



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.269>

УДК 004.3, 004.9, 550

## Прототип бортового магнітометра БпЛА для виявлення мін на суходолі

С. В. Чорний<sup>1</sup>, С. С. Дугін<sup>2</sup>, С. А. Станкевич<sup>2</sup>, М. О. Попов<sup>2</sup>, С. І. Голубов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, пр. Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, Київ, 03187, Україна

<sup>2</sup> ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", вул. Олесь Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

У цій роботі описано розроблений та досліджений прототип бортового магнітометра безпілотного літального апарата (БпЛА) для вирішення завдань дистанційного пошуку мін та інших вибухонебезпечних предметів. Проаналізовано доступні апаратні засоби вітчизняного та іноземного виробництва для його створення з урахуванням точності вимірювань, габаритів та ваги. На підставі цього аналізу підбрано комплект обладнання та створено прототип бортового магнітометра БпЛА, що забезпечує вимірювання трьох просторових компонент магнітного поля Землі, географічних координат вимірювального блока та запис цих даних на бортові портативні магнітні носії. Для забезпечення автономності та універсальності розроблений прототип пов'язується з носієм лише механічно. Також розроблено програмне забезпечення для попередньої обробки даних бортового магнітометра та супутникової підсистеми позиціонування, які накопичуються на магнітних носіях. Працездатність прототипу перевірена у лабораторних та польових умовах шляхом магнітометричних вимірювань зразків типових наземних мін, вибухонебезпечних та інших металевих предметів на територіях міст Харків, Київ та Кам'янець-Подільський. Варіація показань – середньоквадратичне відхилення (СКВ) магнітометра в польових умовах становить 1,6 нТ. Продемонстрована можливість отримання магнітних сигнатур мін та вибухонебезпечних предметів за допомогою розробленого прототипу на прикладі зразка протитанкової наземної міни ТМ-62М. Експериментально визначена максимально припустима висота виявлення такої міни із задовільною ймовірністю становить близько 2,0 м.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат (БпЛА), прототип бортового магнітометра, магнітне поле Землі, магнітна сигнатура, наземна міна.

© С. В. Чорний, С. С. Дугін, С. А. Станкевич, М. О. Попов, С. І. Голубов. 2024

### Вступ

Інтервенція військ російської федерації на територію України стала початком повномасштабної війни на територіях обох держав. Це призвело до мінування значних територій, насамперед України. Очищення територій від вибухонебезпечних предметів є складним завданням, яке пов'язане з картографуванням значних за обсягом замінованих територій. Тому в цій роботі розглядається використання для виявлення вибухонебезпечних предметів дистанційно керованих повітряних суден (БпЛА), оснащених бортовими магнітометричними засобами виявлення таких об'єктів та визначення їх координат для картографування замінованої місцевості.

Пошук об'єктів за допомогою бортових магнітометричних систем має давню історію. Основним фізичним явищем, на якому ґрунтуються методи пошуку об'єктів за допомогою магнітометрів, є спотворення нормального магнітного поля Землі (МПЗ).

Найбільшого розвитку технології вимірювання параметрів магнітних аномалій МПЗ за допомогою бортових засобів набули в космічній (орієнтація,

вимірювання загальних варіацій МПЗ на борту космічних апаратів), авіаційній (навігація, пошук об'єктів за аномаліями МПЗ) та морській (навігація, вимірювання аномалій МПЗ суден) галузях.

Взагалі серед засобів вимірювання магнітного поля слід зазначити такі основні їх типи, що базуються на різних методах вимірювання магнітного поля (Білецький, 2004; Бойко, Бойко, 2004):

- індукційні;
- ферозондові;
- квантові (ядерний парамагнітний резонанс, надпровідні);
- гальвано-магнітні (засновані на ефекті Хола, магніторезистивні) та ін.

Окрім вимірювачів магнітного поля, для пошуку металевих предметів у наземних умовах поширені металодетектори (металошукачі), принцип дії яких полягає у вимірюванні зміни характеристик коливального контуру при внесенні до нього металевого предмета.

Відомі сучасні приклади підвішування металодетекторів до БпЛА для пошуку вибухонебезпечних предметів. Серед бортових засобів вимірювання параметрів аномалій МПЗ, зокрема викликаних присутністю певних об'єктів

\*E-mail: [asdfieldspec3@gmail.com](mailto:asdfieldspec3@gmail.com)

пошуку, нині найбільш поширені ферозондові магнітометри внаслідок їх високої чутливості та малих габаритів.

Отже маємо два основних методи пошуку вибухонебезпечних предметів: на основі вимірювання магнітометром аномалії МПЗ та на основі вимірювання параметрів резонансного контуру металошукача.

Магнітометри та металошукачі резонансного типу мають різні переваги та недоліки.

Магнітометри дають змогу виявляти предмети з магнітних матеріалів і безпосередньо не реагують на металеві предмети з немагнітних матеріалів. Дальність їх дії може, залежно від розмірів об'єкта пошуку та рівня шумів носія, сягати сотень метрів (пошук підводних човнів). Ферозондові магнітометри при належній чутливості можуть мати відносно малі розміри (до 10 см).

Резонансні металошукачі дають змогу виявляти металеві предмети незалежно від їх магнітних властивостей. Проте, забезпечення їх чутливості потребує наявності певних розмірів рамок коливального контуру (зазвичай понад 20 см у діаметрі). Дальність їх дії обмежується кількома метрами.

Зважаючи на умови використання системи пошуку вибухонебезпечних предметів з борту БпЛА (малі розміри та енергоспоживання системи, висота датчика системи над об'єктом 1–5 м залежно від ландшафту), перевагу у використанні потенційно матимуть більш чутливі прилади типу ферозондових магнітометрів.

## Сучасні можливості магнітометричної апаратури у компонуванні з БпЛА

Далі розглянемо ферозондові магнітометри з погляду їх практичного застосування на борту малих дистанційно пілотованих та безпілотних малих літальних апаратів (БпЛА) для завдань пошуку мін та вибухонебезпечних предметів. Основними параметрами таких магнітометрів у цьому випадку є чутливість, маса, енергоспоживання та вартість.

Характеристики сучасних типів ферозондових магнітометрів, придатних для використання на БпЛА з погляду ваги та чутливості, наведені в Табл. 1.

Слід відмітити, що більшості типів магнітометрів немає у відкритому продажу, вони доступні лише після замовлення, а їх отримання замовником потребує певного часу. Також деякі з них, імовірно, можуть мати обмеження в постачанні до України. Враховуючи ці обставини, доцільно зосередити увагу на цьому етапі досліджень лише на тих зразках, що комерційно доступні і є у відкритому продажу з визначеною ціною. З них найменшу вартість при інших прийнятних характеристиках (рівень шумів, вага) має 3-вісний ферозондовий цифровий магнітометр типу HWT3100 у варіанті HWT3100TTL. Однак, цей магнітометр не має функції запису даних. Тому для його повнофункціонального використання необхідно мати щонайменше пристрій запису даних (логер) та (для автономного використання) ще модуль GPS та логер його інформації.

Таблиця 1. Характеристики магнітометричних систем для легких БпЛА

Тип	Чутливість, мВ/нТ	Діапазон, нТ	Шум, нТ	Частота, Гц	Потужність, Вт	Розміри, мм	Вага, г
HS-MS-FG3LN-100 (WitMotion HWT3100)		$\pm 10^5$	0,1	200	4	датчик 30×30×120 логер 35×76×100	155 + 252
HWT3100 (Флюксейт магнітометри)		$\pm 8 \cdot 10^8$	13	460800 бод	0,03	83×25×25	50
LEMI-011 (Порівняння магнітометрів)	45	$\pm 5 \cdot 10^4$	0,1	20	0,03	160×20×7	
LEMI-024 (Порівняння магнітометрів)	0,056	$\pm 8 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-3}$	500	0,35	76×76 + 110×75×67	
LEMI-029 (Порівняння магнітометрів)		$\pm 7,8 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-3}$	180	0,43	62×38×38	
LEMI-031 (Порівняння магнітометрів)	0,6	$\pm 5,3 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	15		70,5×32 + 84×22	
TFM 100S [5]	0,1	$\pm 10^5$	0,1	150	0,56	36,6×35,8×154,4	200
TFM65-VQS (MagDrone R3)	0,1	$\pm 6 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	3500	0,4	35,1×32,3×82,6	105
TFM100-G2 (MagDrone R3)	0,1	$\pm 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	500–4000	0,4	35,1×32,3×82,6	100
HFM500 (MagDrone R3)	0,02	$\pm 5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-2}$	500–4000	0,4	35,1×35,1×153,7	182
MagDrone (MagDrone R3)		$\pm 7,5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-2}$	250	5	1070×22 + 230×128×43	750

## Прототип бортового магнітометра на БПЛА

Виходячи з означеного, авторами розроблений прототип магнітометра дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів (далі – ПМ), який створено як автономний пристрій реєстрації трьох просторових компонент магнітного поля та географічних координат точки вимірювання.

До складу ПМ входять блок електроніки та магнітометр:

- Трикомпонентний магнітометр у вологозахисному виконанні HWT3100TTL;
- Модуль GPS ATGM336H-5N;
- Модуль реєстрації даних магнітометра Nase32F3;
- Модуль реєстрації координат Nase32F3;
- Модуль живлення на 3 батареї формату AA.
- Вмикач живлення;
- Вмикач синхронізації логерів від GPS;
- Металева планка для підвішування ПМ до носія;
- Корпус блока електроніки.

Принципова схема з'єднань компонентів ПМ наведена на Рис. 1.

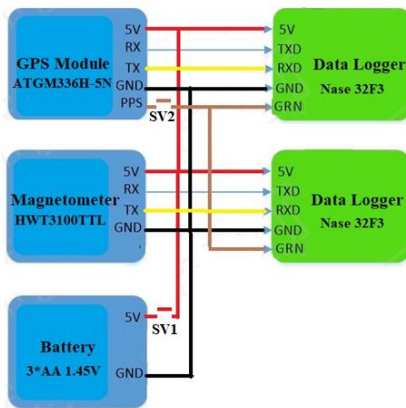


Рис. 1. Принципова схема з'єднань компонентів прототипу магнітометра

Для керування роботою ПМ передбачені вмикачі SV1 (увімкнення живлення) та SV2 (увімкнення синхронізації логерів від GPS). Загальний вигляд розробленого прототипу показаний на Рис. 2.

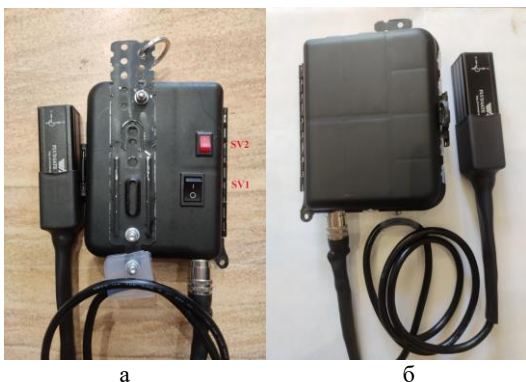


Рис. 2. Загальний вигляд прототипу (а – вид спереду, б – зворотний бік корпусу)

Розміщення елементів у корпусі ПМ наведено на Рис. 3.

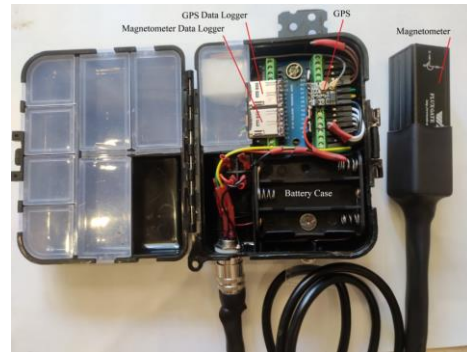


Рис. 3. Розміщення елементів у корпусі ПМ

Увімкнення ПМ у роботу здійснюється вмикачем живлення SV1, розміщеним на корпусі блока електроніки (БЕ) (Рис. 2, а). Після подачі напруги на елементи електричної схеми БЕ магнітометр та модуль GPS починають передавати інформацію на відповідні модулі реєстрації даних (Data Logger). Синхронізація запису даних здійснюється сигналом PPS від модуля GPS, який подається на входи GRN обох модулів реєстрації даних у разі замкнутого положення вмикача SV2. Цей сигнал формується лише після переходу модуля GPS у режим визначення координат.

До моменту переходу модуля GPS у режим визначення координат дані записуються у початкові текстові файли на відповідні SD-карти модулів реєстрації даних. Якщо вмикач SV2 не замкнутий, то дані GPS та магнітометра записуються в окремі файли несинхронно та безперервно.

Після переходу модуля GPS у режим визначення координат (щосекунди формується сигнал PPS) дані записуються в окремі (для кожного імпульсу PPS) текстові файли на відповідні SD-карти модулів реєстрації даних. Внаслідок відсутності синхронізації електронної схеми магнітометра із сигналом PPS перший і останній рядки даних спотворені і мають бути вилучені на етапі попереднього оброблення даних після польоту.

Для здійснення попереднього оброблення даних розроблено необхідні програми мовою Python.

Перевірку працездатності прототипу здійснено в лабораторних та польових умовах шляхом обходу та обльоту металевих предметів на територіях міст Харків, Київ та Кам'янець-Подільський. Варіації даних магнітометра (СКВ у відсутності об'єкта) становили 2.6 нТ у лабораторних умовах та 1.6 нТ – у польових.

Приклад результатів оброблення даних магнітометра наведений на Рис. 4 у вигляді дискретної похідної записаних даних.

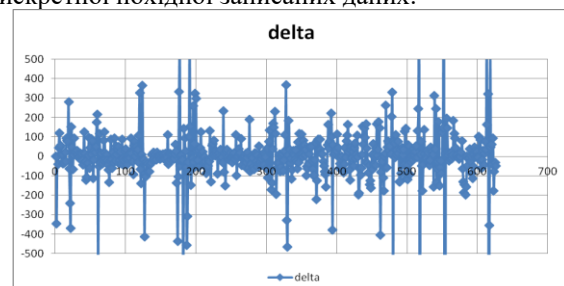


Рис. 4. Приклад даних, що генеруються магнітометром

## Апробація магнітометра в лабораторних та польових умовах

За допомогою розробленого ПМ авторами проведено дослідження сигнатур вибухонебезпечних предметів на прикладі зразка протитанкової міни ТМ-62М без детонатора (Рис. 5) у лабораторних умовах.



Рис. 5. Протитанкова міна ТМ-62М

Міна ТМ-62М є протитанковою міною радянського виробництва, розробленою для ураження броньованої техніки. Вона має корпус циліндричної форми, виготовлений з металу, і наповнена вибуховою речовиною. Застосовується з підривниками типу: МВЧ (мінний підричник з годинниковим механізмом уповільнення), МВП (з пневматичним механізмом уповільнення), МВШ (зі штирковим датчиком). Вибух відбувається при наїзді гусеницею танка чи колесом автомобіля на верхню кришку міни. ТМ-62М призначена для розміщення на земній поверхні або закопування в ґрунті, що робить її небезпечною для бронетехніки та транспорту. Її застосування передбачає створення мінних полів для затримки або знищення ворожих сил на полі бою.

Схема проведення вимірювань наведена на Рис. 6.



Рис. 6. Схема проведення вимірювань магнітної сигнатури міни

Вимірювання трьох компонент магнітного поля у цьому експерименті проведено для висот 2,5, 43 та 74,5 см. На кожній висоті вимірювання магнітного поля здійснювалося з кроком 2 см на відстанях від -60 до +60 см відносно центра міни. Вимірювання проводилися шляхом включення ПМ на 10 с у кожній із позицій. Кількість відліків магнітного поля на кожній позиції сягала 80–120.

Отримані дані просторових компонент магнітного поля перераховувалися в модуль напруженості магнітного поля, який усереднювався по кожній позиції магнітометра і давав одне значення на кожну позицію. Значення сигнатури

аномалії обчислювалося як різниця між значенням модуля на позиції та значенням модуля у віддаленому від об'єкта положенні ПМ.

Отримані у такий спосіб сигнатури аномалії магнітного поля міни (відносно середнього значення магнітного поля на віддаленні від міни) на вказаних висотах наведені на Рис. 7. Звідси неважко визначити, що значення сигнатур мають певний, майже лінійний тренд з градієнтом  $-2,413$  нТ/см, який потрібно усунути. Сигнатури аномалії магнітного поля міни без тренду наведені на Рис. 8.

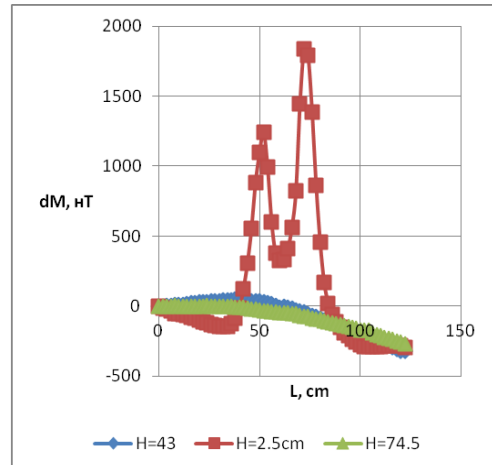


Рис. 7. Первинні сигнатури аномалії магнітного поля міни з трендом

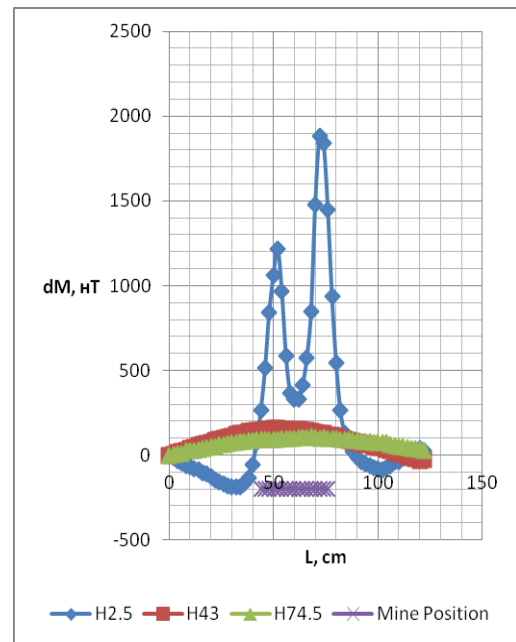


Рис. 8. Сигнатури аномалії магнітного поля міни з вилученням лінійного тренду

Також було проведено вимірювання магнітних сигнатур кількох інших типів мін ПМ, встановлених на борт БПЛА DJI Matrice 300 RTK, з висот 0,5, 1,0 та 2,0 м. Зафіксоване надійне виявлення міни.

У ході дослідження було розроблено прототип бортового магнітометра, спеціально призначеного для малого БПЛА. В основі конструкції лежить серійний тривісний ферозондовий цифровий магнітометр моделі HWT3100TTL, що забезпечує достатньо точне вимірювання магнітного поля.

Для перевірки працездатності створеного прототипу були організовані експериментальні випробування в лабораторних умовах, а також польові дослідження.

Одним із ключових результатів дослідження стало отримання магнітних сигнатур типової наземної протитанкової міни ТМ-62М, що дало змогу визначити характерні особливості її магнітного поля. Це стало основою для апроксимації залежності максимуму магнітної аномалії від висоти польоту апарата. Важливим здобутком стало підтвердження можливості виявлення міни за допомогою розробленого бортового магнітометра з висоти до 2 метрів. Тобто отримані результати свідчать про можливість ефективного виявлення прихованих вибухових пристроїв у польових умовах.

### Література

- Білецький, В. С. (Ред.). (2004). *Мала гірнича енциклопедія* (Т. 1). Донецьк: Донбас. ISBN 966-7804-14-3.
- Бойко, В. С., Бойко, Р. В. (2004). Тлумачно-термінологічний словник-довідник з нафти і газу (Т. 1). Київ: Міжнародна економічна фундація.

- WitMotion HWT3100. (н.д.). AliExpress. Взято з <https://www.aliexpress.com/item/1005003105895528.html>.
- Флюксгейт магнітометри. (н.д.). LEMISensors. Взято з [https://lemisensors.com/?page\\_id=116](https://lemisensors.com/?page_id=116).
- Порівняння магнітометрів. (н.д.). Взято з <https://magnetometer.com/wp-content/uploads/magnetometer-comaparison.pdf>.
- MagDrone R3. (н.д.). Взято з <https://sensysmagnetometer.com/products/magdrone-r3-magnetometer-for-drone>.

### References

- Biletskyi, V. S. (Ed.). (2004). *Small Mining Encyclopedia* (Vol. 1). Donetsk: Donbas. ISBN 966-7804-14-3.
- Boiko, V. S., Boiko, R. V. (2004). *Explanatory and Terminological Dictionary of Oil and Gas* (Vol. 1). Kyiv: International Economic Foundation.
- WitMotion HWT3100. (n.d.). AliExpress. Retrieved from <https://www.aliexpress.com/item/1005003105895528.html>.
- Fluxgate magnetometers. (n.d.). LEMISensors. Retrieved from [https://lemisensors.com/?page\\_id=116](https://lemisensors.com/?page_id=116).
- Magnetometer comparison. (n.d.). Retrieved from <https://magnetometer.com/wp-content/uploads/magnetometer-comaparison.pdf>.
- MagDrone R3. (n.d.). Retrieved from <https://sensysmagnetometer.com/products/magdrone-r3-magnetometer-for-drone>.

### PROTOTYPE OF A UAV-BORNE MAGNETOMETER FOR LANDMINE DETECTION

S. V. Chorny<sup>1</sup>, S. S. Dugin<sup>2</sup>, S. A. Stankevich<sup>2</sup>, M. O. Popov<sup>2</sup>, S. I. Golubov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Space Research, National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Akademika Glushkova Ave., Bldg. 4/1, Kyiv, 03187, Ukraine*

<sup>2</sup> *State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine*

In this work, a prototype of a portable on-board magnetometer of aerial unmanned vehicle (UAV) for remote searching landmines and other explosive objects was developed and investigated. An analysis of available hardware by domestic and foreign manufacturers was carried out for its development taking into account availability on the market, accuracy of measurements, minimization of cost, dimensions and weight. According to this analysis the equipments kit was selected and a prototype of an on-board magnetometer for UAV was developed which provides measurement of three spatial components of the Earth's magnetic field, geographic coordinates of the sensing unit and recording this data on portable magnetic storage devices. To ensure a self-independence and versatility, the developed prototype is connected to the carrier mechanically only. Also, the software for the pre-processing of magnetometer and satellite positioning subsystem data stored on magnetic media has been developed. The test of the working capacity of the prototype was performed in laboratory and field conditions by magnetic measurements of typical landmines, explosive and other metal objects within the Kharkiv, Kyiv, and Kamianets-Podilskyi city territories. The variation of magnetometer readings (standard deviation) in field conditions was 1,6 nT. The possibility of acquiring the magnetic signatures of landmines and explosive objects with the prototype developed was demonstrated using the TM-62M anti-tank landmine dummy. The maximum possible altitude of such landmine detection with an acceptable probability was estimated as close to 2 m.

**Keywords:** unmanned aircraft (UAV), prototype of the onboard magnetometer, magnetic field of the Earth, magnetic signature, land mine.

*Рукопис статті отримано: 13.09.2024  
Надходження остаточної версії: 20.09.2024  
Публікація статті: 30.09.2024*