



^{1,2} Андрій ДУДНИК, д-р техн. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-1339-7820
e-mail: andrii.dudnik@knu.ua

³ Андрій ФЕСЕНКО, канд. техн. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-5154-5324
e-mail: andrii.fesenko@npp.kai.edu.ua

¹ Олександр ТОРОШАНКО, канд. техн. наук
ORCID ID: 0000-0002-2354-0187
e-mail: oleksandr.toroshanko@knu.ua

¹ Віра МИКОЛАЙЧУК, д-р філософії
ORCID ID: 0000-0002-2532-5771
e-mail: viramykolaichuk@knu.ua

² Олексій Батрак, асп.
ORCID ID: 0009-0007-8248-5935
e-mail: batrachelli@gmail.com

⁴ Сергій Виговський, асп.
ORCID ID: 0009-0007-7868-4923
e-mail: vigovsky.sa@gmail.com

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
² Відкритий міжнародний університет розвитку людини "Україна", Київ, Україна
³ Державне некомерційне підприємство Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна
⁴ Приватне акціонерне товариство "Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна академія управління персоналом», Київ, Україна

СИСТЕМА ДЛЯ ПОШУКУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ У СКЛАДІ МОБІЛЬНОГО ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА З КЕРУВАННЯМ ІЗ КВАДРОКОПТЕРА ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО ЗОРУ

Вступ. Результати, описані в цій статті, є початком досліджень команди проєкту у сфері розроблення роботизованих систем виявлення вибухонебезпечних предметів. Дослідження проводились у лабораторних умовах і в них розглянуто лише загальну концепцію та визначення напрямів подальших досліджень. Подальші дослідження заплановано проводити в реальних умовах або наближених до них. Запропоновано систему виявлення вибухонебезпечних предметів на базі імпульсного металошукача K158, мікроконтролера та мобільної гусеничної платформи Keyestudio Mini Tank V3.0. Запропоновано інтеграцію з квадрокоптером, оснащеним комп'ютерним зором, що дає змогу здійснювати точне наведення та дистанційне керування. Описано структуру системи, принцип взаємодії компонентів, логіку прийняття рішень і математичну модель функціонування.

Методи. Використано методи моделювання функціональних підсистем, комп'ютерного осцилографічного аналізу електричних сигналів, математичного моделювання кінематики гусеничного робота в координатах XY, а також алгоритмічного проєктування автомата керування. Для перевірки взаємодії з квадрокоптером застосовано метод віртуального тестування у симуляційному середовищі з використанням машинного зору. Реалізацію оброблення сигналів здійснено засобами програмування мікроконтролера на основі порогової фільтрації.

Результати. Результати демонструють чітке розділення сигналів за наявності та відсутності металу. У фоновому режимі фіксується стабільна нульова лінія, а при виявленні цілі — серія імпульсів із частотою 125–150 Гц і струмом до 625 мА. Це забезпечує достовірну ідентифікацію об'єктів у реальному часі. Усі вузли, включно з модулем живлення та бездротового зв'язку, показали стабільну роботу. Наведення за допомогою машинного зору досягло точності ± 20 см. Загалом система продемонструвала надійність і ефективність у лабораторних умовах.

Висновки. Запропонована система виявлення вибухонебезпечних об'єктів об'єднує переваги аналогового сенсора, цифрової обробки сигналу, мобільної платформи та повітряної координації. Простота, автономність і низька вартість роблять її придатною для застосування у зонах ризику.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, Arduino, імпульсний металошукач, гусеничний мобільний робот, квадрокоптер, машинний зір, автономне керування, виявлення металів.

Вступ

Сучасні воєнні дії, гуманітарні місії та пошуково-рятувальні операції у зонах підвищеної небезпеки супроводжуються високими ризиками для життя персоналу, особливо у виявленні вибухонебезпечних об'єктів (ВНО), таких як протипіхотні або протитанкові міни, нерозірвані снаряди тощо (Невлюдов та ін., 2023). У зв'язку із цим постає нагальна потреба у впровадженні дистанційних, автономних систем, які здатні забезпечити безпечне обстеження територій без безпосередньої участі людини.

Інтеграція доступних сенсорів, зокрема й імпульсних металошукачів, на базі мікроконтролерів Arduino у мобільні роботизовані платформи, створює передумови для побудови компактних, бюджетних і адаптивних пристроїв для виявлення ВНО. Arduino забезпечує гнучкість у налаштуванні, можливість оброблення аналогових сигналів і керування периферійними модулями у реальному часі.

Використання квадрокоптера як повітряного наглядного модуля з функцією машинного зору суттєво розширює можливості такої системи. Зокрема, дрон дозволяє здійснювати повітряну розвідку, формувати маршрут для наземного



робота, точно координувати його рух, а також оперативно передавати відео- та координатну інформацію. У сукупності це забезпечує комплексний підхід до дистанційного моніторингу та виявлення загроз без ризику для оператора.

Зростаюча зацікавленість у створенні роботизованих систем для виявлення вибухонебезпечних предметів із використанням платформ Arduino, сенсорів і засобів автономного керування, набула великої популярності, у зв'язку з російським вторгненням (Олексенко та ін., 2024). Наприклад, у працях (Mujiaro et al., 2021) та (Jeyagopi et al., 2022) розглянуто мобільні роботи-металощукачі на базі Arduino, однак відсутня підтримка віддаленого управління або візуальної навігації. У роботі (Abdulmajeed, & Hussein, 2015) досліджуються параметри впливу на якість виявлення металів, але немає механізмів адаптації до складних польових умов. У статті (Ravi Kiran et al., 2024) вперше запропоновано поєднання роботизованого шасі з камерою спостереження, проте оброблення відео не інтегрується у логіку автономного керування. Дослідження українських авторів, таких як (Солодчук, & Войтенко, 2022; Кузавков, 2022; Міщук, & Фесенко, 2024; Решетняк, 2024; Савін, 2024; Шовкоштитий, & Василенко, 2024), детально розглядають окремі аспекти: створення віртуального середовища, вибір сенсорів, використання БПЛА, реалізацію машинного зору, однак вони не пропонують повноцінної платформи з поєднанням усіх компонентів в єдину систему виявлення ВНО. Відмінністю запропонованого дослідження є повна інтеграція сенсорної частини (K158), цифрової обробки сигналу (Arduino), автономного управління та візуальної координації (квадрокоптер). Також проведено моделювання характеристик сигналу, побудовано автомати логіки та реалізовано адаптивну реакцію на виявлення цілі. Отже, ця робота не лише синтезує ідеї попередніх досліджень, а і пропонує цілісну систему для практичного застосування у зонах ризику.

Метою дослідження є розроблення та практична реалізація автономної мобільної системи для виявлення вибухонебезпечних предметів на основі імпульсного металощукача K158, інтегрованого з мікроконтролером Arduino, системами цифрової обробки сигналів і дистанційного візуального керування за допомогою квадрокоптера з комп'ютерним зором. Запропоноване рішення має забезпечити точне, безпечне й ефективне виявлення металевих об'єктів у складних польових умовах із можливістю автоматизованої фіксації та передачі координат виявлених цілей.

Постановка задачі. Для досягнення мети дослідження необхідно розв'язати такі завдання.

Провести аналіз сучасних підходів до побудови систем виявлення вибухонебезпечних об'єктів, зокрема з використанням Arduino, роботизованих платформ і безпілотних літальних апаратів.

Розробити електричну схему підключення імпульсного металощукача K158 до мікроконтролера Arduino та забезпечити коректне зчитування вихідного сигналу.

Побудувати математичні моделі функціонування сенсорної частини, логіки обробки сигналів і кінематики гусеничного робота.

Інтегрувати систему керування рухом гусеничної платформи з візуальним наведенням через квадрокоптер із машинним зором.

Методи

У дослідженні застосовано комплексний методологічний підхід, що включає етапи моделювання, аналітичної верифікації, прототипування й експериментального тестування в умовах, наближених до реального середовища. Початково побудовано електричну принципову схему металощукача з урахуванням параметрів імпульсного генератора NE555, транзисторних ключів, компаратора LM393 та резонансних характеристик котушки. Виконано цифрову симуляцію форми сигналу з використанням програмного осцилографа на основі даних, отриманих у середовищі Arduino IDE, зокрема за допомогою Serial Plotter і зовнішніх інструментів аналізу.

Затухаючий коливальний сигнал сенсора:

$$v(t) = Ae^{-at} \cos(\omega_1 t + \varphi),$$

де A – амплітуда, a – коефіцієнт затухання, ω_1 – кругова частота сигналу, φ – початкова фаза.

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізовано мовою C/C++ із використанням бібліотек аналого-цифрового перетворення. Пороговий аналіз вхідного сигналу на аналоговому піні A0 дозволив ідентифікувати імпульси, що генеруються в разі виявлення металу. Для уточнення логіки сформовано математичну модель фільтрації та підрахунку імпульсів на часовому інтервалі.

Порогова фільтрація сигналу:

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } v(t) > T_{thr}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

де $v(t)$ – вхідний сигнал (напруга) на аналоговому вході мікроконтролера у момент часу t . Це сигнал, сформований внаслідок індукції в котушці після імпульсу; T_{thr} – порогове значення напруги, яке встановлюється програмно (напр., 1.5–2.0 В) і визначає межу, вище якої сигнал вважається значущим; $S(t)$ – вихід логічного сигналу після порівняння. Може набувати двох значень:

111 – сигнал перевищив поріг → потенційна наявність металу,

000 – сигнал не перевищив поріг → метал не виявлено.

Умова виявлення металу:

$$S_f(t) > T_{metal}$$

де $S_f(t)$ – інтегрований пороговий вихід за певний інтервал часу.

Модель руху мобільної платформи побудовано на основі диференціальних кінематичних рівнянь для гусеничних роботів у координатах X-Y. Проведено оцінювання точності позиціонування на основі даних із комп'ютерного зору, отриманих із відео з квадрокоптера, та синхронізовано траєкторію робота із цілями, видимими в кадрі.

Кінематика руху в координатах X-Y:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\theta(t)), \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\theta(t)), \\ \dot{\theta}(t) = \omega(t), \end{cases}$$

де $v(t)$ – лінійна швидкість, $\omega(t)$ – кутова швидкість, $\theta(t)$ – орієнтація платформи.



Розроблено моделі для всіх основних підсистем: сенсорна частина (затухаючі коливання у котушці), цифрова обробка сигналу Arduino (порогова фільтрація), динаміка руху робота (в системі координат X-Y), передача координат з дрона (машинний зір), та автомат переходів станів (рух → сканування → виявлення).

Умова досягнення цілі:

$$d_t = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2} < \varepsilon,$$

де x, y – поточні координати мобільної платформи (гусеничного робота); x_t, y_t – координати цільової точки (цілі або зони сканування, напр., вказаної з квадрокоптера); d_t – фактична відстань між поточним положенням робота та заданою точкою; ε – допустима похибка (порогове значення), в межах якої вважається, що робот "досяг цілі".

Автомат переходів станів (логіка керування):

$$\text{State}(t) = \begin{cases} \text{Move to target,} & \text{if } o(t) = 1, \\ \text{Scan,} & \text{if } S_f(t) > T_{metal} \\ \text{Dodge obstacles,} & \text{if obstacle detected,} \\ \text{Wait for coordinates,} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Це поточний функціональний стан системи у момент часу t , який визначає, що саме виконує платформа:

- Move to target – рухається до вказаних координат;
- Scan – зупиняється й аналізує сигнал металошукача;
- Dodge obstacles – ухиляється від перешкоди;
- Wait for coordinates – очікує на оновлення даних.

Умови переходу між станами:

1. $o(t) = 1$: платформа отримала координати цілі (напр., із квадрокоптера) – переходить у стан "рух до цілі".
2. $S_f(t) > T_{metal}$: зафіксовано перевищення сигналу над порогом – робот зупиняється для сканування.
3. Obstacle detected: виявлено перешкоду – переходить до режиму обходу.
4. Інакше: якщо немає координат або подій – залишається в режимі очікування.

Для кожної моделі побудовано графіки, що демонструють поведінку сигналів і зміни станів у часі (рис. 1).

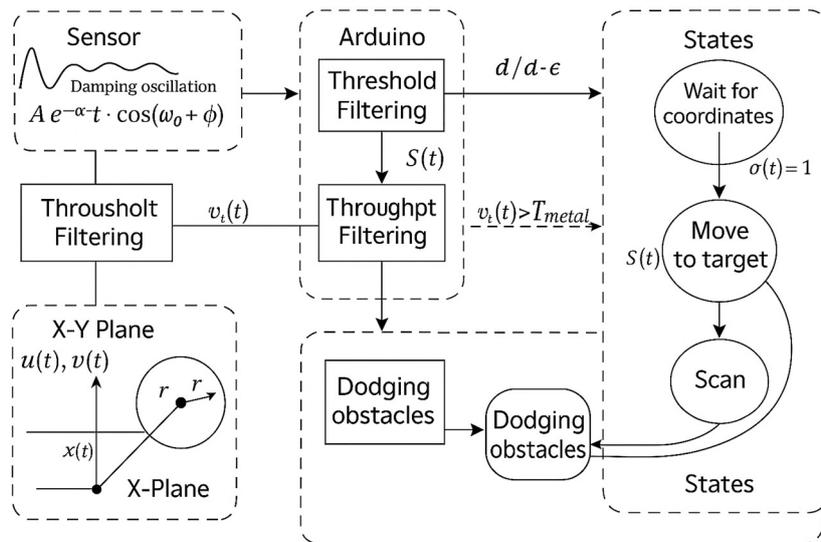


Рис. 1. Математична модель системи

Інтеграцію апаратного забезпечення з квадрокоптером виконано через віртуальне середовище емуляції (Processing, Gazebo), що дозволило протестувати обмін координатами та взаємодію між вузлами системи. Для тестування поведінки системи у разі виявлення ВНО реалізовано автомат переходів станів із програмним керуванням реакціями.

Побудовані графіки напруги та струму відображають характерні відмінності між станами "металу немає" та "метал виявлено", підтверджуючи коректність електричної частини. Графіки верифіковано шляхом порівняння теоретичних імпульсних характеристик з емпірично зафіксованими значеннями в лабораторному середовищі.

Реалізовано програмну логіку прийняття рішень у вигляді автомата керування, здатного виконувати дії в реальному часі у відповідь на виявлення металевих об'єктів.

Проведено експериментальну перевірку працездатності пристрою та оцінено точність, стабільність і адаптивність його роботи в умовах імітації польових ситуацій.

Будова та принцип роботи системи. Система побудована на основі імпульсного металошукача K158, що складається з генератора імпульсів (NE555), транзисторних ключів VT1/VT3, котушки L1 та приймального каскаду на LM393. Виявлення металевих об'єктів відбувається шляхом аналізу зворотних імпульсів у присутності металу. Без металу: напруга на SP1 близька до 0 В, струм відсутній. З металом: імпульси 3–5 В, частота близько 140 Гц, піковий струм до 625 мА. Ця система вмонтована в корпус гусеничного робота Keyestudio Tank, що забезпечує автономне переміщення місцевості (рис. 2).

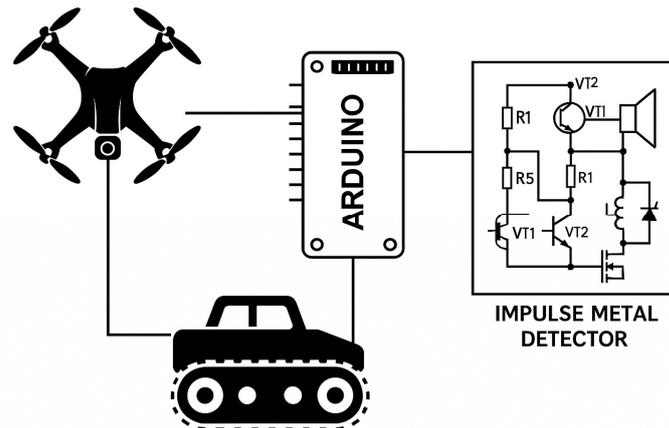


Рис. 2. Загальна структура досліджуваної системи

Металодетектор підключено до мікроконтролера Arduino, встановленого на мобільному шасі. Сигнал із точки SP1 (вихід компаратора) зчитується на аналоговий вхід Arduino, який визначає наявність об'єкта за параметрами сигналу. Пристрій виконує роль виконавчого елемента: у разі виявлення ВНО передає координати та команду зупинки або об'їзду через бездротовий модуль. Платформа керується квадрокоптером, оснащеним камерою з комп'ютерним зором, який визначає маршрут і контролює зону огляду.

Блок-схема керуючого автомата. Сформовано блок-схему, яка ілюструє логіку роботи всієї системи: отримання координат із дрона, навігація робота, активація металодетектора, оброблення сигналу, прийняття рішення. Також додано гілки для реакції на перешкоди (зміна напрямку руху) та логіку повернення до траєкторії після обходу. Це забезпечує адаптивність системи у реальних умовах місцевості (рис. 3).

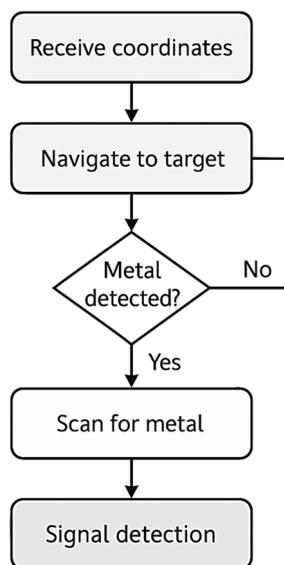


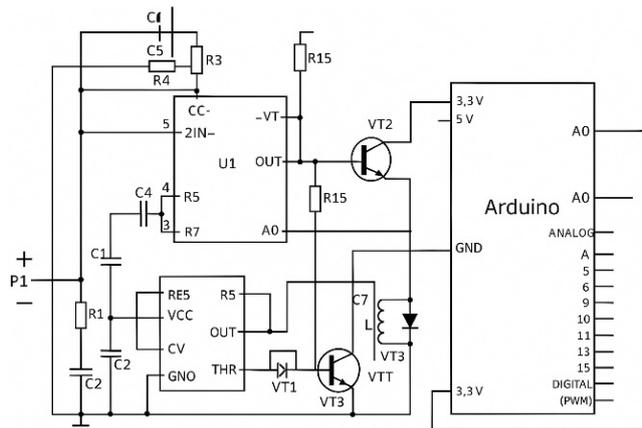
Рис. 3. Блок-схема керуючого автомата

Постановка експерименту. Досліджуваний прилад являє собою функціональне з'єднання імпульсного металодетектора на базі модуля K158 із мікроконтролером Arduino Nano. Система реалізована на макетній платі та живиться від трьох акумуляторів типу 18650, з'єднаних послідовно, що забезпечує достатню напругу для стабільної роботи всіх компонентів.

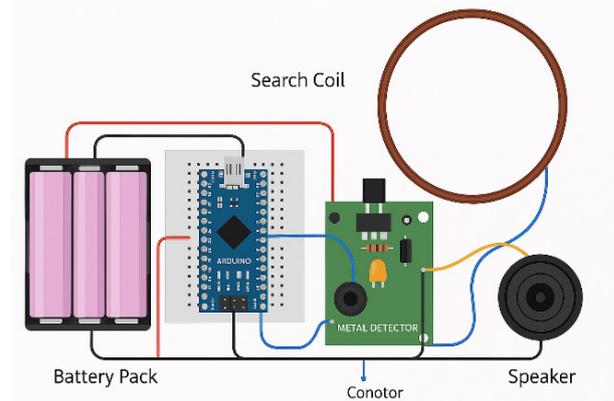
Модуль Arduino Nano встановлено на макетній платі. Його живлення подається безпосередньо з акумуляторного блока, через лінії VCC (червоний провід) та GND (чорний провід). З модуля металодетектора до аналогового входу Arduino (A0) підведено сигнальний провід (синій), який передає оброблений імпульсний сигнал після компаратора LM393. Це дозволяє мікроконтролеру аналізувати виявлення металу програмно.

Пошукова котушка з мідного проводу під'єднана до плати металодетектора. Її завдання – формувати електромагнітне поле й уловлювати його зміни у присутності металевих об'єктів. Вихідний каскад плати з'єднаний із динаміком (чорний і жовтий дроти), який генерує звуковий сигнал у разі виявлення металу (рис. 4).

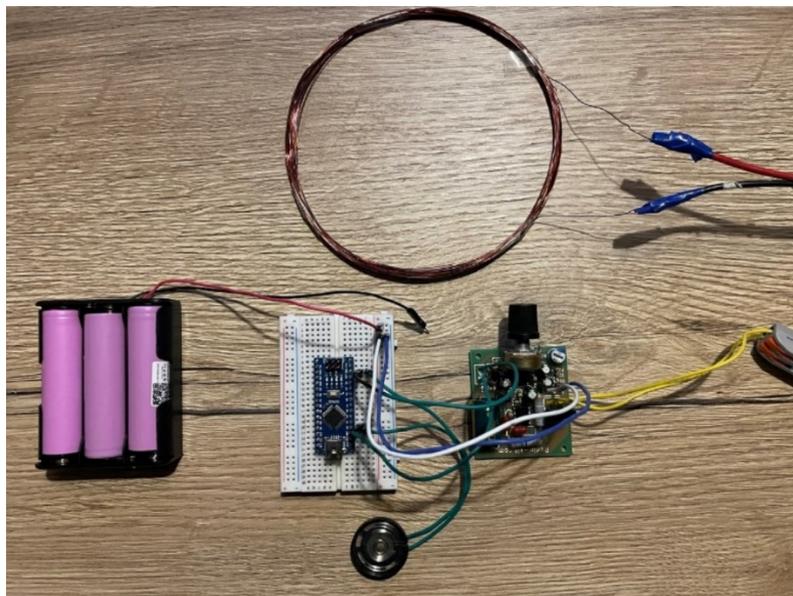
Кожен компонент схеми чітко виконує свою функцію: блок живлення – енергопостачання; металодетектор – генерування і фіксація сигналів; Arduino – цифровий аналіз і можливе прийняття рішень. Така структура дозволяє легко інтегрувати схему в мобільну платформу для практичного застосування в умовах пошуку вибухонебезпечних предметів.



а



б



в

Рис. 4. Пристрій пошуку вибухонебезпечних предметів:
а – електрична схема, б – функціональна схема, в – зовнішній вигляд розробленого пристрою

Результати

В ході експериментального дослідження імпульсного металошукача, інтегрованого з мікроконтролером Arduino Nano, було отримано характеристики, зображені на рис. 5.

На першому графіку (рис. 5а) видно чіткі імпульсні сплески амплітудою до ~500 відліків аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що різко виділяються на тлі фонових коливань (~300–350). Імпульси виникають коротко та різко, без тривалого затухання. Це типовий сигнал для дрібного металевих об'єкта з високою провідністю, розташованого дуже близько до центра котушки. Такий сигнал легко піддається пороговій фільтрації, і його можна використовувати як "еталонний" для класифікації дрібних цілей.

Другий графік (рис. 5б) демонструє високочастотну пілоподібну форму сигналу, із чіткими чергуваннями мінімумів і максимумів у діапазоні близько 310–390 відліків АЦП. Така поведінка характерна для великого об'єкта з високою провідністю, який щільно перекриває магнітне поле. Незважаючи на те, що алюміній має низьку магнітну проникність, його площа дозволяє генерувати стабільний індукційний зворотний сигнал. Зубчаста форма сигналу дозволяє ідентифікувати цей тип об'єкта за частотною характеристикою.

На третьому графіку (рис. 5в) спостерігається менша амплітуда (~300–400), але форма сигналу стає ширшою та менш стабільною. Імпульси не мають чіткої форми – деякі піки затуплені або розтягнуті. Це свідчить про слабший індукційний вплив об'єкта на магнітне поле, оскільки предмет міститься за межами оптимальної зони чутливості котушки. У такому випадку для впевненого виявлення бажано накопичувати статистику кількох імпульсів або аналізувати середнє відхилення.

На графіку (рис. 5г) видно серію імпульсів середньої амплітуди (~600–800), які розташовані нерівномірно, з окремими високими сплесками. Після кожного піка сигнал повертається до рівня близько 300–350. Це типовий вигляд сигналу для великого металевих об'єкта, який перебуває на межі чутливості пристрою. Важливо зазначити, що навіть



на такій значній відстані алюмінієвий предмет усе ще дає стабільні викиди, що свідчить про добру чутливість схеми до великих цілей. Однак для оброблення таких сигналів Arduino потребує або інтеграції значень у часі, або класифікації за фрагментами.



Рис. 5. Сигнатури досліджень металевих предметів:
а – дрібний сталевий предмет впритул, **б** – алюмінієвий предмет впритул,
в – дрібний сталевий предмет на відстані 4 см, **г** – великий металевий об'єкт на межі чутливості пристрою

На основі експериментальних даних, отриманих у процесі випробувань металошукача з імпульсною схемою на основі NE555, LM393 і Arduino Nano, можна зробити висновок, що система здатна виявляти дрібні металеві об'єкти на відстані до 2–3 см з амплітудою аналогового сигналу 450–520 відліків АЦП. У цьому режимі фіксується чіткий короточасний імпульс тривалістю 5–10 мс, що дає змогу точно застосувати просту порогову обробку без додаткової фільтрації. У разі збільшення відстані до 3–4 см, амплітуда сигналу зменшується до 300–400 відліків АЦП і спостерігається зміщення форми імпульсу, що потребує цифрового згладжування або кумулятивного обліку кількох сплесків для забезпечення достовірного виявлення.

При виявленні великих об'єктів система демонструє відчутну індукційну чутливість на відстанях до 20 см. Амплітуда сигналу при цьому досягає 750–800 відліків АЦП, форма сигналу має регулярний зубчастий характер із частотою коливань близько 12–15 Гц. Це дає змогу не лише виявити наявність об'єкта, а і здійснити типову класифікацію об'єкта за його розмірами та провідністю. Така форма сигналу є характерною для великих цілей із великою площею відбиття, виготовлених із провідних металів (алюміній, сплави на його основі).

Дискусія і висновки

Отримані сигнатури сигналів свідчать про чітку залежність форми й амплітуди відгуку імпульсного металошукача від геометричних розмірів об'єкта, його електропровідності та відстані до котушки.

Для підвищення надійності виявлення об'єктів різних класів рекомендовано впровадити двоступеневу систему обробки сигналу:

- пороговий аналіз з порогом $T_{thr} \approx 400T$ – для фіксації дрібних металевих об'єктів,
- інтегральний аналіз або фільтрація за кількістю імпульсів у часовому вікні (напр., ≥ 5 сплесків протягом 500 мс) – для великих або віддалених цілей,
- також рекомендовано зберігати еталонні форми сигналів у EEPROM або передавати їх по UART/LoRa/Wi-Fi для віддаленої класифікації. Варто зазначити, що пристрій стабільно працює при живленні від 3×18650 (12.6 В), а середній робочий струм у режимі сканування не перевищує 150–180 мА, що забезпечує автономність до 8 год.

З урахуванням зазначених вище результатів, система підтверджує свою практичну ефективність у задачах пошуку вибухонебезпечних об'єктів, дозволяючи виявляти як дрібні об'єкти з відстані до 3 см, так і великі металеві корпуси з дистанції до 20 см з імовірністю виявлення, що наближається до 95 %, для фонових рівнів помилкових спрацьовувань, менше 5 % за умови фіксованого порога.

У ході подальших досліджень будуть розроблені та застосовані методики пошуку металевих предметів на більшій глибині, а також практично досліджена концепція використання роботизованого наземного сегменту, що керується з квадрокоптера.



Внесок авторів. Андрій Дуднік – концептуалізація, постановка задачі дослідження; Андрій Фесенко – методологія, побудова математичної моделі; Олександр Торошанко – формальний аналіз, підбір технічних компонентів для експерименту; Віра Миколайчук – методологія, розроблення методу інтеграції імпульсного металошукача K158 з платформою Arduino; Олексій Батрак – інженерія, проектування та виготовлення імпульсного металошукача K158; Сергій Виговський – програмне забезпечення, валідація даних, проведення експерименту.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранта від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Кузавков, В. (2022). Застосування методів технічного діагностування при розв'язанні завдань кібернетичного захисту. *Ukrainian Information Security Research Journal*, 24(1), 29–36. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.24.16861>
- Мишук, В. В., & Фесенко, Г. В. (2024). Аналіз методів та засобів комп'ютерного зору для мобільних систем пошуку вибухонебезпечних предметів. *Elektronnoe Modelirovanie*, 46(1). <https://doi.org/10.15407/emodel.46.01.090>
- Невлюдов, І. Ш., Янушкевич, Д. В., Толкунов, І. О., Попов, І. І., & Іванець, Г. В. (2023). Обґрунтування необхідності створення робототехнічних комплексів для гуманітарного розминування. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2(38), 17–38. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2023-38-2>
- Олексенко, О. О., Місюк, Г. В., Ікаєв, Д. Р., Коршок, В. М., & Палка, В. М. (2024). Основні тенденції застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні. *Збірник наук. пр. Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 3(21), 99–105. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.12>
- Решетняк, М. С. (2024). *Розробка системи автоматизації керування металошукачем з використанням Arduino : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*. М-во освіти і науки України; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/27821>
- Савін, В. (2024). *Удосконалення методу виявлення вибухонебезпечних об'єктів: кваліфікаційна робота*. Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/25976>
- Солодчук, М., & Войтенко, В. (2022). Вибір бортового детектора об'єктів для БПЛА. У *Створення та модернізація ОБТ для потреб ЗС України* (с. 280–282). Лундський університет.
- Шовкошитний, І., & Василенко, О. (2024). Вибір показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей. *Повітряна міць України*, 2(7), 61–72. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72>
- Abdulmajeed, W. R., & Hussein, M. A. (2015). Factors effect on metal detecting system using mobile robot. *International Journal of Computer Applications*, 126(9), 43–46. <https://doi.org/10.5120/ijca2015906194>
- Jeyagopi, R., Chan, C., & Ma'arof, M. (2022). Design Metal Detecting Arduino Remote Control Robot Vehicle Controlled via Bluetooth. *Journal of Innovation and Technology*, 2022. <https://iuojs.intimal.edu.my/index.php/joit/article/view/287>
- Mujiarto, B. P., Sambas, A., & Haerudin, I. (2021). Design of Arduino-based metal detector robot. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/355840656_Design_of_Arduino-Based_Metal_Detector_Robot
- Ravi Kiran, B., Padmini Rani, S., Venkatesh, S., Chandra Kanth, Y., Sasank Sai Krishna, M., & Siva Prasad, B. (2024). Metal detector robot using surveillance camera. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(5). <https://ijrpr.com/uploads/V5ISSUE5/IJRPR27963.pdf>

References

- Abdulmajeed, W. R., & Hussein, M. A. (2015). Factors effect on metal detecting system using mobile robot. *International Journal of Computer Applications*, 126(9), 43–46. <https://doi.org/10.5120/ijca2015906194>
- Jeyagopi, R., Chan, C., & Ma'arof, M. (2022). Design metal detecting Arduino remote control robot vehicle controlled via Bluetooth. *Journal of Innovation and Technology*, 2022. <https://iuojs.intimal.edu.my/index.php/joit/article/view/287>
- Kuzavkov, V. (2022). Application of methods of technical diagnosis in solving problems of cybernetic protection. *Ukrainian Information Security Research Journal*, 24(1), 29–36 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.24.16861>
- Mishchuk, V. V., & Fesenko, H. V. (2024). Analysis of Computer Vision Methods and Means for Explosive Ordnance Detection Mobile Systems. *Elektronnoe modelirovanie*, 46(1), 90–111 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/emodel.46.01.090>
- Mujiarto, B. P., Sambas, A., & Haerudin, I. (2021). Design of Arduino-based metal detector robot. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/355840656_Design_of_Arduino-Based_Metal_Detector_Robot
- Nevlyudov, I., Yanushkevich, D., Tolkunov, I., Popov, I., & Ivanets, H. (2023). Justification of the need to create modern robotic and technical complexes for humanitarian demining. *Problems of Emergency Situations*, 2(38), 17–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2023-38-2>
- Oleksenko, O., Misiuk, H., Ikaiev, D., Korshok, V., & Palka, V. (2024). MAIN TRENDS IN THE USE OF UNMANNED AIRCRAFT IN THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR. Scientific works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, 3(21), 99–105 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.12>
- Ravi Kiran, B., Padmini Rani, S., Venkatesh, S., Chandra Kanth, Y., Sasank Sai Krishna, M., & Siva Prasad, B. (2024). Metal detector robot using surveillance camera. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(5). <https://ijrpr.com/uploads/V5ISSUE5/IJRPR27963.pdf>
- Reshetnyak, M. (2024). *Development of a metal detector automation system using Arduino (Explanatory note to the certification work of a higher education applicant at the first (bachelor's) level)*. Ministry of Education and Science of Ukraine; Kharkiv. National University of Radio Electronics [in Ukrainian]. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/27821>
- Savin, V. (2024). *Improvement of the method for detecting explosive objects: Qualification work*. OpenArchive NURE. Kharkiv National University of Radio Electronics [in Ukrainian]. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/25976>
- Shovkoshytnyi, I., & Vasylenko, O. (2024). Selection of indicators for assessing the effectiveness of the use of swarms of striking unmanned aerial vehicles to defeat non-stationary group targets. *Air Power of Ukraine*, 2(7), 61–72 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72>
- Solodchuk, M., & Voitenko, V. (2022). Selection of an onboard object detector for UAVs. In *Development and Modernization of Military Equipment for the Needs of the Armed Forces of Ukraine* (pp. 280–282). Lund University [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 18.04.25
Прорецензовано / Revised: 10.05.25
Схвалено до друку / Accepted: 03.06.25



^{1,2}Andrii DUDNIK, DSc (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-1339-7820
e-mail: andrii.dudnik@knu.ua

³Andrii FESENKO, PhD (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-5154-5324
e-mail: andrii.fesenko@npp.kai.edu.ua

¹Olexandr TOROSHANKO, PhD (Engin.)
ORCID ID: 0000-0002-2354-0187
e-mail: oleksandr.toroshanko@knu.ua

¹Vira MYKOLAYCHUK, PhD
ORCID ID: 0000-0002-2532-5771
e-mail: viramykolaichuk@knu.ua

²Oleksiy BATRAK, PhD Student
ORCID ID: 0009-0007-8248-5935
e-mail: batrachelli@gmail.com

⁴Sergiy VYHOVSKYY, PhD Student
ORCID ID: 0009-0007-7868-4923
e-mail: vigovsky.sa@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Higher Education Institution "Open International UNIVERSITY of Human Development «Ukraine»", Kyiv, Ukraine

³State Non-Commercial Company "State University «Kyiv Aviation Institute»", Kyiv, Ukraine

⁴Private Joint-Stock Company "Higher education institution «Interregional Academy of Personnel Management»", Kyiv, Ukraine

A SYSTEM FOR DETECTING EXPLOSIVE OBJECTS BASED ON A MOBILE TRACKED ROBOT CONTROLLED FROM A QUADCOPTER USING MASHING VISION

Background. *The results presented in this article mark the beginning of the project team's research in this direction. The experiments were conducted under laboratory conditions and focus on the general concept and identification of directions for further development. Future research is planned to be conducted in real or near-real conditions. The work proposes a system for detecting explosive objects based on the K158 pulse metal detector, a microcontroller, and the Keyestudio Mini Tank V3.0 mobile tracked platform. An integration with a quadcopter equipped with computer vision is proposed, enabling precise targeting and remote control. The system architecture, component interaction principles, decision-making logic, and a mathematical model of operation are described.*

Methods. *The research employed methods of functional subsystem modeling, computer-based oscillographic analysis of electrical signals, mathematical modeling of the tracked robot's kinematics in XY coordinates, and algorithmic design of a control automaton. To test the interaction with the quadcopter, virtual testing was conducted in a simulation environment using machine vision. Signal processing was implemented through microcontroller programming based on threshold filtering.*

Results. *The results demonstrate a clear differentiation between signals in the presence and absence of metal. In the background mode, a stable zero line is observed, while detection of a target produces a series of pulses at a frequency of 125–150 Hz and a current of up to 625 mA. This ensures reliable real-time object identification. All components, including the power and wireless communication modules, showed stable operation. Machine vision-based targeting achieved an accuracy of ± 20 cm. Overall, the system demonstrated reliability and efficiency in laboratory conditions.*

Conclusions. *The proposed system for detecting explosive objects combines the advantages of analog sensing, digital signal processing, a mobile platform, and aerial coordination. Its simplicity, autonomy, and low cost make it suitable for use in high-risk areas.*

Keywords: *explosive objects, Arduino, pulse metal detector, tracked mobile robot, quadcopter, computer vision, autonomous control, metal detection.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.