

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ МІН РАДІОТЕХНІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація.*

*В роботі розглянуто принцип роботи радіотехнічних систем для виявлення мін та вибухових пристроїв. Також були проаналізовані сучасні методи пошуку мін та детекторів для виявлення мін. Зокрема, було проаналізовано електромагнітний метод, який використовує металошукач, теплофізичний метод, який в своїй основі використовує аналіз теплової енергії, параметричний метод, який знаходження заснований на вивченні електромагнітних характеристик мін та визначенні їх параметрів.*

**Ключові слова:** радіотехнічна система, вибухонебезпечний предмет, міна, електромагнітний метод, теплофізичний метод.

### *Abstract.*

The work considers the principle of operation of radio technical systems for the detection of mines and explosive devices. Modern methods of searching for mines and detectors for detecting mines were also analyzed. In particular, the electromagnetic method, which uses a metal detector, the thermophysical method, which basically uses thermal energy analysis, and the parametric method, which is based on the study of the electromagnetic characteristics of mines and determining their parameters, were analyzed.

**Keywords:** radio engineering system, explosive object, mine, electromagnetic method, thermophysical method.

### **Вступ**

В сучасному світі, враховуючи велику кількість конфліктних ситуацій між країнами, проблема міної небезпеки залишається актуальною та загрожує життю та безпеці людей. Міни, незалежно від їх типу та походження, залишаються серйозними загрозами для цивільного населення, військових та різних аграрних підприємств. [1]

Використання сучасних технологій може зробити величезний внесок у розв'язання проблеми пошуку мін та їх знешкодження. Створення робототехнічних комплексів для виявлення мін стає все більш важливою галуззю інженерного та наукового розвитку. Ці комплекси можуть використовувати передові технології, такі як штучний інтелект, розпізнавання об'єктів, сенсори та робототехніку, для виявлення, картографування та розмінування територій. [2]

Через високу актуальність завдання розмінування та безпеки, пов'язаної із замінованими областями, розробка та застосування радіотехнічних пристроїв розмінування залишаються пріоритетними завданнями для оборонних та гуманітарних організацій. Ці пристрої продовжують рятувати життя та сприяти відновленню зруйнованих територій.

Для ефективного розв'язання цієї проблеми потрібно провести аналіз стану сучасних технологій та розробок у цій галузі. Аналіз сучасних методів які використовуються для пошуку мін, дозволяє створювати та вдосконалювати існуючі методи. Такий аналіз допоможе з'ясувати досягнення, визначити недоліки та визначити напрями подальших досліджень і розвитку.

Отже, в даній роботі ми проведемо аналіз стану створення робототехнічних комплексів для виявлення мін, розглянемо сучасні технологічні рішення та їх застосування, визначимо виклики та перспективи у цій галузі. Наша робота має на меті висвітлити важливість розвитку цих технологій та їх потенціал для покращення безпеки людей і регіональної стабільності.

### **Аналіз радіотехнічних комплексів для виявлення мін**

Окремі радіотехнічні системи для розмінування повинні бути оснащені відповідними маніпуляторами та детекторами (сенсорами, датчиками). [3]

Додатково радіотехнічні системи можуть бути обладнані засобами прийняття рішень і виконання їх на етапах розвідки, пошуку мін. [1]

Виявлення мін обумовлене факторами які включають [3]:

- наявність вибухівки та локально розташованої маси металу;
- конкретна форма мін, протипіхотних мін;
- неоднорідність середовища, де знаходиться міни;
- розташування (порушення поверхні ґрунту, дорожнього полотна, порушення забарвлення рослинності чи снігового покриву тощо).

Додатковими демаскуючими факторами є [4]:

- наявність ліній керування та антен радіоприймальних пристроїв на вибуховому пристрої (ВП);
- наявність годинникового механізму або розміщеного електронного таймера на вибуховому пристрої;
- наявність сейсмічного, магнітного чи оптичного датчика.

Пошуки мін та ВН проводиться в два напрямки [5]:

- пошук окремих мін і ВП (діапазон від кількох сантиметрів до кількох метрів);
- розвідка територій, забруднених ВП та мінних полів (дальності пошуку від десятків метрів до кількох кілометрів).

В даний час найбільшого поширення набули такі методи мінно-пошукових робіт: електромагнітні (індукційні, радіомагнітометричні, нелінійні), ядерно-фізичні, теплофізичні та механічні (механічне зондування). Вони дозволяють створювати технічні засоби пошуку ВП, які можуть бути використані для розмінування. Сучасні методи та детектори для виявлення ВП наведено в табл. 1. [5]

Таблиця 1 – Сучасні методи та детектори виявлення ВП

| Метод            | Детектори ВП та обладнання   |
|------------------|--|
| Електромагнітний | Металошукач  |
|                  | Радар  |
|                  | Радіометр міліметрових хвиль   |
|                  | Мікрохвильовий радіометр   |
|                  | Інфрачервоний спектроскоп  |
| Оптичний метод   | Лідар – детектор для отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем |
| Ядерно-фізичний  | Детектори нейтронного випромінювання   |
|                  | Детектори на основі ядерного резонансу   |
| Акустичний       | Детектори акустичних і сейсмічних хвиль  |
|                  | Детектори звукових та ультразвукових хвиль   |
| Механічний       | Інженерні машини для виявлення та підриву мінно-вибухових пристроїв  |
|                  | Зонди  |
| Газоаналітичний  | Газоаналізатори та детектори вибухових парів   |
| Теплофізичний    | Тепловізори  |

Проблеми, які виникають при використанні цих методів - це питання безпеки та скорочення часових і матеріальних витрат на розмінування. Інші вимоги: кліматичні, ефективність у темряву, стійкість до механічних впливів, електромагнітна сумісність тощо.

Таблиця 2 характеризує глибину розміщення ВП в ґрунт та методи пошуку ВП, які можна застосувати. [6]

В результаті аналізу встановлено, що для того щоб підвищити ефективність виявлення мін та вибухових речовин, доцільно комбінувати різні методи пошуку в одній системі.

Таблиця 2 - Глибина закладення ВП в ґрунт та методи пошуку ВП які можна застосувати.

| Глибина пошуку  | Методи пошуку ВП  | Види ВП         |
|-----------------|---|-----------------|
| Поверхня ґрунту | Електромагнітні, оптичні, газоаналітичні, механічні, теплофізичні, біологічні | Всі види ВП     |
| До 0,1 м        | Радіохвиля  | Всі види ВП     |
|                 | Індукція  | Металеві ВП     |
| До 1 м          | Короткоімпульсний радар   | Всі види ВП     |
|                 | Магнітометричний  | Феромагнітні ВП |

Проведемо аналіз електромагнітного методу на прикладі сканування дроном рельєфу для пошуку мін, оснащеним металошукачем. Металошукач в поєднанні з інфрачервоною (ІЧ) камерою встановлені на 6-ти роторному дроні (Рис. 1). [1, 4]

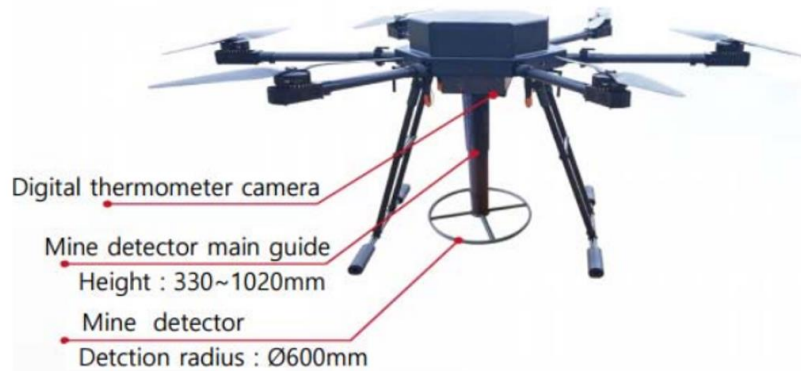


Рис. 1. Гексакоптер з металошукачем та ІЧ-камерою

Під час пошуку, дрон слідує за рельєфом місцевості, безперервно рухаючись на відстані 10 см від поверхні. Відстань індукційного металошукача від поверхні змінюється в діапазоні від 3,3 до 10,2 см за допомогою телескопічної ніжки. Вага металевих та інфрачервоного детекторів становить загалом 2,8 кг. Загальна вага системи становить 10 кг. Акумулятор ємністю 20000 мАг забезпечує 30 хвилин роботи. Дрон може літати на висоті до 15 метрів з максимальною швидкістю 50 км/год. Під час пошуку він рухається зі швидкістю 3,5 км/год і може управлятися вручну або працювати автоматично [4].

Переваги даної радіотехнічної системи виявлення мін:

1. Безпека операторів: електромагнітний метод дозволяє виявляти міни без фізичного контакту з ними, що значно підвищує безпеку операторів.
2. Висока швидкість і продуктивність: дрони можуть швидко пролітати над великими територіями та виявляти міни на значній висоті, що робить цей метод досить продуктивним.
3. Точність виявлення: електромагнітний метод добре працює для виявлення металевих об'єктів, таких як міни, і може надавати високу точність результатів.
4. Можливість використання в різних умовах: даний метод можна застосовувати в різних кліматичних умовах та на різних типах ґрунту, що робить його універсальним.

Недоліки:

1. Низька здатність розрізнення: електромагнітний метод може мати обмежену здатність розрізнення між різними типами об'єктів, що містять метал.
2. Залежність від металу: цей метод ефективний для мін, що містять метал, але не дозволяє виявляти міни, виготовлені з нетоксичних матеріалів.

Таким чином, електромагнітний метод для пошуку мін з дрону має потенціал для ефективного виявлення мін та покращення безпеки під час робіт з розмінування, але він також має свої обмеження та вимагає ретельного калібрування та аналізу результатів.

Іншим методом, який був проаналізований є теплофізичний метод виявлення мін. Міни або ґрунт над ними, як правило, бувають тепліші, ніж навколишнє середовище вдень (Рис. 2). [6]

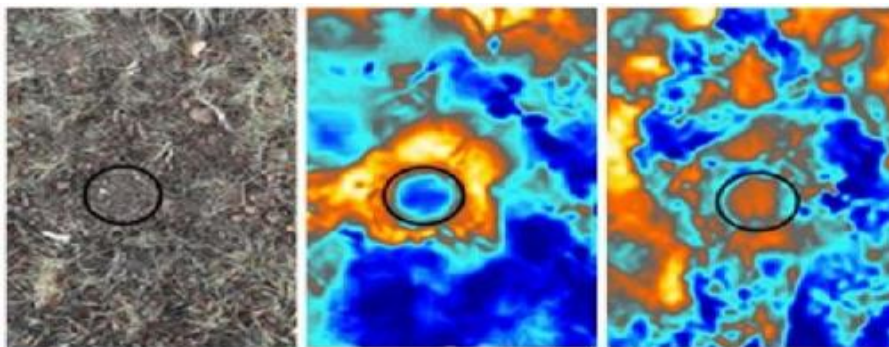


Рис. 2. - Зображення закопаної міни:  
а - візуальне; б - тепловізійне ранкове; в - тепловізійне денне

В середині дня ґрунт над мінами накопичує теплову енергію, а вночі втрачає її. Теплофізичний метод ефективний лише для виявлення мін з тонким шаром ґрунту над ними і може бути використаний лише за відповідних погодних умов. Детектори працюють на відносно високій частоті ( $> 300$  ГГц), але з низькою довжиною хвилі ( $< 1$  мм), і вони не можуть розрізняти типи об'єктів у ґрунті.

Перевагами теплофізичного методу є [6]:

1. Безпека операторів: теплофізичний метод дозволяє виявляти міни без прямого контакту з ними, що підвищує безпеку операторів та уникає ризику вибухів.

2. Ефективність в нічний час і при поганих умовах видимості: тепла інфраструктура може виявляти теплові аномалії навіть в умовах обмеженої видимості, що робить цей метод корисним під час нічних операцій та у поганих погодних умовах.

3. Висока точність виявлення: теплофізичний метод добре працює для виявлення мін та інших об'єктів, які виділяють тепло, і може надавати точні результати.

4. Швидкість обстеження: дрони можуть швидко обстежувати великі території, дозволяючи ефективно виявляти міни та зменшувати час, потрібний для розмінування.

Недоліки теплофізичного методу [6]:

1. Неefективність для неметалевих мін: цей метод не завжди ефективний для виявлення мін, виготовлених з нетоксичних матеріалів, таких як пластик.

2. Потребує спеціалізованого обладнання: використання теплової інфраструктури та дронів для проведення операцій вимагає наявності та обслуговування спеціалізованого обладнання, що може бути витратним та потребувати підготовки операторів.

3. Можлива відсутність результатів на гарячих днях: у спекотну погоду деякі теплові аномалії можуть бути менш помітними, що може зменшити ефективність методу.

Таким чином, теплофізичний метод для пошуку мін з дрону є важливим інструментом для розмінування, з відмінними перевагами у плані безпеки та швидкості, але він має свої обмеження, особливо щодо виявлення нетоксичних мін.

Один із нових перспективних методів виявлення мін є параметричний. Він заснований на вивченні електромагнітних характеристик мін та визначенні параметрів, що характеризують їх наявність. [7]

Принцип роботи параметричного методу знаходження мін зазвичай включає такі етапи [7]:

- генерація радіочастотних сигналів: радіотехнічний пристрій генерує радіочастотні сигнали, які випромінюються в напрямку області, яка, ймовірно, містить міни;

- взаємодія з об'єктами: радіочастотні сигнали взаємодіють з об'єктами в зоні опромінення, включаючи міни та навколишні матеріали;

- виявлення змін: параметричний метод виявлення ґрунтується на змінах у радіочастотних характеристиках, викликаних наявністю мін (Міни можуть змінювати розсіювання та абсорбцію радіочастотних хвиль, що впливає на параметри сигналу);

- аналіз параметрів: радіотехнічний пристрій аналізує зміни у параметрах радіочастотних сигналів, такі як амплітуда, фаза, частота та ін.;

- виявлення та попередження: якщо аналіз показує, що параметри сигналу відповідають характеристикам мін, пристрій генерує попереджувальний сигнал для оператора або автоматично активує систему розмінування;

- підтвердження виявлення: зазвичай після спрацювання радіотехнічного пристрою на місце направляються розміновувачі для підтвердження виявлення мін та їх безпечного знешкодження.

Параметричний метод знаходження мін має переваги в тому, що він може бути чутливим до характерних властивостей радіочастот мін і може працювати без безпосереднього фізичного впливу на небезпечні об'єкти. Тим не менш, ефективність такого методу може залежати від умов середовища, типу мін та інших факторів, і, як і інші методи, він може давати помилкові спрацювання. [7]

Важливо відзначити, що розробка та використання радіотехнічних пристроїв та систем розмінування вимагає високої кваліфікації та дотримання безпеки, оскільки помилки можуть бути фатальними.

### Висновки

На сьогоднішній день існують різні радіотехнічні системи та робототехнічні рішення, які призначені для виявлення мін та ВП. Це включає в себе міннопошукові роботи, дрони та автономні машини розмінування.

Однак, аналіз стану розробки цих систем вказує на кілька ключових аспектів:

1. Технологічний прогрес: за останні роки спостерігається значний технологічний прогрес у галузі систем розмінування, оскільки робототехнічні комплекси та радіотехнічні системи стають більш адаптивними, точними та здатними до роботи в різних умовах.

2. Інтеграція сенсорів та штучного інтелекту: робототехнічні комплекси та радіотехнічні системи для виявлення мін все частіше використовують сучасні сенсори, такі як тепловізійні камери, лазери та інші, а також штучний інтелект для обробки та аналізу отриманих даних.

3. Важливість навчання та тренування персоналу: використання робототехнічних комплексів та радіотехнічних систем для виявлення мін вимагає відповідної підготовки операторів - навчання та тренування персоналу є критичними аспектами успішної експлуатації цих систем.

4. Міжнародне співробітництво: проблема мінної небезпеки має глобальний характер, і міжнародне співробітництво є важливим для обміну досвідом та ресурсами у розробці та використанні робототехнічних комплексів та радіотехнічних систем для виявлення мін.

Таким чином, створення робототехнічних комплексів та радіотехнічних систем для виявлення мін є важливим напрямком досліджень та розробок, який має великий потенціал для покращення безпеки населення та військового персоналу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Weiming Fang. Design of Obstacle Avoidance Control System for Mobile Robot Based on Vision. The International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics CSIA 2022: Cyber Security Intelligence and Analytics. Volume 125, 2022, pp. 1005-1011. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7\\_146](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7_146).

2. Khanam, Z., Aslam, B., Saha, S., Zhai, X., Ehsan, S., Stolkin, R., McDonald-Maier, K.: Gamma-induced image degradation analysis of robot vision sensor for autonomous inspection of nuclear sites. IEEE Sensors Journal. Volume 22, Issue 18, 2021, pp. 17378 - 17390. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3050168>.

3. Kamil Mamak, Kaja Kowalczywska. Military robots should not look like a humans. Ethics and Information Technology. Volume 35, 2023, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10676-023-09718-6>.

4. Zhaozhen Jiang, Wenlong Wang, Wenqi Sun, Lianglong Da. Path Planning Method for Mobile Robot Based on a Hybrid Algorithm. Journal of Intelligent and Robotic Systems. Volume 109, 2023, pp. 1-34. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01985-1>.

5. Assylbek Jomartov, Amandyk Tuleshov, Aziz Kamal, Azizbek Abduraimov. Design of a cable-driven parallel robot for landmine detection. SN Applied Sciences. Volume 5 (299), 2023, pp. 1-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05533-2>

6. Ning Ding, XiangYang Wang, XiaoYang Xian, YeYun Cai, DaoMing Liu, Fang Deng. Photovoltaic, thermoelectric and electromagnetic generation technologies applied in power systems for mobile unmanned systems. Science China Technological Sciences. Volume 66, 2023, pp. 599-629. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2159-8>.

7. Blatnický, M., Dižo, J., Bruna, M. et al. Applied research of high-strength steel utilization for a track of demining machine in terms of mechanical properties. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 127, 2023, pp. 5879–5896. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11894-0>.

**Пругула Максим Олександрович** – к.т.н., старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)

**Шрейтер Олександр Сергійович** - студент групи ТКР-20б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [sashashreyter@gmail.com](mailto:sashashreyter@gmail.com)

**Prytula Maksym Oleksandrovych** - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)

**Shreiter Oleksandr Serhiyovych** - student of group TKR-20b, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [sashashreyter@gmail.com](mailto:sashashreyter@gmail.com)