                         | Да, 2-4зонда                 | Ні, тільки на автоплатформі |
| Маса прибору, кг   | 3-5                          | 5-9                         |

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ПК01.241760.000 ПЗ

Арк.

24



З табл.1.1. видно, що пасивний градієнтометр ефективніший на нерівному рельєфі, у воді та металевих ґрунтах, забезпечуючи точнішу локалізацію та оцінку глибини залягання ВВП, хоча він дорожчий. Активний металошукач універсальніший щодо типів металів та дешевший, проте більше піддається впливу електропровідності ґрунту, підземних кабелів і труб. Вибір приладу залежить від конкретних умов застосування та вимог до точності й чутливості виявлення [19].

#### 1.4. Аналіз видів магнітометрів

Розглядаючи різноманітні типи магнітометрів (рис. 1.9.) для пошуку ВВП за допомогою дронів, важливо врахувати переваги та недоліки кожного типу [20].

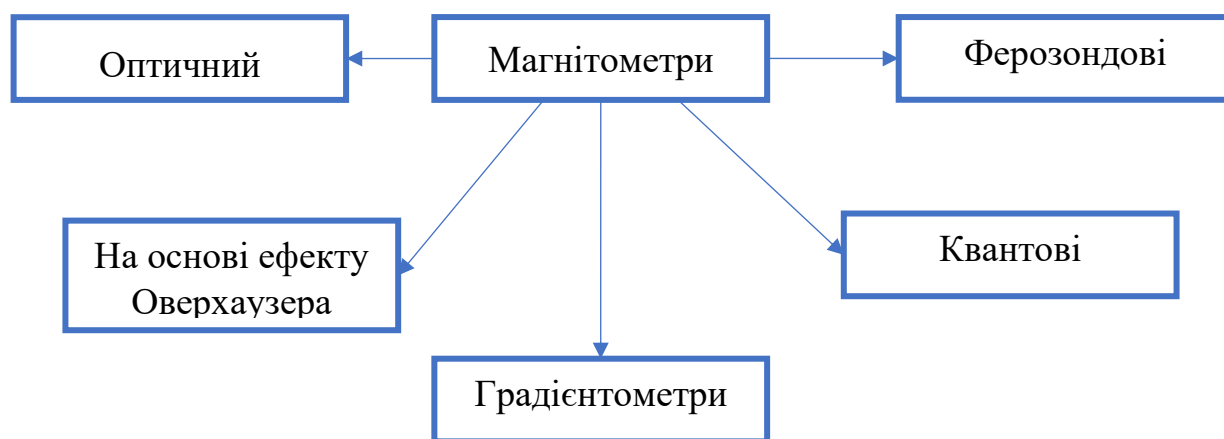


Рис. 1.9. Типи магнітометрів

Ферозондові магнітометри - надійні та точні, але дорогі та складні у використанні. Оптичні магнітометри - чутливі та точні, але вимагають складного обладнання та можуть бути вартістю. Магнітометри на основі ефекту Оверхаузена - можуть бути надзвичайно чутливими, але вразливі до шуму. Квантові магнітометри - обіцяють високу точність, але можуть бути складними в експлуатації. Градієнтометри - корисні для виявлення великих об'єктів, але можуть бути менш чутливими [21].

### 1.4.1. Ферозондовий магнітометр

Ферозондовий магнітометр використовує феромагнітний матеріал для виявлення та вимірювання магнітних полів. Він здатний виявляти дуже слабкі магнітні поля та швидко реагувати на зміни в магнітному середовищі. У ферозондовому магнітометрі феромагнітний сердечник розміщується всередині котушки з проводом, через яку проходить електричний струм (рис.1.10.). Зовнішнє магнітне поле змінює магнітне насичення сердечника, що викликає зміну магнітного потоку через котушку і призводить до індукції електричного струму. Цей струм вимірюється для визначення величини та напрямку магнітного поля [22].

Ферозондові магнітометри використовуються в геофізиці, розмінуванні, археології, навігації та системах безпеки завдяки високій чутливості та здатності виявляти незначні магнітні аномалії. Вони можуть бути невеликими за розміром, що робить їх зручними для мобільного використання. Проте ферозондові магнітометри можуть бути вразливими до електромагнітних перешкод, потребують точного калібрування і чутливі до температури та інших зовнішніх факторів [23].

Загалом, ферозондові магнітометри є надійним інструментом для вимірювання магнітних полів та виявлення магнітних аномалій, цінним у багатьох галузях завдяки своїй чутливості та універсальності.

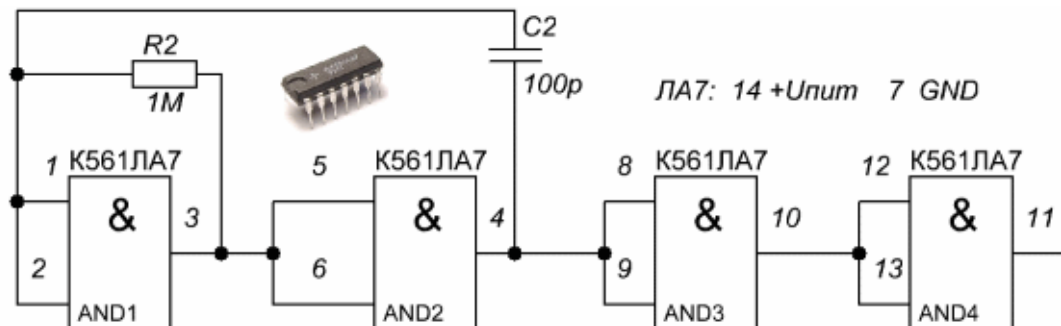


Рис.1.10.Структурна схема ферозондового магнітометра

### 1.4.2. Оптичний магнітометр

Оптичні магнітометри — інноваційні пристрої, що використовують оптичні технології для вимірювання магнітних полів. Вони засновані на взаємодії світла з атомами або молекулами, де магнітне поле змінює оптичні властивості середовища, забезпечуючи високу чутливість і широкий діапазон вимірювань. Основні принципи роботи оптичних магнітометрів включають ефект Зеемана, де магнітне поле розщеплює енергетичні рівні атомів або молекул, оптичну орієнтацію, де атоми орієнтуються за допомогою поляризованого світла і змінюють його поляризацію під впливом магнітного поля, та ефект Фарадея, де світло змінює поляризацію, проходячи через матеріали в присутності магнітного поля [24].

Оптичні магнітометри застосовуються в медицині, геофізиці, космології, військовій сфері та безпеці. Вони можуть вимірювати дуже слабкі магнітні поля, працювати в різних умовах і середовищах, а також забезпечувати безконтактне вимірювання. Проте їхнє виробництво та обслуговування можуть бути складними, а точність залежить від якості оптичних матеріалів і стабільності джерел світла [25].

Оптичні магнітометри є потужним інструментом для вимірювання магнітних полів з високою точністю, особливо корисним у медичних і наукових застосуваннях. Незважаючи на складність і вартість, їхня здатність виявляти слабкі магнітні поля робить їх важливими для дослідження складних систем та у випадках, де інші методи можуть бути неефективними або небезпечними.

### 1.4.3. Квантові магнітометр

Квантові магнітометри (рис.1.11.) — це сучасні високоточні прилади, що використовують квантові властивості для вимірювання магнітних полів. Вони базуються на використанні квантових об'єктів, таких як атоми, молекули або квантові точки. Прикладом є атомні магнітометри, які використовують

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 27   |

властивості атомів з неспареними електронними спіновими моментами, як-от рубідій чи гелій-3. Ці атоми реагують на зовнішнє магнітне поле зміною енергетичної структури, що можна виміряти для визначення інтенсивності та напрямку магнітного поля. Квантові магнітometri відзначаються великою точністю і чутливістю, що робить їх корисними в наукових дослідженнях, медицині, геофізиці та інших галузях. Однак їх використання може бути складним і вимагати спеціалізованої експертизи у квантовій фізиці та технологіях [26].

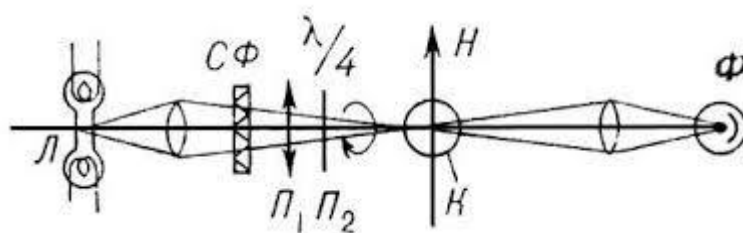


Рис.1.11. Схема квантового магнітметра

#### 1.4.4. Магнітметр на основі ефекту Оверхаузена

Магнітметр на основі ефекту Оверхаузена (рис.1.12.) використовує зміну магнітної провідності матеріалу при зміні температури для вимірювання магнітного поля. Коли парамагнітний або феромагнітний зразок охолоджується до дуже низьких температур, його магнітна провідність змінюється, що може бути використано для вимірювання змін у магнітному полі. Принцип роботи такого магнітметра полягає у вимірюванні змін магнітної провідності зразка при зміні магнітного поля. Зразок охолоджується до низьких температур, і його магнітна провідність вимірюється за допомогою датчиків. При зміні магнітного поля змінюється магнітна провідність зразка, яку можна виміряти відповідними електронними схемами та датчиками [27].



Рис.1.12. Магнітометр на основі ефекту Оверхаузена

Магнітометри на основі ефекту Оверхаузена мають високу чутливість до змін магнітного поля та широкий діапазон робочих температур. Вони використовуються в наукових дослідженнях, магнітній томографії та інших сферах, де потрібно вимірювати слабкі магнітні поля з високою точністю. Основною перевагою цих магнітометрів є їх висока чутливість і точність, а також здатність працювати при дуже низьких температурах. Однак для їх ефективного використання потрібне спеціальне обладнання для охолодження до дуже низьких температур [28].

#### 1.4.5. Градієнтометр магнітометр

Градієнтометри (рис.1.13.) — прилади для вимірювання градієнтів магнітного поля, тобто різниці в його інтенсивності між кількома точками. Вони корисні для виявлення швидких змін у магнітному середовищі та застосовуються в геофізиці, розмінуванні, археології та інших галузях. Градієнтометри працюють на основі порівняння даних від кількох датчиків, розташованих на певній відстані один від одного. Різниця в інтенсивності магнітного поля між датчиками вказує на наявність градієнта, який може свідчити про магнітні аномалії або об'єкти, що змінюють структуру поля [29].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |



Рис.1.13. Схема магнітометра градієнтометра

Основні переваги градієнтометрів: здатність виявляти навіть незначні градієнти магнітного поля, точне визначення місця розташування об'єктів, що створюють градієнти, та ефективність у місцях з високим рівнем електромагнітних перешкод. Однак вони складніші за інші магнітометри, потребують кількох датчиків і складних алгоритмів для обробки даних, що підвищує їх вартість і складність обслуговування. Градієнтометри також потребують регулярного калібрування для забезпечення точності вимірювань.

Градієнтометри — потужні інструменти для виявлення градієнтів магнітного поля, корисні у багатьох галузях, особливо для виявлення локалізованих магнітних аномалій або швидких змін у магнітному полі. Однак їхня складність і вартість можуть обмежувати використання в умовах з обмеженим бюджетом або ресурсами.

### 1.5. Огляд існуючих рішень для магнітометричного пошуку ВВП із використанням БПЛА

Існує кілька моделей БПЛА, які використовуються для пошуку ВВП, включаючи розмінування та виявлення мін. Ці БПЛА можуть бути оснащені різноманітними датчиками, такими як магнітометри, глибокопроникні радари та інші, які призначені для виявлення та аналізу магнітних або інших аномалій [30].

Магнітометричний пошук ВВП із використанням БПЛА) зростає в популярності у сфері розмінування та безпеки. В цьому методі використовуються магнітометри – прилади для вимірювання магнітних полів, що дозволяють виявляти ВВП, які часто містять феромагнітні матеріали. Використання БПЛА для таких завдань дозволяє здійснювати пошук та аналіз ВВП у важкодоступних або небезпечних для людського втручання областях, забезпечуючи більш ефективно та безпечно розмінування [31].

### 1.5.1. DJI Matrice 300 RTK

DJI Matrice 300 RTK (рис.1.14.) - ефективний вибір для пошуку мін та інших вибухонебезпечних предметів з кількох причин. Перш за все, цей БПЛА може бути оснащений різними сенсорами, включаючи магнітометри, для ефективного виявлення мін. Його тривалий час польоту до 55 хвилин дозволяє здійснювати довготривалі пошукові місії, покриваючи великі території. Технологія RTK (Real-Time Kinematic) забезпечує високу точність визначення місцезнаходження, що є ключовим для точного виявлення мін і мінімізації помилок.



Рис.1.14. DJI Matrice 300 RTK

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 1.5.2. Yuneec H520

Yuneec H520 (рис.1.15.) - універсальний безпілотний літальний апарат, призначений для пошуку вибухонебезпечних предметів. Завдяки шести роторам та стабільному польоту, він здатний піднімати важкі датчики та виконувати місії в складних умовах. H520 має різноманітні опції камер та датчиків, що можна інтегрувати з магнітометрами. Основні характеристики включають високу стабільність у польоті, тривалість польоту до 28 хвилин, та можливість встановлення різноманітних датчиків. Використання H520 допомагає ідентифікувати потенційно небезпечні предмети та зменшує ризики для саперів. Однак, обмежений час польоту та вантажопідйомність можуть бути обмеженням для деяких завдань. Усього, Yuneec H520 - це надійний та гнучкий БПЛА для пошуку мін та інших вибухонебезпечних предметів.



Рис.1.15. Yuneec H520

### 1.5.3. Asctec Falcon 8

Asctec Falcon 8 (рис.1.16.) - професійний безпілотний літальний апарат, призначений для пошуку вибухонебезпечних предметів. Завдяки компактному дизайну, вісьмом роторам і високій стабільності, він ідеально підходить для польотів у важкодоступних місцях, що важливо для пошуку мін. Особливості включають підвищену стабільність та здатність виконувати складні маневри, тривалість польоту до 28 хвилин і можливість встановлення різноманітних датчиків. Falcon 8 може виявляти магнітні або теплові аномалії, допомагаючи ідентифікувати потенційно небезпечні зони перед операціями з розмінування.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 32   |



Він також може оглядати території для пошуку вибухонебезпечних предметів. Переваги включають високу стабільність, здатність нести різноманітне обладнання та працездатність у складних умовах. Недоліки - висока вартість, потреба в спеціалізованому навчанні та вразливість до погодних умов. Висновок: Asctec Falcon 8 - потужний та універсальний БПЛА для пошуку мін, його конструкція та можливості роблять його одним із найкращих виборів у цій сфері, хоча його використання вимагає певних зусиль і коштів.



Рис.1.16. Asctec Falcon 8

#### 1.5.4. Skydio 2

Skydio 2 (рис.1.17.) - це безпілотний літальний апарат з передовими функціями автономного польоту, призначений для пошуку вибухонебезпечних предметів. Він володіє вдосконаленою системою навігації з використанням штучного інтелекту, що дозволяє йому уникати перешкод та виконувати автономні польоти. Завдяки своєму компактному розміру і легкій вазі, він зручний для транспортування та використання в різних умовах. В контексті пошуку вибухонебезпечних предметів, Skydio 2 може виявляти потенційно небезпечні зони, хоча він не має спеціалізованих датчиків для виявлення мін. Його високоякісна камера може бути використана для створення зображень території, що корисно при створенні карт або пошуку підозрілих об'єктів. Проте варто враховувати обмежений час автономного польоту та вразливість до погодних умов, що може ускладнити тривалі місії. Загалом, Skydio 2 представляє собою потужний інструмент для роботи в складних умовах, хоча його можливості можуть бути обмежені у деяких аспектах пошуку мін і вибухонебезпечних предметів.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 33   |



Рис.1.17. Skydio 2

Використання БПЛА разом із магнітометричними датчиками відкриває нові можливості для виявлення ВВП, таких як міни, снаряди та інші небезпечні об'єкти. У сучасних рішеннях для магнітометричного пошуку ВВП із використанням БПЛА використовуються різні типи датчиків, такі як ферозондові, протонні, градієнтні та fluxgate магнітометри. Вибір конкретного типу датчика залежить від специфічних вимог, таких як чутливість, точність, енергоспоживання та розмір. Ці датчики дозволяють БПЛА ефективно виконувати завдання з пошуку вибухонебезпечних предметів, зберігаючи при цьому безпеку та ефективність [32].

### 1.6. Локалізація магнітних аномалій

Локалізація магнітних аномалій визначає місцезнаходження та характеристики відхилень у магнітному полі Землі, спричинених феромагнітними об'єктами або геологічними структурами. Цей метод широко застосовується для виявлення ВВП, геологічних досліджень, пошуку корисних копалин тощо. Магнітні аномалії виникають через підземні об'єкти, які змінюють локальне магнітне поле. Магнітометричні датчики фіксують ці зміни, дозволяючи визначити місцезнаходження та характеристики об'єкта, що допомагає ідентифікувати потенційно небезпечні або цінні для досліджень об'єкти [33].

Стаціонарні магнітометричні вимірювання передбачають встановлення датчиків на фіксованих точках на поверхні землі для проведення вимірювань

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

магнітного поля. Цей метод забезпечує високу точність даних у фіксованих точках, але має обмежену мобільність і вимагає значного часу для покриття великої площі. Мобільні магнітометричні вимірювання здійснюються шляхом розміщення датчиків на транспортних засобах, таких як автомобілі, човни або БПЛА, для збору даних у русі. Цей метод дозволяє швидко охоплювати великі площі, включаючи важкодоступні ділянки, але може мати меншу точність через рух датчика [34].

Градiєнтометричні вимірювання використовують два або більше магнітометрів для вимірювання градієнта магнітного поля. Цей метод підвищує чутливість до локальних аномалій, дозволяючи більш точно визначити розташування та розміри об'єктів, але потребує складного налаштування та калібрування системи. Аерозйомка магнітних полів виконується за допомогою літаків або дронів, які проводять магнітометричні вимірювання з повітря. Цей метод дозволяє швидко охоплювати великі території, зокрема у важкодоступних районах, але має вищу вартість операцій і обмежену роздільну здатність через висоту польоту.

Магнітометрія на основі наземних роботів передбачає використання роботів, обладнаних магнітометричними датчиками, для автономного обстеження території. Цей метод забезпечує високу точність вимірювань і можливість роботи в небезпечних або важкодоступних зонах, але має високу вартість і складність в управлінні та програмуванні.

Методи локалізації магнітних аномалій важливі для виявлення мін, вибухонебезпечних предметів, пошуку корисних копалин, вивчення геологічних структур, археологічних об'єктів, інспекції інфраструктури та виявлення трубопроводів і кабелів. Вибір методу залежить від завдань, умов роботи та вимог до точності, оскільки кожен метод має свої переваги та обмеження.

|             |             |                 |               |             |                           |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                           | 35   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

## 1.7. Постановка завдання та синтез структурної схеми

БПЛА можуть мати роторний або фіксований крило, залежно від умов роботи та необхідної мобільності. Вони повинні бути компактними і легкими для зручного транспортування та швидкої розгортки, з вагою до 5 кг і мінімум 30-60 хвилин часу роботи. Їх живлення забезпечується від Літій-полімерних (LiPo) або літій-іонних (Li-ion) акумуляторів зі швидкістю зарядки до 1 години. Система навігації може бути GPS або інерціальна навігаційна система (INS), з підтримкою дистанційного управління та автономних режимів польоту з попередньо заданими маршрутами і двостороннім радіозв'язком на відстані до 5 км.

Для виявлення мін БПЛА можуть бути обладнані магніторезистивним датчиком, таким як HMC5883L, LIS3MDL або BMM150, з трьома осями вимірювання і різними діапазонами вимірювання, роздільною здатністю та чутливістю. Вони повинні бути компактними і легкими для інтеграції в мобільні системи, з мінімальним споживанням енергії для тривалого використання та інтерфейсами підключення, такими як I2C або SPI, для зручної інтеграції з мікроконтролерами та іншими обчислювальними системами.

Додатково, БПЛА може бути обладнаний гіроскопом та акселерометром (наприклад, MPU-6050), камерою для спостереження і контролю з боку оператора, а також лідаром для створення тривимірної карти місцевості та точного позиціонування.

Програмне забезпечення розробляється на базі мікроконтролера, з ПЗ для обробки даних магнітометрії та визначення місця розташування ВВП, і модулем штучного інтелекту для автоматичного виявлення аномалій та підказок оператору. Система керування польотом може бути заснована на відкритому коді або комерційних рішеннях з можливістю налаштування та інтеграції.

Для забезпечення надійності і безпеки, БПЛА мають мати запасні компоненти для заміни в разі пошкодження, а також системи автоматичного повернення в разі втрати зв'язку [35].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 36   |

На рис.1.18. представлена схема системи, яка включає магнітометричний модуль і дрон, з підключенням до хмарного сервера і станції оператора.

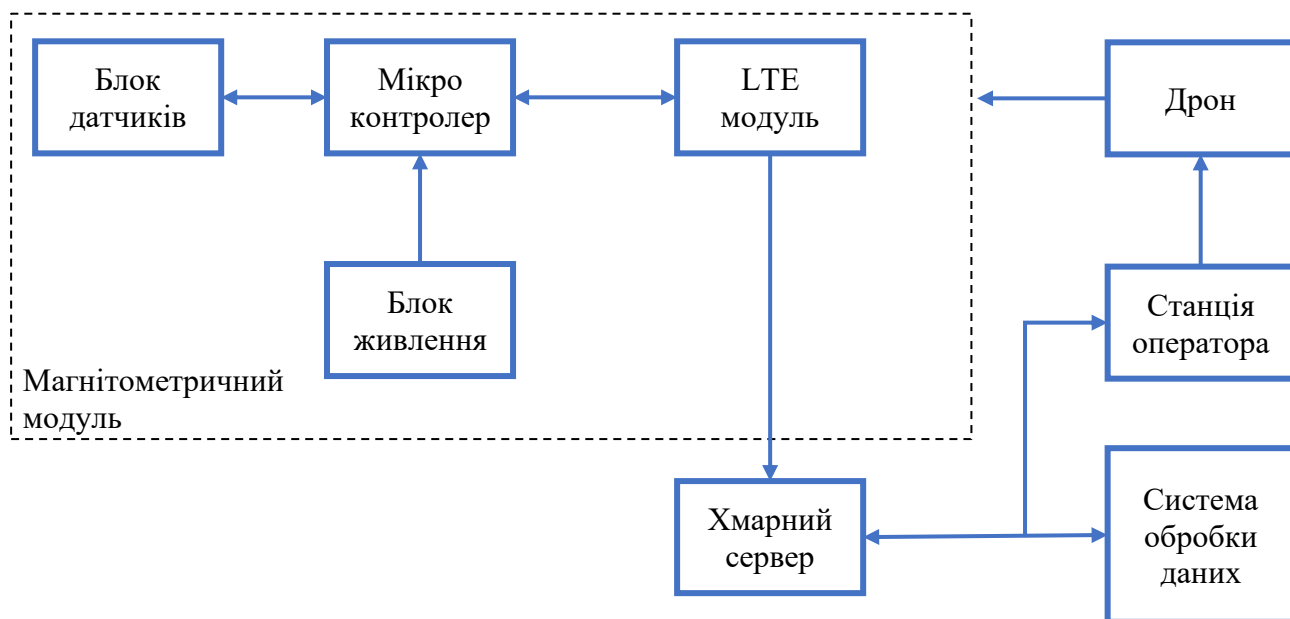


Рис. 1.18. Структурна схема

Магнітометричний модуль складається з блоку датчиків, мікроконтролера, LTE модуля і блоку живлення. Блок датчиків вимірює магнітні поля. Отримані дані надходять до мікроконтролера, який обробляє ці сигнали. Потім LTE модуль передає оброблені дані з мікроконтролера до хмарного сервера та дрона. Блок живлення забезпечує енергією блок датчиків, мікроконтролер і LTE модуль [36].

Потік даних у системі працює наступним чином: спочатку блок датчиків вимірює магнітні поля і передає ці дані до мікроконтролера. Мікроконтролер обробляє отримані дані і надсилає їх до LTE модуля. LTE модуль відправляє ці дані до хмарного сервера і дрона. Хмарний сервер приймає дані від LTE модуля і передає їх до системи обробки даних, де вони аналізуються і обробляються. Станція оператора отримує дані від дрона і може керувати ним на основі отриманої інформації.

## 1.8. Висновки до розділу 1

У цьому розділі була висвітлена актуальність та важливість виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) у забезпеченні громадської безпеки та захисті інфраструктури від терористичних загроз. Ілюструвалося, як новітні технології, такі як рентгенівські сканери, детектори вибухових речовин, дрони та роботизовані пристрої, використовуються для виявлення та знешкодження ВНП.

Розглянуті методи виявлення ВНП включають візуальний огляд, магнітний пошук, тепловізійний метод, георадарний пошук та лазерне сканування. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, і їх використання в комплексі дозволяє забезпечити максимальну ефективність та безпеку.

Важливим елементом у виявленні та знешкодженні ВНП є розробка та застосування різноманітних методів магнітної локалізації, таких як стаціонарні та мобільні вимірювання, градієнтометрія, аерозйомка та магнітометрія на основі наземних роботів. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, і їх вибір залежить від конкретних умов та завдань.

Зазначений аналіз демонструє необхідність співпраці між різними галузями, включаючи інженерів, хіміків, фізиків та інформаційних технологій, для розробки та впровадження ефективних систем виявлення та знешкодження ВНП. Інвестиції у розвиток нових технологій та методів грають важливу роль у забезпеченні безпеки людей та довкілля.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 38   |

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ВУЗЛІВ ФУНКЦІОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ

### 2.1. Аналіз та вибір датчиків

Аналіз та вибір датчиків для пошуку ВВП з використанням БПЛА є ключовим етапом у розробці таких систем. Початковий аналіз передбачає ретельне вивчення вимог до системи та завдань, які необхідно вирішити. Після цього проводиться огляд доступних типів датчиків, їхніх технічних можливостей та обмежень [37].

На цьому етапі розглядаються різні типи датчиків (рис.2.1.), такі як магнітометри, георадари, теплові камери, оптичні сенсори тощо. Кожен тип датчика має свої переваги та обмеження, які потрібно врахувати при виборі. Наприклад, магнітометри чутливі до магнітних властивостей ВВП, георадари здатні проникати в ґрунт та виявляти підземні об'єкти, теплові камери можуть виявляти зміни температури, а оптичні сенсори використовуються для візуального спостереження.

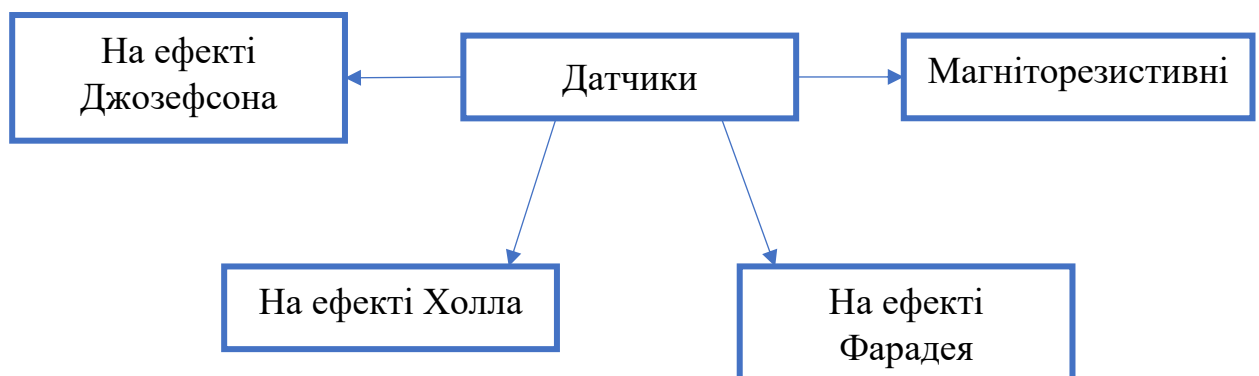


Рис.2.1. Види магнітометричних датчиків

### 2.1.1. Магніторезистивний магнітометр

Магніт резистивний магнітометр - це прилад для вимірювання магнітних полів, який базується на резистивному ефекті. У пристрої використовується спеціальний матеріал, який змінює свій опір в залежності від магнітного поля, що на нього діє. Коли магнітне поле змінюється, це призводить до зміни опору матеріалу, що може бути виміряно для визначення інтенсивності та напрямку магнітного поля.

На рис.2.2. зображена вольт-амперна характеристика (ВАХ) магніторезистора [38].

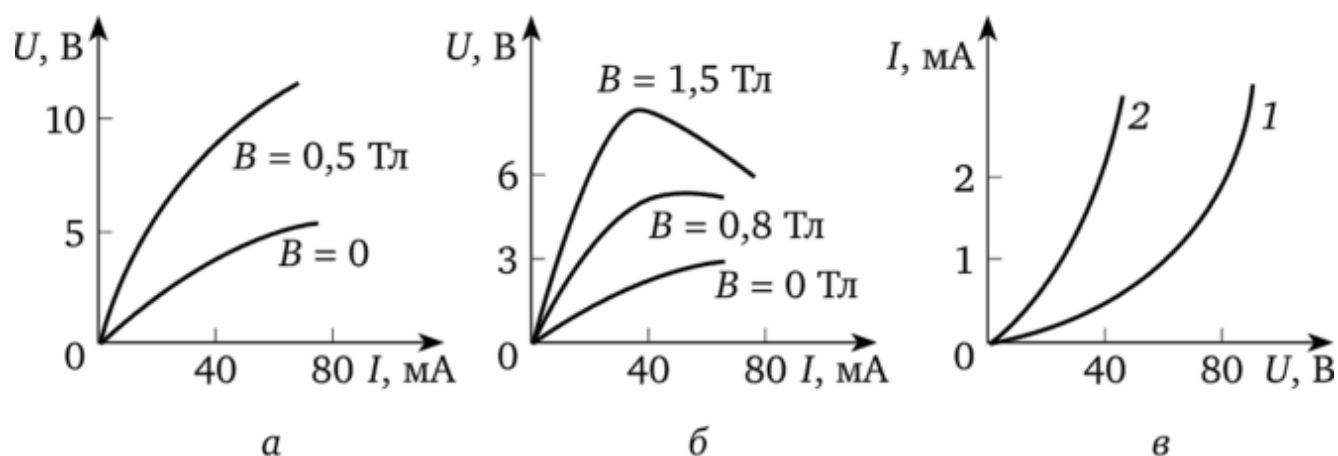


Рис.2.2. Приклад вольт-амперна характеристика магніторезисторів

Основним принципом роботи магніт резистивного магнітометра є вимірювання зміни опору в резистивному матеріалі під впливом магнітного поля. Цей ефект базується на руху носіїв заряду у матеріалі під впливом магнітного поля, що змінює його електричні властивості.

Магнітно резистивні магнітометри широко використовуються в наукових дослідженнях, промисловості та технологічних застосуваннях. Вони дозволяють вимірювати магнітні поля з високою чутливістю та точністю, а також можуть працювати при різних температурах та умовах навколишнього середовища.



Однією з переваг магнітно резистивних магнітометрів є їхня висока чутливість до слабких магнітних полів, що робить їх ідеальними для досліджень магнітних властивостей матеріалів та досліджень в області магнітної електроніки. Однак, їхня висока чутливість також може призводити до спотворення вимірювань при впливі зовнішніх магнітних полів, тому необхідно використовувати заходи захисту від зовнішніх перешкод.

Опір провідного каналу за наявності носіїв заряду двох знаків визначається виразом (2.1).

$$R = \frac{l}{S \cdot e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)}, \quad (2.1)$$

де  $l$  і  $S$  – відповідно довжина і переріз провідного каналу;  $n$  і  $p$  – відповідно середня концентрація електронів і дірок;  $\mu_n$  і  $\mu_p$  – відповідно рухливість електронів і дірок.

При впливі на канал магнітного поля змінюється його електричний опір внаслідок зміни рухливості носіїв заряду, їх середньої концентрації та зміни співвідношення розмірів провідного каналу. Це явище обумовлене тим, що носії струму, які переміщуються в напівпровіднику під дією електричного поля, не мають однакових швидкостей. Швидкості носіїв струму різні та підкоряються розподілу, який відповідає статистиці Фермі–Дірака. В результаті цього поперечне поле Холла компенсує вплив сили Лоренца тільки на носіїв струму, що мають середню швидкість  $v$ . Тому будуть існувати носії струму (зі швидкістю, більшою або меншою за  $v$ ), траєкторія яких буде викривлена, що призведе до збільшення числа зіткнень (скорочення довжини вільного пробігу) і, таким чином, до підвищення питомого опору напівпровідника.

Гальваноманітний прилад, величина опору якого сильно змінюється при зміні впливу на нього магнітного поля, називається магніторезистором.

Рівняння перетворення магніторезистора має вигляд: (2.2.)

$$R_B = R_0 \cdot (1 + A|\mu \cdot B|^m), \quad (2.2)$$

де  $R_0$  - опір перетворювача при  $B=0$ ;  $A$  - магніторезистивний коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу і форми перетворювача;  $m$  - показник

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

ступені, який дорівнює 2 у слабких магнітних полях ( $B \leq 0,2-0,5$  Тл), для яких  $\mu \cdot B \leq 1$ , і дорівнює 1 у сильних магнітних полях, при яких  $\mu \cdot B > 1$ .

Магніторезистивний коефіцієнт  $A$  залежить від форми магніторезистора. Чим менше відношення довжини резистора до площі його перерізу, тим більший коефіцієнт  $A$ .

### 2.1.2. Магнітометр на ефекті Холла

Магнітометр на ефекті Холла - це прилад для вимірювання магнітних полів, який використовує ефект Холла для визначення інтенсивності та напрямку магнітного поля. Ефект Холла полягає в появі електричної напруги у поперечному напрямку до напрямку струму в провіднику, який перебуває у магнітному полі, і ця напруга пропорційна індукції магнітного поля [39].

Основним принципом роботи магнітометра на ефекті Холла є вимірювання величини Холлівської напруги, що виникає внаслідок взаємодії магнітного поля із струмом, що протікає через провідник. При впливі магнітного поля на провідник зі струмом виникає перпендикулярна до струму електрична напруга, яку можна виміряти та використовувати для визначення параметрів магнітного поля.

Магнітометри на ефекті Холла мають широкий спектр застосувань у науці, техніці та промисловості. Вони використовуються для вимірювання магнітних полів у різних областях, включаючи фізику матеріалів, електротехніку, магнітну електроніку, геологію та інші.

Переваги магнітометрів на ефекті Холла включають їхню високу чутливість, широкий діапазон вимірювань та можливість визначення напрямку магнітного поля. Вони також можуть працювати при широких температурних умовах та мають високу точність вимірювань. Однак, для отримання найкращих результатів необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як температура та інші магнітні поля, на вимірювання.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 2.1.3. Магнітометр на ефекті Фарадея

Магнітометр на ефекті Фарадея - це пристрій для вимірювання магнітних полів, який використовує принцип ефекту Фарадея. Ефект Фарадея виникає при проходженні магнітного поля через провідник або певний матеріал, що має магнітні властивості. Цей ефект полягає в зміні поляризації світла, яке проходить через такий матеріал в присутності магнітного поля [40].

Основним принципом роботи магнітометра на ефекті Фарадея є вимірювання змін в поляризації світла, яке виникають при впливі магнітного поля на спеціальні матеріали. Ці зміни в поляризації можуть бути виміряні за допомогою спеціальних оптичних приладів, таких як поляризатори та фотодетектори. Зміна поляризації світла пропорційна інтенсивності та напрямку магнітного поля, що дозволяє виміряти його параметри.

Магнітометри на ефекті Фарадея мають широкий спектр застосувань у науці, техніці та промисловості. Вони використовуються для вимірювання магнітних полів у різних областях, включаючи фізику матеріалів, магнітну резонансну томографію, геофізику та інші.

Переваги магнітометрів на ефекті Фарадея включають їхню високу чутливість до змін в магнітному полі, можливість вимірювання його параметрів без контакту з об'єктом вимірювання, а також широкий діапазон вимірювань. Однак, для отримання найкращих результатів необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як температура та інші магнітні поля, на вимірювання.

### 2.1.4. Магнітометр на ефекті Джозефсона

Магнітометр на ефекті Джозефсона - це пристрій для вимірювання магнітних полів, який базується на принципі квантової механіки, відомому як ефект Джозефсона. Цей ефект виникає при переносі електронів через тонку діелектричну перешкоду в присутності зовнішнього магнітного поля [41].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 43   |

Основним принципом роботи магнітометра на ефекті Джозефсона є вимірювання змін в квантових властивостях току, що протікає через переходи Джозефсона в присутності магнітного поля. При зміні магнітного поля змінюється кількість електронів, які проникають через перешкоду, що викликає зміну струму через перехід Джозефсона. Ці зміни можуть бути виміряні за допомогою високочутливих електронних пристроїв, таких як надпровідні квантові детектори.

Магнітометри на ефекті Джозефсона мають високу чутливість та точність, що робить їх ідеальними для вимірювання слабких магнітних полів, таких як магнітні поля мозку або магнітні поля суперпровідників. Вони також використовуються в наукових дослідженнях в області квантової метрології, магнітної резонансної томографії та інших областях.

Основною перевагою магнітометрів на ефекті Джозефсона є їхня висока чутливість та точність, а також здатність працювати при низьких температурах, що робить їх корисними для досліджень у квантовій електроніці та нанотехнологіях. Однак вони вимагають спеціального обладнання та умов, таких як низькі температури та вакуум, для свого ефективного використання.

## 2.2. Розробка функціональної схеми

На рис.2.3. зображено функціональну схему системи, яка включає різні компоненти та їх зв'язки. Зліва показані датчики (Датчик 1 до Датчик 7), кожен із яких має модулі підписані як  $\mu$ , R, U і логіка управління. Всі ці датчики з'єднані через інтерфейс I2C з мікроконтролером, який складається з двох частин: Мікроконтролер та MCU. Мікроконтролер з'єднаний через I2C з кожним датчиком і з MCU.

Справа на схемі є зв'язок через LTE, який забезпечує підключення до хмарного середовища (Cloud), а звідти дані можуть бути передані на персональний комп'ютер (PC). Це зображення демонструє, як дані з датчиків

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 44   |

можуть бути зібрані, оброблені мікроконтролером та відправлені через мережу для подальшого аналізу та використання.

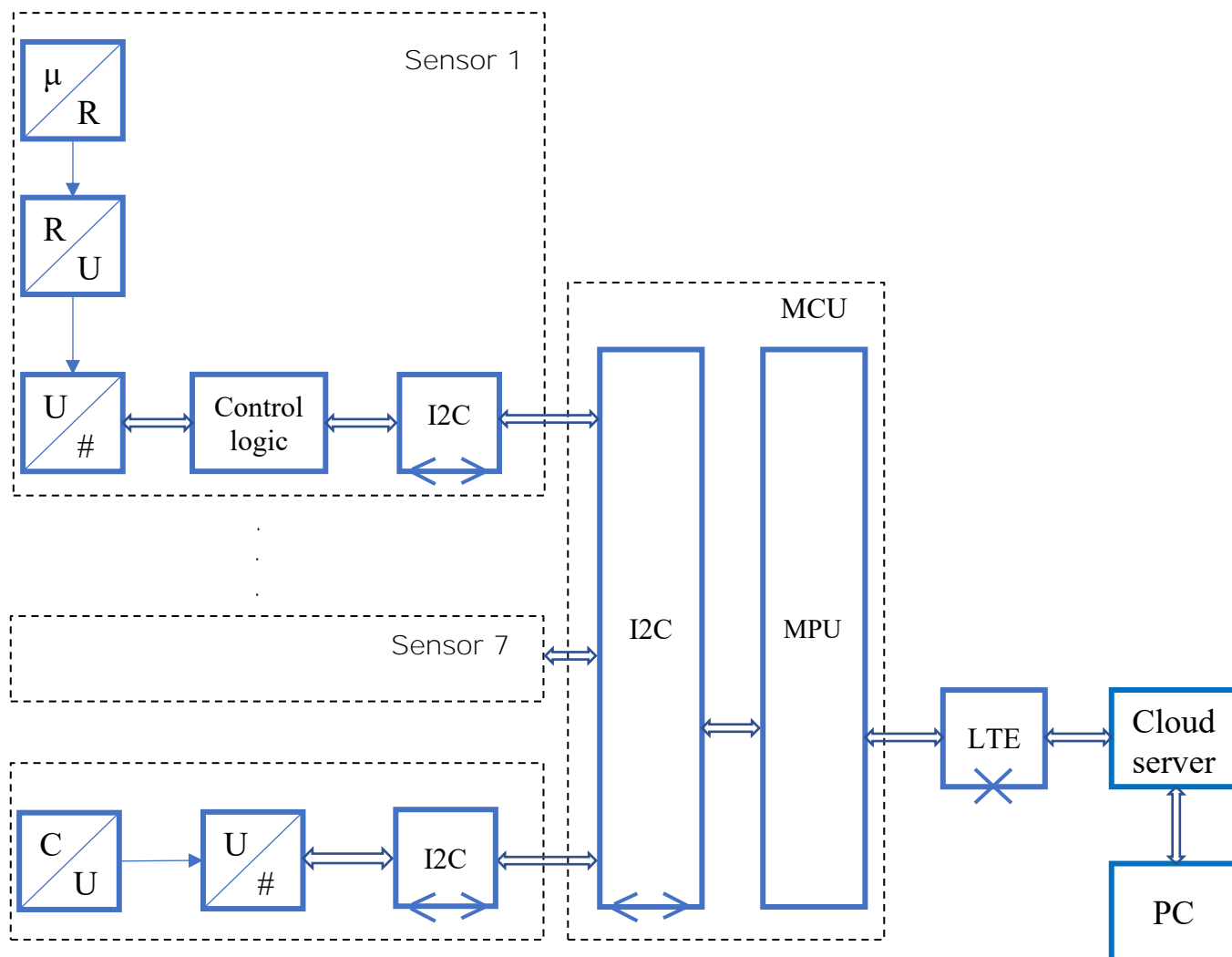


Рис.2.3. Функціональна схема системи

### 2.3. Розробка алгоритму роботи системи

На рис.2.4. представлена блок-схема процесу роботи БПЛА з магнітометром.

Процес починається з підготовки до польоту, включаючи перевірку стану БПЛА та його датчиків. Після цього завантажується попередньо визначений маршрут для місії, і БПЛА стартує, розпочинаючи свою місію.



Рис.2.4. Блок схема роботи системи

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Під час польоту БПЛА здійснює навігацію за маршрутом і збирає необхідні дані. Водночас відбувається постійне зчитування даних магнітометра, які обробляються в режимі реального часу. У разі виявлення аномалій ці дані зберігаються разом із координатами і параметрами аномалії.

Якщо аномалію не виявлено, БПЛА продовжує зчитувати дані магнітометра. Коли аномалія виявляється, система перевіряє, чи потрібне оновлення маршруту. Якщо оновлення необхідне, оператор оновлює маршрут, і БПЛА продовжує свою місію за новим маршрутом. Якщо оновлення не потрібне, БПЛА повертається до точки запуску.

Після повернення до точки запуску проводиться аналіз зібраних даних. Ця схема детально показує всі етапи роботи БПЛА з магнітометром, включаючи підготовку, навігацію, збір і обробку даних, а також управління аномаліями та завершення місії.

#### **2.4. Визначення максимальної глибини виявлення ВНП**

Для активного магнітометричного пошуку важлива не тільки маса конкретного ВНП, але і площа його поверхні, пов'язана з його діаметром  $d$ . При цьому, як показує практика, для оцінки максимальної глибини пошуку ВНП за допомогою сучасного активного магнітометра в умовах сухого ґрунту (провідність  $10^4 - 10^5$  См·м), допускається використання формули (2.3):

$$h_{max} \approx 11d, \quad (2.3)$$

де  $d$  - діаметр (мінімальний габарит) ВНП.

Поміж якостей ВНП як об'єкта пасивного магнітометричного виявлення розглядаються: 1) головним чином маса та об'єм феромагнітної захисної оболонки, яка, як правило, не менше маси вибухової речовини (ВВ); 2) форма предмета, визначена співвідношенням його найбільшого геометричного розміру до найменшого, часто описується співвідношенням довжини до діаметра; 3) в найменшому ступені - намагніченість феромагнетика.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

При цьому максимальна глибина пошуку  $h_{max}$  пов'язана з дослідною чутливістю градієнтметра  $dB/dr$ , а також з формою і масою феромагнітної оболонки складної залежності. Вона виражається, якщо прийняти, що: 1) форма магнітомягкого ВНП - це шар; 2) магнітна проникність  $\mu \geq 100$  (гіпотеза); 3) розміщення вісь чутливості (ВЧ) градієнтметра в магнітному моменті і маса, придбана з положенням МПЗ у функції  $B_T \approx h_{max}$ , оскільки у магнітометрів шукається на глибину нижче чутливості самого градієнтметра. Таким чином отримується наступне(2.4):

$$h_{max} \approx 0,93 \cdot d^{3/4} \cdot \sqrt[4]{\frac{B_T}{dB/dr}}, \quad (2.4)$$

де  $dB/dr \approx 10$  нТл/м - досягнута чутливість,  $[B_T] =$  нТл.

Тоді при підстановці  $B_T$  і  $dB/dr$  з рівняння (2.4) отримуємо оцінку максимальної глибини виявлення ВОП градієнтметром(2.5):

$$h \approx 8 \cdot d^{3/4} \quad (2.5)$$

На рис 2.5. також показана система координат (X, Y, Z), яка орієнтує простір. Вектор  $j$  вказує напрямок осі Y, вектор  $i$  вказує напрямок осі X, а вектор  $k$  вказує напрямок осі Z. Вектор магнітного поля, який вимірюють магнітометричні датчики, позначений як  $B_{МПЗ}$ . Загальна концепція рисунка стосується вимірювання магнітного поля в різних точках простору, що можуть використовуватися для визначення положення важливих наземних точок (ВНП) або інших об'єктів[42].

Прирівнявши (2.3) і (2.5), можна зробити висновок, що для реальних ВНП діаметром менше 30 см застосування градієнтметра дає відчутні результати. В умовах вологої групи (провідність  $10^2 - 10^3$  Ом·м), при наявності постійної намагніченості та "віртуального" реального предмета велика ймовірність дальності виявлення для градієнтметра забезпечується практично завжди.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |



Експериментальний порівняльний аналіз виявної здатності металошукачів і градієнтометрів підтверджує (2.5) і показує, що для "малих" і "середніх" ВНП (калібр від 20 до 50 мм) при глибинах пошуку до 0,5 м (і щільних ґрунтах) металошукачі вперше показують кращі результати. В областях калібрів понад 100 – 155 мм характеристики порівнюються, далі має перевагу градієнтометр. Проте, сам розмір випромінювальної/приймальної антени металошукача останніх моделей великий (Vallon VMH 3CS, діаметр ~1 м), то ймовірність виявлення ВНП металошукачем на глибинах до 1,5 м навіть дещо вища, ніж у пасивного FEREX 4.032. Таким чином, металошукачі мають більшу виявної здатність ВНП на практично максимальних глибинах (до 1 м), де вони фіксують стійко [43].

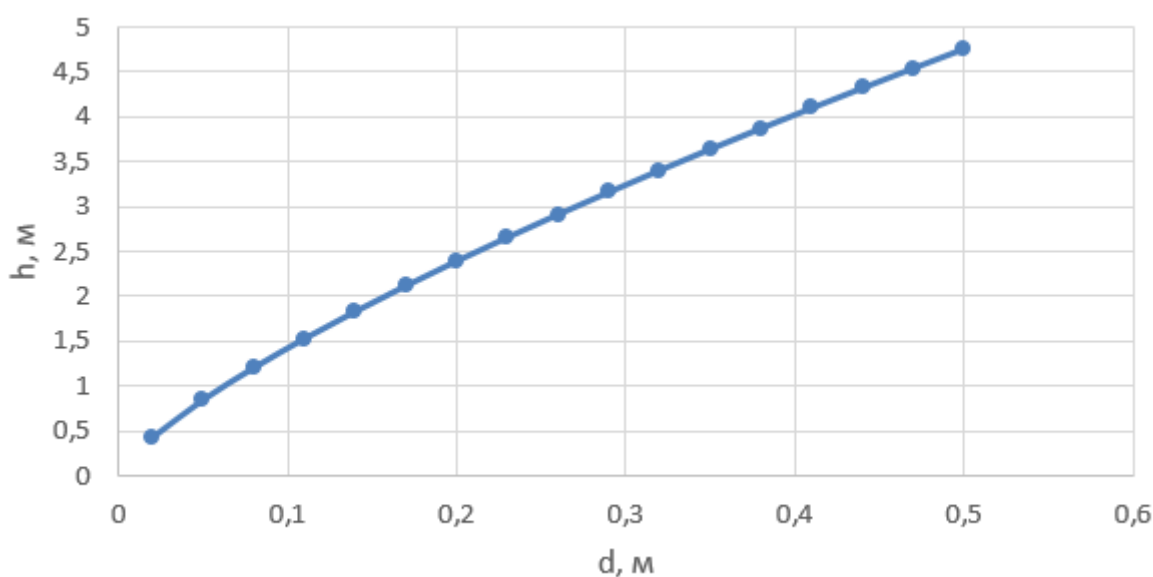


Рис.2.5. Графік залежності дистанції виявлення ВНП від його діаметру

Найкраще положення градієнтометра — це позиція, де градієнтометр може найточніше виміряти магнітне поле, створене вибухонебезпечним предметом (ВНП). Найкращий напрямок магнітного моменту ВНП — це оптимальний напрямок магнітного моменту, який забезпечує найбільш точне вимірювання. Для визначення позиції градієнтометра та ВНП використовується осьова система координат.

Схема (рис.2.6) демонструє процес виявлення ВНП за допомогою градієнтметра. Дві вимірювальні точки використовуються для точного визначення магнітного поля і, відповідно, позиції ВНП під землею [44].

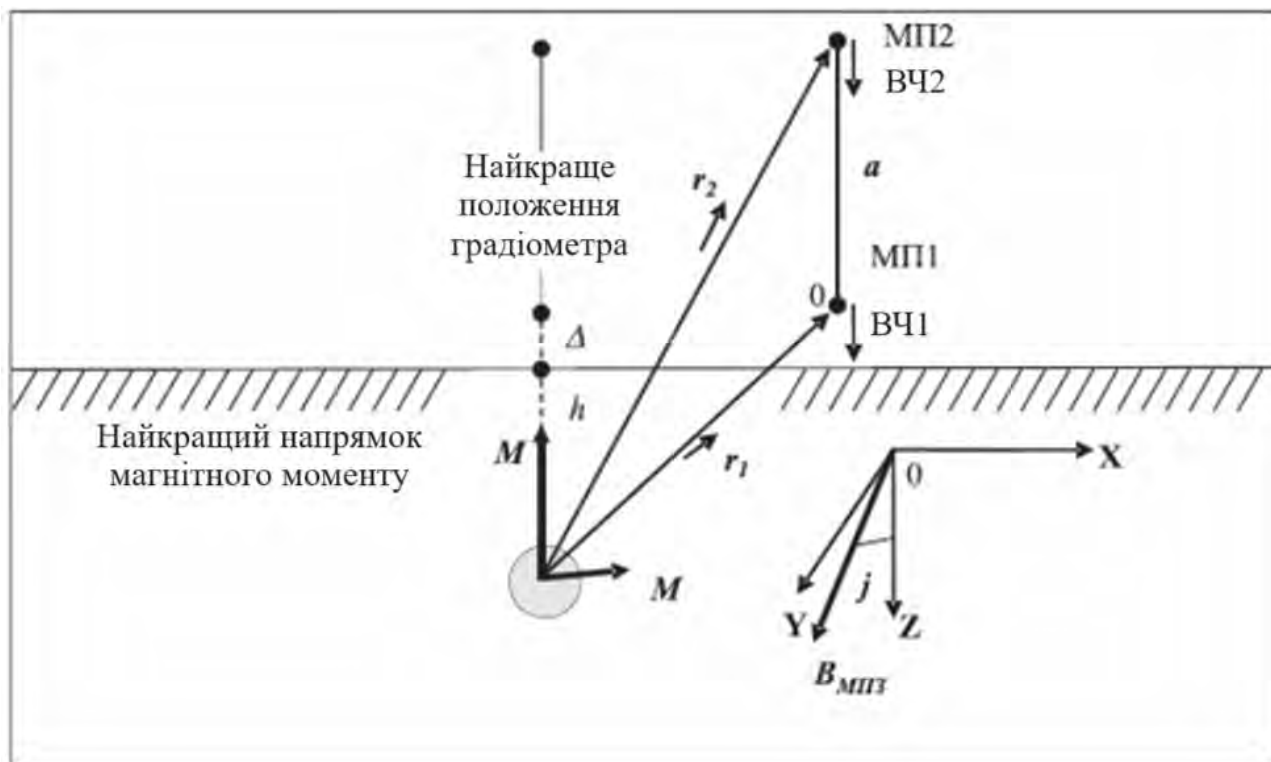


Рис.2.6.Схема пошука ВНП з використанням градієнтметра

На рис.2.6. зображено схему, що включає два магнітометричні датчики (МП1 та МП2), які розташовані на різних висотах над поверхнею. МП1 знаходиться на висоті  $h$ , тоді як МП2 розташований на додатковій висоті  $a$  над МП1. Точки спостереження цих датчиків позначені як ВЧ1 і ВЧ2 відповідно. Від точки М на поверхні до точок спостереження ВЧ1 і ВЧ2 спрямовані вектори  $r_1$  та  $r_2$ . Висота розташування МП1, яка є відстанню від точки М до точки спостереження ВЧ1, позначена як  $h$ . Вертикальна відстань між точками ВЧ1 та ВЧ2, що визначає висоту розташування МП2 відносно МП1, позначена як  $\Delta$ . Відстань від точки спостереження ВЧ1 до точки спостереження ВЧ2, яка може включати не тільки вертикальну складову, але й будь-яке додаткове зміщення, позначена як  $a$ .

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ПК01.241760.000 ПЗ

Арк.

50

## 2.5. Математичне забезпечення локалізації магнітних аномалій

Магнітну аномалію можна розглядати як магнітну диполь, коли відстань між мішенню та вимірювальною решіткою більш ніж у 2,5 рази перевищує розмір цілі. Магнітне поле, створюване магнітним диполем, виражається у вигляді

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} [3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{M}], \quad (2.6)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Н/м - проникність вільного простору.  $\mathbf{r} = r\mathbf{r}_0$  є вектором підшипника.  $\mathbf{r}_0$  — одиничний вектор  $\mathbf{r}$ ,  $r$  — величина  $\mathbf{r}$ .  $\mathbf{M} = M\mathbf{m}_0$  - магнітний момент магнітного диполя.  $M$  - величина  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{m}_0$  є одиничним вектором  $\mathbf{M}$ . "." представляє скалярний добуток векторів.

Величину  $\mathbf{B}$  можна обчислити як

$$|B| = \frac{\mu Ms}{4\pi r^3}, \quad (2.7)$$

де  $s = [1 + 3(t)^2]^{1/2}$  і  $t = \mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{m}_0$ . Величину  $\mathbf{B}$  можна виміряти скалярним магнітометром. Як видно з формули. (2.7),  $|\mathbf{B}|$  можна розглядати як обертальний інваріант.  $|\mathbf{B}|$  Не можна отримати лише величину  $\mathbf{R}$  та інформацію про підшипник магнітної цілі. Для того, щоб з'ясувати інформацію про пеленг магнітної цілі, далі, параметр  $s$  приймається просторовою константою, ми обчислили градієнт  $|\mathbf{B}|$  Наступним чином

$$|\mathbf{G}| = \nabla|B| = \frac{3\mu Ms}{4\pi r^3} \mathbf{r}_0 \quad (2.8)$$

а величина  $\mathbf{G}$  дорівнює

$$|\mathbf{G}| = \frac{3\mu Ms}{4\pi r^3} \quad (2.9)$$

За даними формулами (2.8) і (2.9), одиничний вектор підшипника можна обчислити як

$$\mathbf{r}_0 = -\frac{\mathbf{G}}{|\mathbf{G}|} \quad (2.10)$$

За даними формулами (2.7) і (2.9), можна отримати величину пеленгового вектора

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$r = 3 \frac{|B|}{|G|} \quad (2.11)$$

Отже, пеленговий вектор можна виразити як

$$\mathbf{r} = r \cdot \mathbf{r}_0 = - \frac{3|B|}{|G|^2} \mathbf{G} \quad (2.12)$$

Рівняння (2.12) показує, що вектор пеленга можна обчислити за підсумковим полем  $|B|$  і дані його градієнтів  $\mathbf{G}$ .  $|B|$  і  $\mathbf{G}$  можуть бути виміряні за допомогою матриці скалярного магнітометра. Однак насправді параметр  $s$  не є просторовою константою. За таких умов градієнт  $|B|$  виводиться як

$$\mathbf{G} = \nabla|B| = \frac{3\mu Ms}{4\pi r^3} [k_2 \mathbf{r}_0 - k_1 \mathbf{m}_0], \quad (2.13)$$

де  $k_1 = m/c^2$ ,  $k_2 = t^2/s^2 + 1$ . Тоді також можна отримати величину  $G$

$$|G| = \frac{3\mu Ms}{4\pi r^3} k_3, \quad (2.14)$$

де  $k_3 = [1 + (1 - t^2)t^2/s^4]^{1/2}$ . Для того, щоб отримати одиницю підшипника вектора  $\mathbf{r}_0$ , визначимо одиничний вектор  $\mathbf{G}_0$  з формул. (2.13) і (2.14).

$$\mathbf{G}_0 = \frac{\mathbf{G}}{|G|} = \frac{k_2 \mathbf{r}_0 - k_1 \mathbf{m}_0}{k_3} \quad (2.15)$$

Звідси одиниця несучої вектора  $\mathbf{r}_0$  можна вивести з формули. (2.15)

$$\mathbf{r}_0 = \frac{k_1 \mathbf{r}_0 - k_3 \mathbf{G}_0}{k_2} \quad (2.16)$$

Величину пеленгового вектора можна отримати з формул. (2.7) і (2.14)

$$r = \frac{|B|}{|G|} k_3 \quad (2.17)$$

Вектор підшипника можна виразити у вигляді

$$\mathbf{r} = r \cdot \mathbf{r}_0 = \frac{|B|k_3}{|G|} \frac{k_1 \mathbf{r}_0 - k_3 \mathbf{G}_0}{k_2} \quad (2.18)$$

Алгоритм ітерації

Як видно з формули (2.18), вектор пеленга визначається як  $k_1, k_2, k_3$ , загальне поле  $|B|$  і дані його градієнтів  $\mathbf{G}$ . Якщо ми знаємо  $\mathbf{m}_0$  і  $\mathbf{r}_0, k_1, k_2$ , і  $k_3$  можна обчислити за їх визначенням, загальне поле  $|B|$  і дані його градієнтів  $\mathbf{G}$  можуть

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

бути виміряні за допомогою матриці скалярного магнітометра. Як правило, магнітне поле магнітної мішені посилюється жорстким та індукованим магнітним полем. Коли жорстке магнітне поле невелике, а індуковане магнітне поле є основною складовою, орієнтація магнітного моменту цілі паралельна орієнтації геомагнітного поля. На практиці індуковане магнітне поле набагато більше, ніж жорстке магнітне поле. У цьому дослідженні розглядається лише індуковане магнітне поле. Таким чином, одиниця магнітного моменту вектора  $\mathbf{m}_0$  можна обчислити за магнітним нахилом і схиленням,  $\mathbf{m}_0$  може виражатися в наступному вигляді

$$\mathbf{m}_0 = [\cos I \cos D, \cos I \sin D, \sin I], \quad (2.19)$$

де  $I$  і  $D$  - магнітний нахил і схилення локального геомагнітного поля в положенні вимірювання відповідно. Значення їх можна отримати з міжнародного геомагнітного опорного поля (IGRF).

$\mathbf{r}_0$  і  $\mathbf{m}_0$  можна обчислити за допомогою формул (2.10) і (2.19) відповідно, в результаті  $k_1$ ,  $k_2$  і  $k_3$  можна обчислити. Однак  $\mathbf{r}_0$  обчислюється за формулою (2.10) є наближенням, оскільки параметр  $s$  приймається просторовою константою [45]. З метою підвищення точності пеленгового вектора використовується ітераційний алгоритм для оновлення  $\mathbf{r}_0$  а псевдокод ітераційного алгоритму виражений на рис.2.7.

Таким чином, пропонується використовувати метод оцінки розташування магнітної мішені, який базується на даних повного поля та його градієнтів. У цьому методі використовується скалярна магнітометрична решітка для вимірювання сумарного магнітного поля і його градієнтів. За цими вимірюваннями можна обчислити приблизний вектор пеленга. Для підвищення точності локалізації використовується ітераційний метод, який підтверджується методом моделювання.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |



Рис.2.7. Обрахунок параметрів

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Побудова градієнтометрів сумарного поля та локалізація магнітної мішені.  
Запропоновано структуру градієнтометрів сумарного поля, яка включає сім скалярних магнітометрів з назвами  $S_i$  ( $i = 1-7$ ), як показано на рис. 2.8.

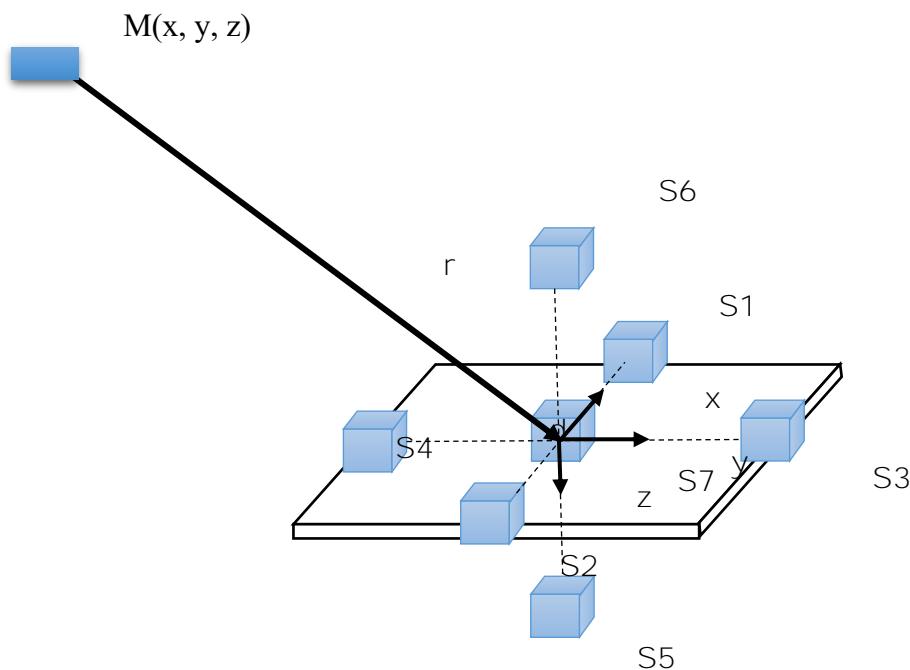


Рис.2.8.Схема розміщення датчиків

$M(x, y, z)$  – магнітна аномалія.  $S_7$  розміщується в початку декартової системи координат. Відстань між магнітометрами і початком координат  $d = 0,5$  м . Сумарне поле, виміряне  $S_i \in |\mathbf{B}|_i$  ( $i = 1-7$ ). Градієнт загальної кількості полів можна приблизно обчислити як

$$\mathbf{G} \approx \left[ \frac{(|\mathbf{B}|_1 - |\mathbf{B}|_2)}{2d}, \frac{(|\mathbf{B}|_3 - |\mathbf{B}|_4)}{2d}, \frac{(|\mathbf{B}|_5 - |\mathbf{B}|_6)}{2d} \right] \quad (2.20)$$

Початкове значення  $\mathbf{r}_0$  і  $r$  можна отримати наступним чином

$$\begin{aligned} r &= \frac{3|\mathbf{B}|_7}{|\mathbf{G}|} \\ \mathbf{r}_0 &= -\frac{\mathbf{G}}{|\mathbf{G}|} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Методи локалізації магнітних аномалій за допомогою як векторних, так і скалярних магнітометрів довели свою ефективність у виявленні ВНП. Ітераційні алгоритми, які використовуються для підвищення точності позиціонування, є перспективними і можуть значно покращити результати виявлення. Запропоновані підходи до локалізації магнітних цілей, підтвержені моделюванням, свідчать про здійсненність та надійність даних методів, що робить їх цінними інструментами для забезпечення безпеки та ефективності виявлення вибухонебезпечних предметів.

Локалізація магнітних аномалій, зокрема магнітних диполів, є важливим методом для виявлення ВНП. Використання векторних магнітометрів, що вимірюють три компоненти магнітного поля, та скалярних магнітометрів, які є менш чутливими до орієнтації, дозволяє точно оцінювати місцезнаходження об'єктів. Метод STAR та інші ітераційні алгоритми значно підвищують точність визначення місця розташування. Використання матриці скалярних магнітометрів з ітераційними алгоритмами є перспективним підходом, що дозволяє ефективно зменшити похибки та вплив геомагнітного поля. Запропоновані методи підтверджують свою ефективність і надійність у моделюванні, що робить їх цінними для забезпечення безпеки та ефективності виявлення ВНП.

## 2.6. Висновки до розділу 2

Після аналізу різних типів датчиків для пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП) з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна зробити висновок про необхідність уважного вибору датчиків з урахуванням специфіки проекту та його вимог до точності та чутливості. Кожен тип датчика має свої переваги та обмеження, які необхідно врахувати при виборі для конкретного проекту. Наприклад, магнітометри добре виявляють металеві об'єкти, георадари здатні проникати в ґрунт, теплові камери виявляють зміни температури, а оптичні сенсори допомагають у візуальному спостереженні.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 56   |



Функціональна схема системи, зображена на рисунку 2.3, ілюструє важливий аспект управління та обробки даних у системі пошуку ВВП з використанням БПЛА. Датчики, підключені до мікроконтролера та МСU, забезпечують збір і передачу даних, які потім можуть бути передані на хмарне середовище для подальшого аналізу. Це дозволяє ефективно використовувати отриману інформацію для виявлення ВВП.

Блок-схема роботи системи з БПЛА та магнітометром, яка представлена на рисунку 2.3, надає детальний огляд процесу від підготовки до завершення місії. Ця схема демонструє етапи польоту БПЛА, зчитування та обробку даних магнітометра та управління місією залежно від виявлених аномалій.

Аналіз властивостей та якостей ВВП у контексті магнітометричного виявлення показує важливість розуміння їхньої маси, об'єму феромагнітної оболонки та форми. Математичне забезпечення локалізації магнітних аномалій, використовуючи формули (2.6) - (2.21), допомагає ефективно виявляти ВВП з використанням скалярного магнітометра.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## РОЗДІЛ 3. ПІДБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ

### 3.1. Вибір магнітометричного датчика

HMC5883L (Рис.3.1.) - це цифровий магнітометр з трьома осями, що вимірює магнітне поле в трьох напрямках: X, Y і Z. Він базується на технології магніторезистивних датчиків і забезпечує високу точність вимірювань в малих магнітних полях [46].

Цей датчик використовується для вимірювання магнітного поля у різних пристроях, таких як навігаційні системи, геодезичні прилади, робототехніка та інші пристрої, де необхідно визначати напрямок і інтенсивність магнітного поля.

HMC5883L має компактний розмір і низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним варіантом для використання в мобільних пристроях та батарейних системах. Він також має високу чутливість і низький рівень шуму, що дозволяє отримувати точні вимірювання навіть в умовах з великою кількістю електромагнітних перешкод [47].



Рис.3.1. Схема HMC5883L

|      |      |          |        |      |                    |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПК01.241760.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                    | 58   |

Основні характеристики HMC5883L включають вимірювання магнітного поля в діапазоні від  $\pm 1.3$ -8 Гаусів з роздільною здатністю 5 мікрогаусів, інтерфейс I2C для передачі даних, а також можливість програмного калібрування. Він також має вбудований режим самокалібрування, що дозволяє автоматично коригувати внутрішні параметри для підвищення точності вимірювань. Для роботи потребує напругу 3.3-5В. Маючи габарити 15x15x4мм.

LIS3MDL (Рис.3.2.) - це високочутливий триосевий цифровий магнітометр, призначений для вимірювання магнітного поля в трьох напрямках: X, Y і Z. Він базується на технології магніторезистивних датчиків, забезпечуючи високу точність вимірювань у широкому діапазоні магнітних полів [48].

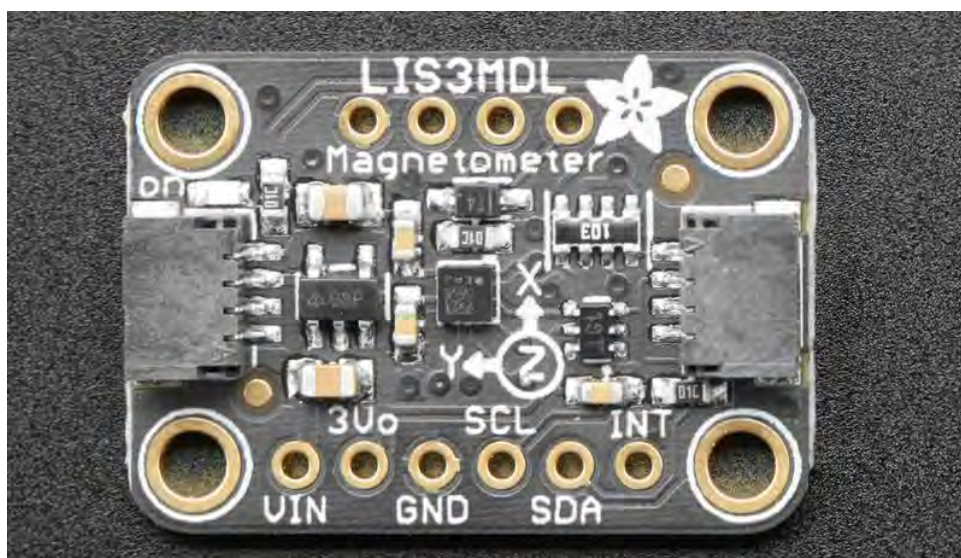


Рис.3.2. Схема LIS3MDL

Цей датчик широко використовується в різних пристроях, таких як навігаційні системи, орієнтаційні пристрої, робототехніка та інші системи, де необхідно визначати напрямок і інтенсивність магнітного поля. Завдяки компактним розмірам і низькому енергоспоживанню, LIS3MDL ідеально підходить для мобільних пристроїв та систем на базі батареї. Він має високу чутливість і низький рівень шуму, що дозволяє отримувати точні вимірювання навіть у присутності електромагнітних перешкод [49].

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

LIS3MDL - це надійний і точний інструмент для вимірювання магнітного поля, який підходить для широкого спектру застосувань, включаючи автономні транспортні засоби, геодезичні інструменти та системи виявлення вибухонебезпечних предметів. Його висока чутливість, енергоефективність і простота інтеграції роблять його відмінним вибором для сучасних технологічних рішень.

BMM150 (Рис.3.3.) - це високочутливий триосевий цифровий магнітометр, призначений для точного вимірювання магнітного поля у трьох напрямках: X, Y і Z. Він базується на технології магніторезистивних датчиків, що забезпечує високу точність і стабільність вимірювань в різних умовах [50].



Рис.3.3. Схема BMM150

Цей датчик часто використовується в різноманітних додатках, таких як мобільні пристрої, навігаційні системи, переносні гаджети, робототехніка та інші застосування, де важливо визначити напрямок і інтенсивність магнітного поля. Компактний розмір та низьке енергоспоживання роблять BMM150 ідеальним для інтеграції в енергоефективні та портативні пристрої.

BMM150 також оснащений інтелектуальними функціями обробки сигналів, які дозволяють мінімізувати вплив зовнішніх перешкод та забезпечують високу точність вимірювань. Завдяки своїй надійності та точності, цей магнітометр знаходить широке застосування в сучасних технологічних рішеннях, допомагаючи забезпечити надійне та точне визначення магнітного поля в різних умовах.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 60   |

HMC5883L виділяється серед інших магнітометрів завдяки своїй високій чутливості, низькому рівню шуму та компактному розміру. Його роздільна здатність у 2 мікрогаусів забезпечує точні вимірювання, що є критично важливим для виявлення слабких магнітних полів, зокрема для пошуку вибухонебезпечних предметів.

На відміну від LIS3MDL та BMM150, які мають більш широкий діапазон вимірювань та додаткові функції, HMC5883L оптимізований для задач, де важлива висока точність та стабільність вимірювань у відносно вузькому діапазоні. Крім того, HMC5883L має простоту інтеграції завдяки інтерфейсу I2C, що спрощує його використання в мобільних та батарейних системах.

Хоча LIS3MDL і BMM150 мають свої переваги, такі як ширший діапазон вимірювань та додаткові функції, HMC5883L є найкращим вибором для задач, що вимагають високої точності, низького енергоспоживання та надійності в умовах, де присутні електромагнітні перешкоди. Його простота та ефективність роблять його ідеальним рішенням для використання в магнітометричних системах для виявлення вибухонебезпечних предметів.

### 3.2. Вибір гіроскопа та акселерометра

MPU-6050 (Рис.3.4.) - це компактний та потужний інерціальний вимірювальний пристрій від InvenSense (частина TDK). Він поєднує триосевий гіроскоп для вимірювання кутової швидкості та триосевий акселерометр для вимірювання прискорення, що дозволяє виявляти рух об'єкта та зміну його орієнтації в просторі [51].

Пристрій підтримує різні режими вимірювання, що дозволяють налаштовувати чутливість до руху для різних завдань. Широкий діапазон значень кутової швидкості та прискорення робить його універсальним для різних сценаріїв. Живлення здійснюється від джерела з напругою 3-5 В, з вбудованим регулятором на 3,3 В для стабільності. Інтерфейс I2C забезпечує легку інтеграцію з іншими компонентами системи [52].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 61   |

Пристрій оснащений 16-бітним аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП), що забезпечує високу точність вимірювань. Гіроскоп має точність вимірювань кутової швидкості з діапазонами 250, 500, 1000 та 2000 градусів за секунду, а акселерометр може вимірювати прискорення в діапазонах 2, 4, 8 і 16 g. Компактні розміри (20 x 16 мм) роблять його зручним для вбудовування в різні пристрої та системи.



Рис.3.4.Схема MPU-6050

Що стосується зв'язку з контролером, то MPU-6050 підтримує інтерфейси I2C та SPI, що робить його сумісним з багатьма платформами мікроконтролерів та мікропроцесорів. Ця гнучкість у зв'язку дозволяє легко інтегрувати його в різні проекти і системи [53].

Що стосується застосувань, MPU-6050 корисний в багатьох сферах, включаючи розробку дронів, віртуальної реальності, мобільних пристроїв та робототехніки. Його низьке споживання енергії дозволяє використовувати його в батарейних системах, а висока точність вимірювань робить його важливим інструментом для задач, пов'язаних з вимірюванням руху та орієнтації.



### 3.3. Вибір LTE модуля

При виборі LTE (Рис.3.5.) модуля варто враховувати кілька ключових аспектів. Спочатку слід з'ясувати, які мережі операторів зв'язку підтримуються в вашому регіоні, оскільки деякі модулі можуть бути сумісні лише з певними стандартами LTE або операторами. Швидкість передачі даних також важлива - для великих обсягів інформації варто обирати моделі з високою пропускнуою здатністю [54].

Розмір і форм-фактор модуля мають велике значення, особливо якщо ви плануєте використовувати його в пристроях з обмеженим простором, таких як мобільні пристрої або датчики IoT. Для пристроїв, які працюють від акумуляторів або батарей, важливо вибрати модуль з низьким споживанням енергії, щоб максимізувати тривалість роботи без зарядки. Характеристики модуля включають інтерфейсу мікросхему PCF8574AT/T, інтерфейс I2C з діапазоном адрес 0x20-0x27 для PCF8574T та 0x38-0x3f для PCF8574AT. Максимально можна підключити до восьми однотипних модулів. Живлення здійснюється при напрузі 5 В. Розмір модуля становить 5.2 x 1.8 x 1.4 см, а він сумісний з ЖК дисплеями 1602 та 2004.



Рис.3.5. LTE модуль

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Також слід враховувати функціональні можливості модуля - деякі моделі мають додаткові функції, такі як вбудований GPS, Bluetooth або Wi-Fi, що можуть бути корисними для конкретних застосувань. Оцінюйте бюджет і доступність модулів на ринку, пам'ятаючи, що найнижча ціна не завжди означає найкращу якість. Збалансуйте ціну з характеристиками модуля, щоб зробити оптимальний вибір.

### 3.4. Вибір джерела живлення

При виборі джерела живлення для безпілотного літального апарату (БПЛА), який використовується для пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП), слід враховувати кілька основних факторів. По-перше, тривалість польоту, яка визначається ємністю акумуляторів та енергоефективністю самого БПЛА. Для виконання довготривалих місій важливо мати джерело живлення з великою ємністю. По-друге, портативність і мобільність. Джерело живлення має бути легким і зручним для перенесення. Батареї або акумулятори є найкращим вибором, оскільки вони забезпечують мобільність та можливість швидкої перезарядки на місці. По-третє, надійність і стійкість до умов експлуатації. Джерело живлення має працювати в різних середовищах, включаючи екстремальні температури, високу вологість та сильні вітри. Вибір джерела живлення залежить від специфічних вимог місії, доступного бюджету та технічних можливостей. Важливо ретельно оцінити всі ці аспекти, щоб забезпечити успішне виконання завдань з пошуку ВНП [55].

При обиранні літій-іонних акумуляторів типу 18650 для живлення безпілотного літального апарату (БПЛА) з магніторезистивним датчиком важливо враховувати декілька ключових аспектів.

В першу чергу, літій-іонні акумулятори 18650 відомі своєю високою енергетичною щільністю, що робить їх привабливим вибором для мобільних додатків, таких як БПЛА. Їхня значна потужність при мінімальній вазі дозволяє БПЛА працювати з великою ефективністю.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 64   |



Далі, важливо обрати акумулятори з напругою та ємністю, які відповідають потребам вашого БПЛА. Вимоги до напруги зазвичай визначаються конструкцією БПЛА та характеристиками його електроніки.

Забезпечення безпеки під час використання літій-іонних акумуляторів є ще одним важливим аспектом. Запевніться, що вибрані акумулятори мають вбудовані захисні механізми та відповідають стандартам безпеки.

Для тривалого та безпечного використання важливо також мати систему керування зарядкою та розрядкою, яка враховує специфічні характеристики літій-іонних акумуляторів. Це допомагає зберігати акумулятори в гарному стані та продовжувати їхню експлуатаційну витривалість.

І наостанок, переконайтеся, що обрані акумулятори сумісні з електронікою вашого магніторезистивного датчика та можуть надати необхідну потужність для його роботи.

Обираючи літій-іонні акумулятори 18650 (рис.3.6.) для живлення БПЛА з магніторезистивним датчиком, враховуйте потреби вашого конкретного додатка, безпеку та ефективність, щоб забезпечити надійну та продуктивну роботу системи.

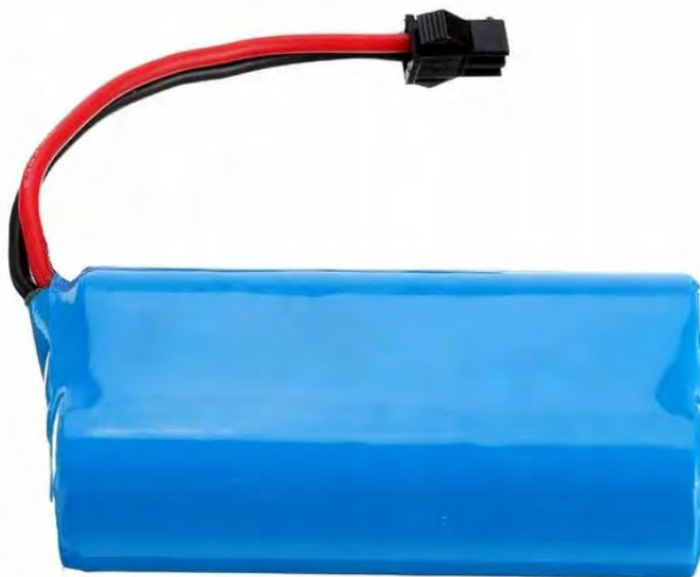


Рис.3.6. Елемент живлення

Цей елемент живлення має два акумулятори з'єднані паралельно, забезпечені захистом від перезаряду та розряду завдяки вбудованому РСМ (модулю захисту). Висота елемента становить 65 мм, діаметр – 18 мм. Використовує літій-іонну (Li-ion) хімію з номінальною напругою 3.7V і потужністю 2900 mAh. Акумулятор оснащений роз'ємом типу SM-2P. Гарантійний термін – 6 місяців, стан – новий. Розміри батареї: довжина 67 мм, ширина 37 мм.

### 3.5. Вибір пам'яті

Вибір пам'яті ROM на 4 GB для дрона, який використовується для пошуку важливих наземних точок (ВНП), потребує врахування кількох ключових аспектів. Найкращим вибором для таких завдань є флеш-пам'ять (Flash ROM), оскільки вона дозволяє багаторазово записувати та стирати дані і забезпечує високу швидкість доступу. Важливо забезпечити достатній обсяг пам'яті для зберігання всіх необхідних даних, що може бути досягнуто використанням однієї мікросхеми високої ємності або кількох менших мікросхем, якщо це підтримується архітектурою дрона. Інтерфейси SPI (Serial Peripheral Interface) або I2C (Inter-Integrated Circuit) зазвичай використовуються для підключення пам'яті, залежно від швидкості доступу до даних та сумісності з мікроконтролером або мікропроцесором дрона.

Пам'ять для дронів повинна мати високу швидкість читання і запису для обробки великих обсягів даних в реальному часі, особливо якщо дрон використовує камери та сенсори. Надійність є критично важливою для роботи в важких умовах, тому варто вибирати пам'ять зі стійкістю до вібрацій, екстремальних температур та інших стресових факторів. NAND Flash пам'ять зазвичай обирають через її надійність і довговічність. Важливо звертати увагу на виробників, таких як Samsung, Micron, Toshiba та Kingston, які пропонують високоякісні та надійні рішення. Необхідно знайти баланс між ціною і функціональністю, враховуючи всі вимоги до продуктивності та надійності.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 66   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Оскільки дрони мають обмежену кількість енергії, важливо вибрати пам'ять з низьким енергоспоживанням, щоб максимізувати тривалість польоту. Для такого завдання можна рекомендувати пам'ять Micron 3D NAND Flash Memory, яка відзначається високою ємністю та швидкістю, низьким енергоспоживанням та високою надійністю; Samsung V-NAND Flash Memory, відому своєю стабільністю та продуктивністю, підходить для інтенсивних завдань; а також Toshiba BiCS FLASH, яка забезпечує високу швидкість обробки даних та надійність при екстремальних умовах. У підсумку, вибір пам'яті ROM на 4 GB для дрона, призначеного для пошуку ВВП, таких як тип даних, які потрібно зберігати, вимоги до швидкості обробки даних, умови експлуатації та бюджет.

Мікросхема пам'яті MX35LFXG24AD (рис.3.7.) від компанії Macronix є SLC NAND флеш пам'яттю з місткістю 1Gb, 2Gb або 4Gb, що використовує 4-розрядну шину. Для версій 1Gb і 2Gb розмір сторінки складає (2048+128) байт, а розмір блоку — (128K+8K) байт. У версії 4Gb розмір сторінки складає (4096+256) байт, а розмір блоку — (256K+16K) байт [56].

Ця мікросхема вимагає використання 8-бітового ECC для корекції помилок (544 байтів на сторінку). Вона підтримує швидкий доступ до даних у різних режимах читання, з затримкою від масиву до регістру в 25 мкс і частотою роботи до 120 МГц. Операція програмування сторінки займає приблизно 320 мкс, а стирання блоку - близько 4 мс.

Мікросхема працює від однієї напруги в діапазоні 2.7 до 3.6 В. Вона підтримує BP біти для захисту груп блоків та унікальний ідентифікатор з PUF структурою коду. Пристрій відзначається низьким енергоспоживанням: максимальний активний струм під час читання, програмування чи стирання становить 30 мА, а в режимі сну — до 50 мкА.

MX35LFXG24AD має високу надійність, завдяки вбудованому рандомізатору (який можна активувати через Set Feature) та спеціальному режиму читання для відновлення даних. Типова зносостійкість програмування та стирання становить 60 тисяч циклів при використанні 8-бітового ECC на

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 67   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

512+32 байтів, а збереження даних гарантується на 10 років. Мікросхема працює в широкому діапазоні температур від -40°C до +85°C та поставляється в корпусі 8-WSO8 розміром 8x6 мм. Всі упаковані пристрої відповідають вимогам RoHS та не містять галогенів.

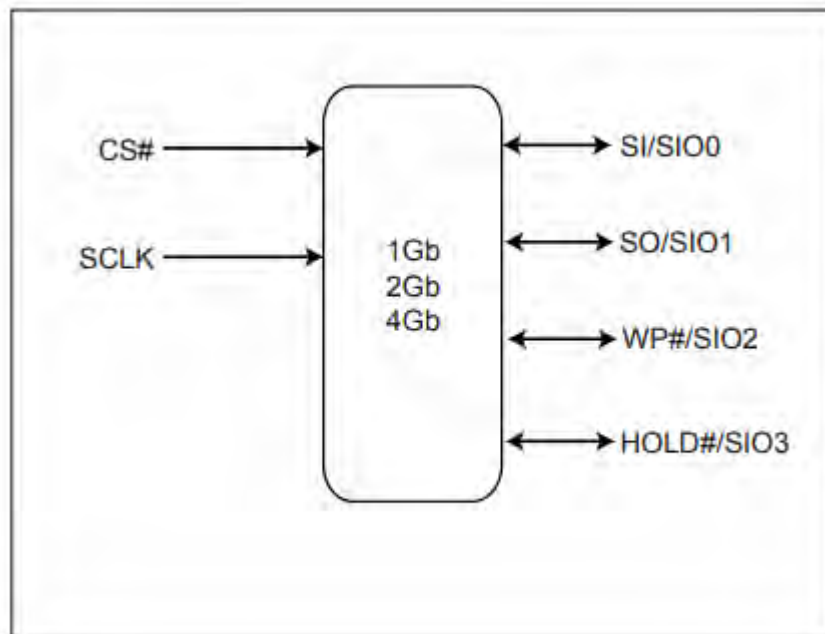


Рис.3.7. Схема виводів мікросхеми пам'яті MX35LFxG24AD

### 3.6. Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер STM32H7A3AGI6Q (рис.3.8.) включає передові технології, запатентовані ST, що забезпечують високопродуктивну та надійну роботу. Основу мікроконтролера становить 32-бітний процесор ARM Cortex-M7 з підтримкою подвійної точності та кешем L1, що включає 16 Кбайт даних і 16 Кбайт інструкцій, що дозволяє заповнити одну кеш-лінію за один доступ із вбудованої флеш-пам'яті на 128 біт. Процесор працює з тактовою частотою до 280 МГц, забезпечуючи продуктивність до 599 DMIPS/2.14 DMIPS/МГц (Dhrystone 2.1) та підтримку DSP інструкцій [57].

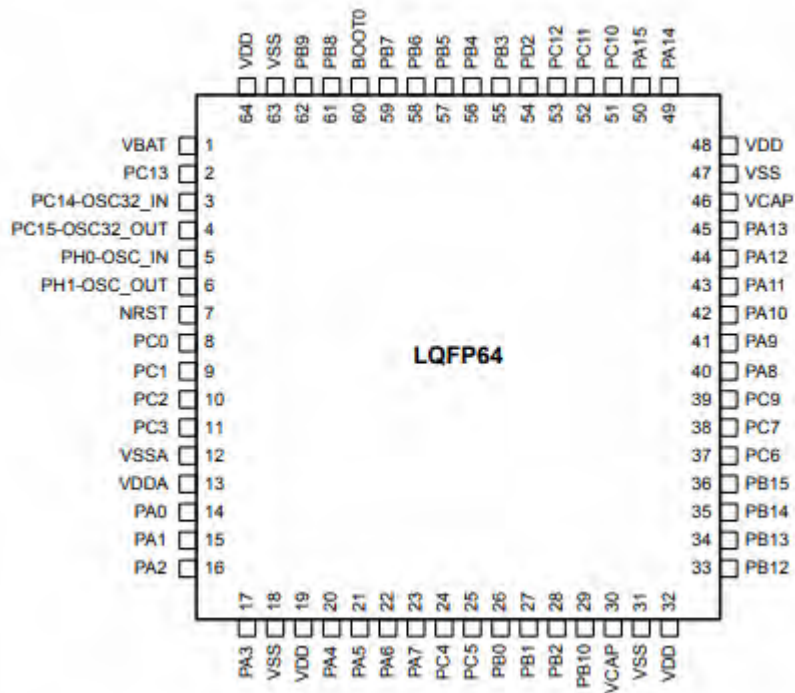


Рис.3.8. Схема корпусу STM32H7A3AGI6Q

Мікроконтролер має до 2 Мбайт флеш-пам'яті з підтримкою читання під час запису та 1 Кбайт OTP пам'яті. Він також має приблизно 1.4 Мбайт ОЗП, що включає 192 Кбайт TCM RAM (64 Кбайт ITCM RAM та 128 Кбайт DTCM RAM для критичних за часом завдань), 1.18 Мбайт користувацької SRAM та 4 Кбайт SRAM у резервному домені. Інтерфейси 2x Octo-SPI підтримують I/O мультиплексування та серіальні PSRAM/NOR, Hyper RAM/flash у форматах кадрів, що працюють на частотах до 140 МГц у SRD режимі та до 110 МГц у DTR режимі. Гнучкий контролер зовнішньої пам'яті підтримує шину даних до 32 біт та може працювати з SRAM, PSRAM, NOR флеш-пам'яттю з тактовою частотою до 125 МГц у синхронному режимі, SDRAM/LPSDR SDRAM та 8/16-біт NAND флеш-пам'яттю. Також присутній блок обчислення CRC.

Система забезпечує високу безпеку, включаючи ROP, PC-ROP, активне захист від підробки, підтримку безпечного оновлення мікропрограми. Вона підтримує до 168 портів вводу/виводу з можливістю переривань, швидкі I/O до 133 МГц та до 164 5-вольтових толерантних портів.

Мікроконтролер відзначається низьким споживанням енергії, забезпечуючи режим зупинки з повним збереженням ОЗП при 32  $\mu$ А, режим очікування з вимкненим резервним SRAM та увімкненим RTC/LSE при 2.8  $\mu$ А та режим VBAT з увімкненими RTC та LSE при 0.8  $\mu$ А. Управління годинником включає внутрішні осцилятори (64 МГц HSI, 48 МГц HSI48, 4 МГц CSI, 32 кГц LSI) та зовнішні осцилятори (4-50 МГц HSE, 32.768 кГц LSE), а також три PLL (1 для системного годинника та 2 для ядра) з фракційним режимом.

Система керування живленням має два окремі домени живлення, які можуть бути незалежно керовані для максимізації енергоефективності. Вона підтримує живлення від 1.62 до 3.6 В для застосування та I/O, включає POR, PDR, PVD та BOR, а також вбудований регулятор USB на 3.3 В для внутрішніх PNU. Крім того, наявний високоефективний перетворювач SMPS, резервний регулятор (~0.9 В) та режими низького споживання: Sleep, Stop та Standby. Підтримується робота від батареї VBAT з можливістю зарядки.

Система має три шини (1 AXI та 2 АНВ) та кілька мостів (5 $\times$  АНВ2АРВ, 3 $\times$  АХІ2АНВ), а також п'ять контролерів DMA для зменшення навантаження на CPU, включаючи високошвидкісний загальний контролер MDMA, два двопортові DMA з FIFO та маршрутизатором запитів, один базовий DMA з маршрутизатором запитів та один базовий DMA для DFSDM.

Система підтримує до 35 периферійних комунікаційних пристроїв, включаючи 4 $\times$  I2C FM+ (SMBus/PMBus), 5 $\times$  USART/5 $\times$  UART (ISO7816, LIN, IrDA, модемний контроль) та 1 $\times$  LPUART, 6 $\times$  SPI, включаючи 4 з повним дуплексом I2S для аудіо, 2 $\times$  SAI, SPDIFRX, SWPMI, MDIO Slave, 2 $\times$  SD/SDIO/MMC (до 133 МГц), 2 $\times$  CAN контролери (2 з CAN FD, 1 з TT-CAN), 1 $\times$  USB OTG (1HS/FS), HDMI-CEC, 8-14-біт інтерфейс камери до 80 МГц та 8-/16-біт паралельний синхронний інтерфейс вводу/виводу (PSSI).

|      |      |          |        |      |                    |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |                    |  |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |                    |  |  |  |  | 70   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ПК01.241760.000 ПЗ |  |  |  |  |      |

Аналогові периферійні пристрої включають 2× АЦП з максимальною роздільною здатністю 16 біт (до 24 каналів, до 3.6 MSPS), 1× аналоговий і 1х цифровий датчик температури, 1× 12-біт ЦАП з одним каналом у SRD домені та 1× 12-біт ЦАП з двома каналами, 2× порівнювачі з низьким енергоспоживанням, 2× операційні підсилювачі (8 МГц), 2× цифрові фільтри для модулятора сигма-дельта (1 з 8 каналами/8 фільтрами, 1 у SRD домені з 2 каналами/1 фільтром).

Графічні можливості включають контролер LCD-TFT до XGA роздільної здатності, графічний апаратний прискорювач Chrom-ART (DMA2D) для зменшення навантаження на ЦП, апаратний кодек JPEG та Chrom-GRC (GFXMMU). Таймери включають 2× 32-біт таймери з до 4 IC/OC/PWM або лічильником імпульсів і інкрементним енкодером (до 280 МГц), 2× 16-біт таймери для управління двигунами (до 280 МГц), 10× 16-біт загальні таймери (до 280 МГц), 3× 16-біт таймери з низьким енергоспоживанням (до 280 МГц), 2× сторожові таймери (незалежний та віконний) та 1× таймер SysTick. Реальний час і апаратний календар підтримуються через RTC з субсекундною точністю.

Мікроконтролер підтримує налагодження через інтерфейси SWD та JTAG, має вбудований буфер трасування на 4 КБ. Також він має 32-бітний генератор випадкових чисел, сумісний з NIST SP 800-90B, та унікальний 96-бітний ідентифікатор. Всі пакети відповідають стандарту ECOPACK2.

### 3.7. Розрахунок похибок

Розрахунок похибок в системі безпілотного літального апарату (БПЛА) для пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП) є критичним етапом проектування. Похибки можуть впливати на точність вимірювань, навігацію та здатність БПЛА виконувати свої функції ефективно.

Перш за все, важливо врахувати похибки, пов'язані з датчиками, такими як магнітометри, акселерометри та гіроскопи. Ці похибки можуть бути пов'язані з шумом сигналу, похибками калібрування, температурними змінами тощо. Для кожного типу датчика потрібно провести аналіз похибок і врахувати їх у проекті.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 71   |

Далі важливо розглянути похибки, пов'язані з навігаційними системами, такими як GPS або системи локалізації внутрішнього приміщення. Похибки вимірювання координат, часу та висоти можуть впливати на точність навігації та визначення місцезнаходження ВПП.

Крім того, слід враховувати похибки, пов'язані з управлінням та стабілізацією БПЛА. Навіть невеликі похибки в управлінні можуть призвести до неконтрольованих рухів апарату та порушення його функцій.

Для кожного типу похибок потрібно виконати розрахунки та провести випробування для оцінки їхнього впливу на систему [58]. На основі цих результатів можна приймати рішення щодо вдосконалення алгоритмів керування, вдосконалення калібрування датчиків та вдосконалення алгоритмів навігації для забезпечення максимальної точності та ефективності системи БПЛА для пошуку ВПП.

Основною похибкою датчика НМС5833L є не лінійність в межах діапазону вимірювання, який складає від -0.008 до +0.008 Тл. Відносна похибка вимірювання становить приблизно  $\pm 0.1\%$  від цього діапазону.

Абсолютна похибка датчика:

$$\Delta(B) = \frac{0.1 \cdot 0.0016}{100} = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{Тл} \quad (3.1)$$

За вказаним технічним завданням діапазон вимірювання дорівнює від 0 до +0.005 Тл. Тепер потрібно обчислити адитивну систематичну похибку, яка враховується в цьому діапазоні.

$$\gamma_{\text{пр1}} = \frac{1.6 \cdot 10^{-6}}{0.005} \cdot 100\% = 0.032\% \quad (3.2)$$

Відповідно до документації, датчик має роздільну здатність 12 бітів. При цьому, оскільки діапазон вимірювання становить 0.0016 Тл, найменший значущий біт при аналогово-цифровій обробці відповідає магнітному полю з таким значенням.

$$\Delta_{\text{ст.}} = \frac{0.0016}{4096} = 3.9 \cdot 10^{-7} \text{Тл} \quad (3.3)$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 72   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |



Відповідно до вказаного технічного завдання, діапазон вимірювання дорівнює від 0 до +0.005 Тл. Тепер потрібно розрахувати адитивну систематичну похибку, яка враховується в цьому діапазоні.

$$\gamma_{\text{пр1}} = \frac{3.9 \cdot 10^{-7}}{0.005} \cdot 100\% = 0.0078\% \quad (3.4)$$

Додатковою похибкою датчика HMC5833L є похибка від гістерезису. Ця похибка була розглянута: наведено один рядок, що стосується гістерезису. Джерело похибки вказано як Гістерезис, умови - вплив магнітного поля  $\pm 2$  Гауса, значення -  $\pm 25$ , а одиниці вимірювання - проміле.

Похибка виражається в мільйонних частках (ppm), що означає її незмінність незалежно від значення вимірюваної величини в усьому діапазоні вимірювань. Виходячи з цього,  $\gamma_{\text{пр2}} = 25 \cdot 10^{-4}\%$ . Сумарна похибка системи становить:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{пр1}} + \gamma_{\text{пр2}} + \gamma_{\text{пр3}} = 0.0395\%$$

За результатами розрахунків, сумарна похибка системи виявилася меншою за зазначену в технічному завданні ( $\gamma = 1\%$ ).

### 3.8. Висновки до розділу 3

Після ретельного аналізу різноманітних компонентів, включаючи магнітометричні датчики, мікроконтролери, пам'ять ROM та джерела живлення, можна зробити висновок про оптимальний підбір компонентів для безпілотного літального апарату (БПЛА) при пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП).

Магнітометри HMC5883L, LIS3MDL та BMM150 мають свої унікальні особливості. HMC5883L відрізняється високою точністю та компактним розміром, що робить його ідеальним для роботи в умовах електромагнітних перешкод. LIS3MDL та BMM150 мають широкий діапазон вимірювань та додаткові функції, що робить їх більш універсальними для різних застосувань, включаючи мобільні пристрої та системи з батарейним живленням.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 73   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Мікроконтролер STM32H7A3AGI6Q - потужний та надійний пристрій, ідеально підходить для використання в БПЛА. Його висока продуктивність та надійність забезпечують ефективну роботу системи.

Пам'ять ROM MX35LFxG24AD від Macronix відповідає вимогам щодо потужності, швидкості доступу та енергоспоживання, що робить її ідеальним вибором для надійної та продуктивної роботи дрона при пошуку ВНП.

При виборі джерела живлення, такого як літій-іонні акумулятори 18650, важливо враховувати параметри, такі як ємність та хімія акумулятора, для забезпечення надійності та продуктивності системи.

У підсумку, для досягнення успішної місії пошуку ВНП важливо обирати компоненти з урахуванням їхніх унікальних характеристик та вимог конкретної місії, щоб забезпечити максимальну ефективність та надійність системи БПЛА.

|             |             |                 |               |             |                           |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                           | 74   |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ КОРПУСА

### 4.1. Розробка корпусу

Для створення корпусу системи для пошуку вибухонебезпечних предметів (ВНП) використовується конструкція, яка включає в себе сім магніторезистивних датчиків, датчик гіроскопа та акселерометра, мікропроцесор, блок живлення, блок пам'яті та LTE модуль (рис 4.1.).

Конструкція передбачає розміщення одного магніторезистивного датчика в центрі корпусу, а всі інші шість датчиків встановлюються навколо центрального на відстані 0,5 метра від нього. Це дозволяє забезпечити рівномірне покриття та високу точність вимірювання змін у магнітному полі. Решта датчиків та електронних компонентів, включаючи гіроскоп, акселерометр, мікропроцесор, блок живлення, блок пам'яті та LTE модуль, розміщуються безпосередньо в корпусі.

Корпус виконує захисну функцію, забезпечуючи міцність і стійкість датчиків та інших елементів системи. Він також захищає електроніку від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Магніторезистивні датчики в цій системі вимірюють зміни магнітного поля, передаючи отримані дані на мікропроцесор. Мікропроцесор обробляє ці дані і через LTE модуль передає їх на хмарний сервер для подальшого аналізу та обробки.

Ця конструкція дозволяє ефективно вимірювати зміни в магнітному полі і визначати розташування ВНП. Порядок складання датчиків та компонентів у корпусі наступний: шість магніторезистивних датчиків вставляються у відведені їм місця навколо центрального датчика. Після цього корпус кріпиться до дрону за допомогою спеціального кріплення.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 75   |



Рис.4.1. Корпус з датчиками

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ПК01.241760.000 ПЗ

Арк.

76

Корпус повинен бути виготовлений з матеріалів, які мінімально або зовсім не впливають на магнітне поле, наприклад, з пластику. Враховуючи розміри компонентів, оптимальний розмір корпусу становить 200x200 мм, а маса конструкції складає 1,9 кг, що забезпечує достатній простір для розміщення всіх необхідних елементів системи та забезпечує їхню надійну роботу.

Таким чином, створена система забезпечує високоточне виявлення вибухонебезпечних предметів завдяки ефективній конструкції датчиків та використанню сучасних технологій для обробки та передачі даних.

#### 4.2. Кріплення до корпусу

Для створення кріплення системи до безпілотного літального апарату (БПЛА) використовується спеціально розроблена конструкція, що складається з чотирьох ніжок, які забезпечують надійне з'єднання між корпусом системи та дроном (рис.4.2.).

Верхня частина конструкції включає кришку, яка надійно прикріплюється до дрона, забезпечуючи стійке з'єднання і запобігаючи можливим переміщенням або від'єднанню системи під час польоту. Матеріал кришки обраний легким, але міцним, що дозволяє витримувати механічні навантаження та вібрації, які можуть виникати під час роботи БПЛА.

Ніжки конструкції забезпечують з'єднання між кришкою та корпусом системи. Вони достатньо міцні, щоб підтримувати вагу всієї системи, включаючи магнітрезистивні датчики, гіроскоп, акселерометр, мікропроцесор, блок живлення, блок пам'яті та LTE модуль. Ніжки також стійкі до зовнішніх впливів, таких як вібрація та удари, які можуть виникати під час зльоту, посадки та польоту дрона.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 77   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

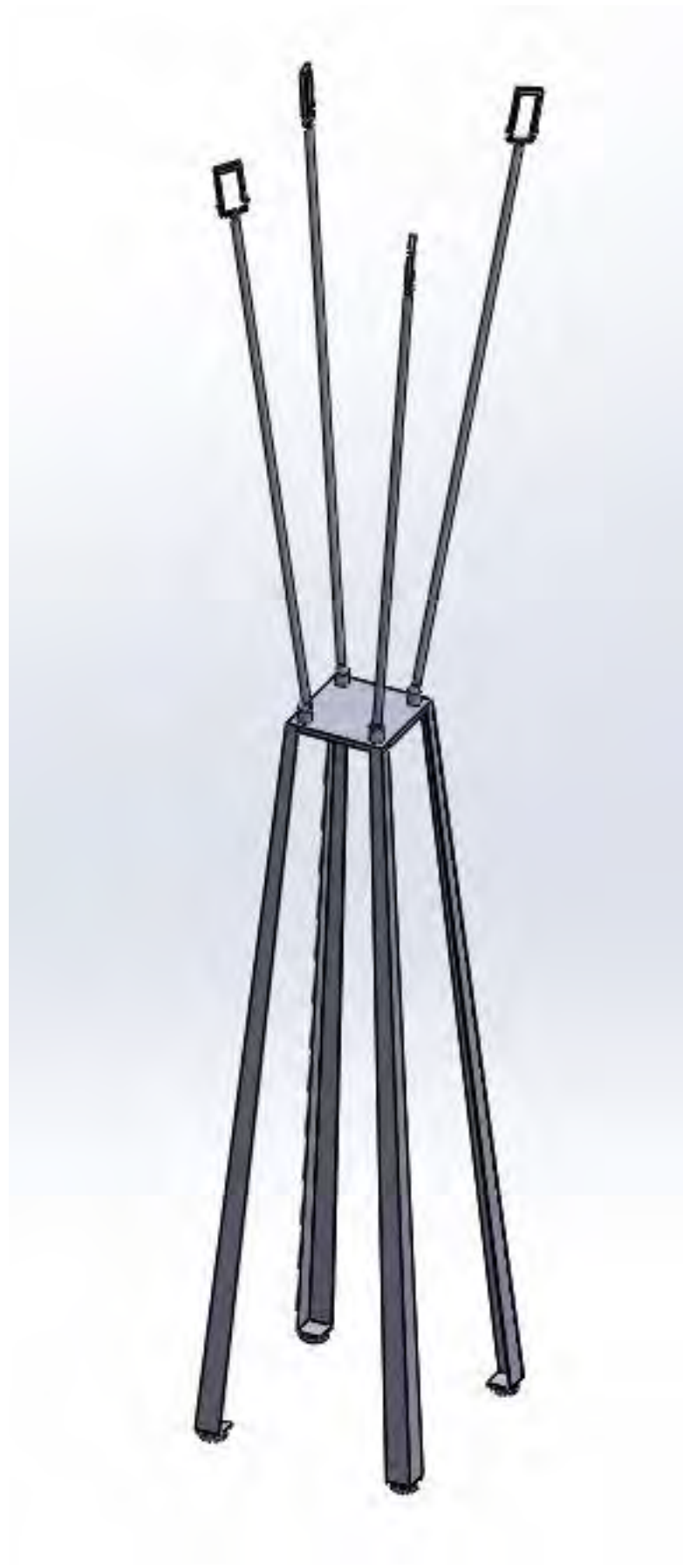


Рис.4.2. Кріплення корпусу до дрону

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ПК01.241760.000 ПЗ

Арк.

78

Конструкція має компактні розміри, що робить її зручною для інтеграції з різними моделями БПЛА. Загальний розмір конструкції становить 16x16 мм, що забезпечує мінімальне навантаження на дрон та не впливає на його аеродинамічні характеристики. Висота конструкції складає 600 мм, а маса конструкції складає 180 грам, що забезпечує достатній простір для розміщення корпусу системи та зберігання її стабільності.

Для виготовлення кріплення використовуються легкі та міцні матеріали, такі як алюміній або високоміцний пластик. Ці матеріали забезпечують необхідну жорсткість та довговічність конструкції, а також стійкість до корозії та інших негативних впливів навколишнього середовища.

Таким чином, розроблена конструкція кріплення забезпечує надійне та безпечне з'єднання системи для пошуку вибухонебезпечних предметів з БПЛА. Завдяки своїм компактним розмірам і міцним матеріалам, вона гарантує стабільну роботу системи під час виконання польотних завдань, а також мінімізує негативний вплив на аеродинамічні характеристики дрона.

#### 4.3. Висновки до розділу 4

Розроблена система пошуку ВНП, включаючи сім магніторезистивних датчиків, датчик гіроскопа та акселерометра, мікропроцесор, блок живлення, блок пам'яті та LTE модуль, виготовлена у корпусі з високоякісного пластику, забезпечує високоточне виявлення ВНП завдяки ефективній конструкції та використанню передових технологій. Оптимальний розмір корпусу забезпечує достатній простір для розміщення всіх необхідних елементів та забезпечує їхню надійну роботу.

Кріплення системи до БПЛА, яке складається з чотирьох ніжок та верхньої кришки, забезпечує надійне та безпечне з'єднання з дроном, мінімізуючи вплив на його аеродинамічні характеристики. Використання легких, але міцних матеріалів забезпечує стабільну роботу системи під час польоту.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 79   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Обидва компоненти, система пошуку ВНП та кріплення до БПЛА, спільно створюють ефективну та надійну систему для виявлення ВНП з використанням безпілотних літальних апаратів яка буде важити 2,1кг.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 80   |



## ВИСНОВКИ

У процесі розробки системи пошуку вибухонебезпечних предметів, спочатку було проведено огляд актуальності таких систем та існуючих методів розв'язання цієї проблеми. Серед розглянутих методів були візуальний, магнітометричний, тепловізійний, георадарний та лазерний. Після аналізу було вирішено, що магнітометричний метод найбільш підходить для цієї задачі, і конкретно був обраний градіометр магнітометр. Також були розглянуті існуючі рішення для магнітометричного пошуку з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Магнітометричний метод є важливим і надійним інструментом для виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) у різних ситуаціях і контекстах. Його ключовою перевагою є можливість виявлення феромагнітних об'єктів на значних глибинах з високою стійкістю до електромагнітних перешкод. Це робить магнітометри ідеальними для гуманітарного розмінування, де потрібно ефективно виявляти закопані міни та вибухівки. Вони забезпечують високу селективність, що допомагає знизити ризик помилкових спрацьовувань і дозволяє ефективно очищувати території від ВНП.

Були розроблені структурна та функціональна схеми системи, а також алгоритм її роботи.

Структурна схема демонструє взаємозв'язок між основними компонентами системи, такими як блок датчиків, мікроконтролер, LTE модуль, блок живлення, хмарний сервер, станція оператора, система обробки даних і дрон. Магнітометричний модуль збирає дані за допомогою блоку датчиків і передає їх на мікроконтролер, який виконує управління та обробку даних. Через LTE модуль зібрані дані передаються на хмарний сервер для подальшого аналізу. Станція оператора забезпечує контроль над дроном, який може використовуватися для точнішого позиціонування та збору додаткових даних.

Функціональна схема системи деталізує процес передачі та обробки даних. Кілька датчиків збирають різні параметри середовища та передають їх через I2C

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 81   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

інтерфейс до мікроконтролера. Мікроконтролер обробляє отримані дані та передає їх через LTE модуль на хмарний сервер, звідки дані можуть бути доступні для перегляду та аналізу на ПК. Система забезпечує високу точність і швидкість передачі даних, що є критичним для виявлення вибухонебезпечних предметів.

Основні особливості та переваги розробленої системи включають високу точність вимірювань завдяки використанню сучасних датчиків і магніторезистивного магнітометра. Вона дозволяє передавати дані в режимі реального часу на віддалений сервер через LTE модуль, забезпечує гнучкі варіанти живлення, що дозволяють системі працювати безперебійно навіть у складних умовах. Система також може інтегруватися з дроном для розширення функціональних можливостей і має надійний захист від перешкод та помилкових спрацьовувань завдяки високій селективності датчиків.

Після цього був проведений підбір необхідних елементів системи, таких як магнітометричний датчик, гіроскоп та акселерометр, LTE модуль, джерело живлення, мікроконтролер. Також було обрано магніторезистивний магнітометр як найбільш підходящий датчик для використання в системі. З метою точної локалізації магнітних аномалій було запропоновано метод точного виявлення магнітних аномалій який використовує систему з 7 датчиків.

Було описано залежність дистанцію виявлення предмету від його діаметру. Розраховано що... При дистанції до цілі в 5 метрів можна визначити об'єкт діаметром 0,5 метрів, а при дистанції 0.5 метрів можна визначити об'єкт діаметром 20 міліметрів.

Також було розроблено метод локалізації магнітних аномалій і розрахована дистанція локалізації ВВП. Завершальним етапом був розрахунок похибок вимірювання значень градієнтів магнітного поля, який дозволив з'ясувати сумарну похибку системи, яка дорівнює 0.0395%.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 82   |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Крамаренко С. Розробка способу дистанційного пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів і мін / Сергій Крамаренко // Полтавський державний аграрний університет. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pdau.edu.ua/news/naukovci-universytetu-rozrobyly-sposib-dystanciynogo-poshuku-ta-vyyavlennya-vybuhonebezpechnyh>.

[2] Халеп, В. В. Гуманітарне розмінування на території України як елемент національної безпеки держави / В. В. Халеп, М. Г. Саморок. // II Всеукраїнська науково-практична конференція кафедри тактико-спеціальної підготовки командно-штабного факультету Національної академії Національної гвардії України. – 2020.– с. 32-33

[3] Молочко с. М. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на бпак / С. М. Молочко. // Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2021. – С. 80–90.

[4] Krivtsun V. I. Дослідження процесів виявлення вибухонебезпечних предметів індукційним та радіохвильовим методами на основі результатів однофакторних експериментів / Krivtsun // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/2474>.

[5] Якотюк В.С. Аналіз ефективності методів пошуку вибухонебезпечних предметів із використанням БПЛА / В. С. Якотюк, А. С. Момот // Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 20-21 грудня 2023 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – с. 373-376

[6] Сигута, А. Дослідження методів пошуку вибухонебезпечних предметів / А. Сигута, О. Красножон // Технічні науки та технології. - 2024. - № 1 (35). - С. 156-169.

|      |      |          |        |      |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | 83   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |  |  |  |      |

ПК01.241760.000 ПЗ

[7] ICRC. (2020, червень 16). Drones with infrared cameras to find landmines. Inspired Blog. <https://blogs.icrc.org/inspired/2020/06/16/drones-infrared-cameras-mines/>

[8] Володимир Д. Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) району ведення бойових дій / Демчук Володимир., 2020. – 76 с.

[9] Skladchykov I.O. Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms / I. O. Skladchykov, A. S. Momot, R. M. Galagan, Bohdan G.A., Trotsiuk K.M. // Information Extraction and Process. – 2022. – №50. – pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.069>

[10] Боривітер. Дослідження: пошук мін дроном з тепловізором / Боривітер // Боривітер. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://boryviter.org.ua/articles/finding-mines-with-thermal-imager-drone-research-results/>.

[11] Галаган Р.М. Тестування нейромережкових модулів системи теплової дефектометрії за допомогою імітаційного моделювання / [Р. М. Галаган, А. С. Момот, А. Г. Протасов та ін.]. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2022. – №6. – с. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/08>

[12] Акваторія. Для чого проводять георадарне обстеження / Акваторія // Акваторія інженерно геологічна компанія – Режим доступу до ресурсу: <https://aquatoria.kiev.ua/bloh/heodezychni-vyshukuvannia/1249-dlia-choho-provodiati-georadarne-obstezhennia>.

[13] Андрій З. Зазирнути під землю, побачити крізь стіну, або Як георадарні технології можуть допомогти нашим військовим / Задубінний Андрій // Армія INFORM. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://armyinform.com.ua/2023/06/23/zazyrnuty-pid-zemlyu-pobachyty-kriz-stinu-abo-yak-georadarni-tehnologiyi-mozhut-dopomogty-nashym-vijskovym/>.

[14] Мосов, С. П. Напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування: світовий досвід / С. П. Мосов, В. Нероба // Збірник наукових праць національної академії державної прикордонної служби України серія: військові та технічні науки – 2019 – №1(79) – с.172-185

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 84   |

[15] Dronelife. (2023, грудень 15). Innovative Drone Program Combats Global Landmine Crisis with AI Precision. Dronelife. <https://dronelife.com/2023/12/15/innovative-drone-program-combats-global-landmine-crisis-with-ai-precision/>

[16] Magnetometer. (б.р.). У Britannica. <https://www.britannica.com/technology/magnetometer>

[17] Підгородецький М. М. Вибухонебезпечні предмети як елемент гібридних загроз: виклики та протидія / М. М. Підгородецький. – м. Київ: національний університет оборони України імені Івана Чарняховського, 2021. – 244 с. – (I Міжнародної науково-практичної конференції).

[18] Невлюдов І. Ш. Manufacturing & mechatronic systems / І. Ш. Невлюдов. – Харків: NURE, 2022. – 136 с. – (VI International Conference).

[19] Крищун В. І. Теоретичні підходи щодо вибору методів виявлення вибухонебезпечних предметів в середовищах, що їх приховують, переваги та недоліки / В. І. Крищун. // державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2024.

[20] Geodevice. Геофізичне спорядження для археології і пошуку ехо війни [Електронний ресурс] / geodevice // GEODEVICE. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://geodevice.kz/main/archaeology/>.

[21] Про магнітометри та вимірювання магнітного поля // БРОМ. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://brom.ua/uk/scho-take-magnitometr-ukr>.

[22] Зразковий ферозондовий магнітометр lemi-025 стандарту інтермагнет // Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та Державного космічного агентства України – Режим доступу до ресурсу: <https://files.nas.gov.ua/nasdevelopmentsbook/PDF/0518.pdf>.

[23] Трикомпонентний ферозондовий магнітометр lemi-011 // Lviv Centre of Institut for Space Research. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.isr.lviv.ua/lemi011ua.htm>.

[24] Океанський Магнітний Морський Цезевий Оптичний Магнітометр // GOLD – Режим доступу до ресурсу: <http://ua.geoequips.com/geophysical->

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 85   |

[equipment/magnetometer/ocean-magnetic-marine-caesium-optical-pump.html](https://doi.org/10.5281/zenodo.6809758).

[25] Momot A. Automation of ultrasound breast cancer images classification using deep neural networks / A. Momot, R. Galagan, M. Zabolueva // Sciences of Europe. – 2022. – №96. – pp. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6809758>

[26] «Квантове радіо» замість GPS // Винахідник і Радіоналізатор. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://vir.uan.ua/kvantove-radio-zamist-gps/>.

[27] Оверхаузеровский магнитометр smartmag // GEODEVICE – Режим доступу до ресурсу: <https://geodevice.kz/main/magnetometers/smartmag/>.

[28] Momot A. Automated segmentation of ultrasound medical images using the Attention U-Net model / A. Momot, M. Zabolueva, R. Galagan // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2024. – №128. – pp. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10817342>

[29] Универсальный оверхаузеровский магнитометр-градиентометр maximag [Електронний ресурс] // GEODEVICE – Режим доступу до ресурсу: <https://geodevice.kz/main/magnetometers/maximag/>.

[30] Довбиш І.О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І. О. Довбиш, О. В. Муравйов, Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, А. С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73), №5. – С. 16-21. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>

[31] Kryukov, A., & Eremenko, A. (2020). Subsurface sensing of landmines using nuclear quadrupole resonance. Surface and Interface Analysis, 52(12), 1552–1560. <https://doi.org/10.1002/sia.6762>

[32] Huang, C., Li, X., & Kang, D. (2019). Recent advances in fiber optic sensors for multi-parameter measurement. Microsystem Technologies, 25(5), 1441–1457.

[33] Аномальне магнітне поле та його зв'язок з глибинною будовою і тектонікою Українських Карпат / В.Г. Кузнецова, В.Ю. Максимчук // Геодинаміка. — 2011. — № 1(10). — С. 127-133.

[34] Steshenko Y. V. Automation of the process of segmentation of images of metal surface defects using the neural network U-Net / Y.V. Steshenko, A.S. Momot, A.G. Protasov O.V. Muraviov // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 86   |

.- 2023. – № 2. – pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.05>

[35] Mohan, V., & Venkatakrisnan, K. (2014). A survey of landmine detection technologies. *Procedia Engineering*, 97, 1840–1849. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.281>

[36] Муравйов О. В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / О. В. Муравйов, І. О. Довбиш, Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, А. С. Момот // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* – 2023. – Том. 34 (73), №2. – С. 199-205. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>

[37] Вибір та аналіз роботи датчиків для розробки надійної системи навігації та контролю телекерованої роботизованої платформи. // *Ela.kpi.* – 2022. – С. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ba36a74e-b817-46fb-bee4-d2490ef98872/content>.

[38] Small-voltage region of the current-voltage characteristic shown in Fig. 3(a). Because of an anomalous offset, the characteristics do not pass through the origin. // *researchgate* – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/figure/Small-voltage-region-of-the-current-voltage-characteristic-shown-in-Fig-3a-Because-of\\_fig5\\_351017672](https://www.researchgate.net/figure/Small-voltage-region-of-the-current-voltage-characteristic-shown-in-Fig-3a-Because-of_fig5_351017672).

[39] 3D magnetic sensors // *infineon* – Режим доступу до ресурсу: [https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/magnetic-sensors/magnetic-position-sensors/3d-magnetics/?Gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwpNuyBhCuARIsANJqL9Mi-ct3tb8qkph93r7cx2rirnsy2mi9igmn0tfwg3dw9opghqoy2i4aajsaealw\\_wcb&gclsrc=aw.ds](https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/magnetic-sensors/magnetic-position-sensors/3d-magnetics/?Gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwpNuyBhCuARIsANJqL9Mi-ct3tb8qkph93r7cx2rirnsy2mi9igmn0tfwg3dw9opghqoy2i4aajsaealw_wcb&gclsrc=aw.ds).

[40] Measurement of Magnetic Microstructures with a Faraday Rotation Magnetometer // *IEEE Xplore.* – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9129622>.

[41] SQUID Magnetometer – Режим доступу до ресурсу: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/Squid.html>.

[42] Синтез системи виявлення вибухонебезпечних предметів на базі безпілотного літального апарата. // *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки..* – 2023. – С. 163–170.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 87   |

[43] Figure - available from: Biomedical Physics & Engineering Express // researchgate – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/figure/Determination-of-the-GNP-detection-limit-a-The-plot-demonstrating-the-linear\\_fig3\\_356839009](https://www.researchgate.net/figure/Determination-of-the-GNP-detection-limit-a-The-plot-demonstrating-the-linear_fig3_356839009).

[44] Momot A. The use of magnetometric gradiometers in explosive ordnance detection / A. Momot, V. Yakotiuk // Proceeding of XXIII International scientific and technical conference INSTRUMENT MAKING: state and prospect, 14-15 May 2024, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: IMF of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. – pp. 267-270.

[45] Аномальне магнітне поле та його зв'язок з глибинною будовою і тектонікою українських карпат. // НАН України. – 2011. – С. 127–133.

[46] Wang, X., Li, X., & Li, Z. (2019). A Review of Fiber Optic Sensors Based on Reflection and Refraction Interference. IEEE Sensors Journal, 20(4), 1543–1552.

[47] Verma, A. K., Shinde, P., & Singh, M. (2017). A low-cost magnetic survey system for landmine detection. IEEE Sensors Journal, 17(6), 1845–1851. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2662190>

[48] LIS3MDL Datasheet // Alldatasheet – Режим доступу до ресурсу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/880677/STMICROELECTRONICS/LIS3MDL.html>.

[49] Momot A. Areas of application of the yolov8 deep learning model in non-destructive testing / A. Momot, O. Zemliakov // Proceeding of XXIII International scientific and technical conference INSTRUMENT MAKING: state and prospect, 14-15 May 2024, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: IMF of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. – pp. 231-233.

[50] BMM150 Datasheet // Alldatasheet – Режим доступу до ресурсу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/608913/ETC2/BMM150.html>.

[51] Talesa B. How To Get Useful Data From Your Magnetometer [Електронний ресурс] / Bleything Talesa // DIGILENT//BLOG. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://digilent.com/blog/how-to-get-useful-data-from-your-magnetometer/>.

[52] Yakotiuk V.S. UAV-based magnetometric module for detecting explosive

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 88   |



objects / V. S. Yakotiuk, A. S. Momot // Збірник праць XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Погляд у майбутнє приладобудування”, 14-15 травня 2024р. –К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2024. – с. 258-261

[53] MPU-6050 Datasheet // Alldatasheet – Режим доступу до ресурсу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517744/ETC1/MPU-6050.html>.

[54] How to Select the Right LTE Modules for Panel pcs, Industrial Computers and Rugged Tablet pcs // ESTONE TECHNOLOGE – Режим доступу до ресурсу: <https://www.estonetech.com/tech-blog/guide-choosing-lte-modules-panel-pcs/>.

[55] How to Choose a Drone Battery // UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY – Режим доступу до ресурсу: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/how-to-choose-a-drone-battery/>.

[56] MX35LFxG24AD // MXIC. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tme.eu/Document/8843e518146a853d253b66df208756f9/MX35LF1G24AD-Z4ITR.pdf>.

[57] STM32H7A3AGI6Q // ST life.augmented. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tme.eu/Document/94f850c15a2fb003c4530843ceba6dfc/stm32h7a3ag.pdf>.

[58] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

[59] Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.

[60] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

[61] Lysenko, Iuliia, Kuts, Yurii, Uchanin, Valentyn, Mirchev, Yordan and Levchenko, Oleksandr. "Evaluation of Eddy Current Array Performance in Detecting Aircraft Component Defects" Transactions on Aerospace Research, vol.2024, no.2,

|      |      |          |        |      |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | 89   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |  |  |  |      |

ПК01.241760.000 ПЗ

2024, pp.1-9.

[62] Lysenko I, Kuts Y, Petryk V, Malko V, Melnyk A. Automated eddy current system for aircraft structure inspection. Transactions on Aerospace Research. 2023;4(273):33–40.

[63] Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V., Mirchev, Y., Alexiev, A. (2023). Problems of Using Eddy Current Arrays NDT. In: Pawelczyk, M., Bismor, D., Ogonowski, S., Kacprzyk, J. (eds) Advanced, Contemporary Control. PCC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 708. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9_27)

[64] Lysenko I. Analysis of formation processes of informative features in eddy current probes with pulsed excitation mode / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov // Proceedings of the 13th European Conference on Non-Destructive Testing 2023, NDT.net Issue: 2023-07. Access mode: <https://www.ndt.net/?id=28086> (last access: 10.07.23).

[65] Lysenko, I. Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components / Lysenko I., Mirchev Y., Levchenko O., Kuts Y., Uchanin V. // International Journal “NDT Days”. – BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – P. 84-88. 26.

[66] Using the Red Pitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”. - BSNDT: Bulgaria, 2023. - Volume 6, Issue 4. - P. 194-201 27.

[67] Eddy Current Array Testing of Steel Tube Profiles / Y. Mirchev, I. Lysenko, Ts. Borisov, V. Kovtun, P. Chukachev // International Journal “NDT Days”. - BSNDT: Bulgaria, 2023. - Volume 6, Issue 3. - P. 137-147.

[68] Lysenko I, Kuts Y, Uchanin V, Protasov A, Petryk V, Alexiev A. Using the Pulsed Eddy Current Techniques for Monitoring the Aircraft Structure Condition. Transactions on Aerospace Research. 2023;1(270):22–31. Available from: <https://doi.org/10.2478/tar-2023-0003>.

[69] Zhong, M., Kuts, Y., Kochan, O., Lysenko, I., Levchenko, O., Vlach-Vyhrynovska, H.: Using signal phase in computerized systems of non-destructive

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ITK01.241760.000 IT3</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 90   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

testing. Measur. Sci. Rev. 22(1), 32–43 (2022).

[70] Iuliia, Lysenko, Valentin, Uchanin, Valentyn, Petryk, Yurii, Kuts, Anatoliy, Protasov and Alexander, Alexiev. “Intelligent Automated Eddy Current System for Monitoring the Aircraft Structure Condition.” 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC): pp. 1–5. Kyiv, Ukraine, 2022, DOI 10.1109/SAIC57818.2022.9922968.

[71] Куц Ю.В. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумовій дефектокопії / М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №1, стор. 45-53.

[72] Kuts, Y., Kochan, O., Lysenko, I., Huminilovych, R. (2021). Methodology for measuring phase shifts of signals using discrete Hilbert transform. In 13th International Conference on Measurement. IEEE, 18-21. <https://doi.org/10.23919/Masurement52780.2021.9446811.10.23919/Masurement52780.2021.9446811>

[73] Kuts, Yu.V., Uchanin, V.M., Lysenko, Yu.Yu., Levchenko, O.E.: Application of Hilbert transform for analysis of signals of automated eddy current inspection. Part 1. Theoretical aspects of Hilbert transformation application at eddy current inspection. In: Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, №3, pp. 7–13 (2021).

[74] Kuts, Yurii, Uchanin, Valentyn, Lysenko, Jully, Petryk, V.F., Bohdan, G.A. and Levchenko, Oleksandr. “Application of Hilbert Transform for Analysis of Signals of Automated Eddy Current Inspection. Part 2. Deriving secondary Diagnostic Features and Examples of Realization.” Technical Diagnostics and Non Destructive Testing No. 4 (2021) pp. 11–18.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>ПК01.241760.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 91   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |