

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням
роботехнічних комплексів військового призначення
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КТРСм-21-1

Бондаренко А. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Янушкевич Д.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
 Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ »

2022 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бондаренку Антону Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів військового призначення
 затверджена наказом університету від 30.11.2022 р. № 740 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 21.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи
 - 3.1 Інформація про сучасний процес гуманітарного розмінування
 - 3.2 База даних сучасних РКВП да датчиків
 - 3.3 Програма симулятор MoRoS3D
 - 3.4 Програма для побудови графіків MagicPlot
 - 3.5 Бібліотеки FreeCAD та NationalInstrumentsPXI
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 4.1 Вступ
 - 4.2 Аналіз сучасного стану системи гуманітарного розмінування із застосуванням РКВП
 - 4.3 Порівняльний аналіз засобів пошуку та ідентифікації РКВП
 - 4.4 Реалізація моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням РКВП
 - 4.5 Охорона праці
 - 4.6 Висновки
 - 4.7 Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.pptx) – 10 с.
6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до кваліфікаційної роботи	10.11.22	виконано
2	Вступ	11.11 – 11.11.22	виконано
3	Аналіз технічного завдання	11.11 – 13.11.22	виконано
4	Аналіз інструментів розробки та аналіз технічного завдання	13.11 – 15.11.22	виконано
5	Проектування системи	15.11 – 15.11.22	виконано
6	Моделювання системи гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення	15.11 – 14.12.22	виконано
7	Охорона праці	14.12 – 14.12.22	виконано
8	Висновки	15.11 – 15.12.22	виконано
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	18.12 – 18.12.22	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	03.12 – 04.12.22	виконано
11	Подання роботи на рецензію	22.12 – 22.12.22	виконано
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.12 – 22.12.22	виконано
13	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	22.12.22	

Дата видачі завдання

10.11.2022 р.

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

доц. Янушкевич Д. А.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 111 с., 2 табл., 51 рис., 2 дод., 33 джерел.

ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ ПРЕДМЕТИ, РОБОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС
ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ГУМАНІТАРНЕ
РОЗМІНУВАННЯ.

Мета роботи – удосконалення важливих показників та ефективності процесу системи гуманітарного розмінування за рахунок використання роботехнічних комплексів військового призначення.

Об'єкт дослідження – процес гуманітарного розмінування на території України з використанням РКВП.

Предмет дослідження – моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.

Для моделювання системи процесу гуманітарного розмінування із використанням роботехнічних комплексів військового призначення було проаналізовано технічне завдання, обрано та обґрунтовано програмно-апаратні засоби. Розроблено алгоритм процесу розмінування та взаємодії методів ідентифікації вибухонебезпечних предметів. Було проаналізовано вже існуючі роботехнічні комплекси що використовуються у процесі гуманітарного розмінування. Були досліджені різні види вибухових речовин, методи їх пошуку та ідентифікації.

Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення є актуальною науково-технічною задачею. Основна сфера використання системи – робота на дистанції з небезпечними об'єктами, такими як міни, вибухівка, токсичні та радіоактивні об'єкти тощо.

ABSTRACT

Explanatory note: 111 p., 2 tabl., 51 fig., 2 adj., 33 sources.

EXPLOSIVE SUBJECTS, MILITARY ROBOTIC COMPLEX,
IDENTIFICATION, HUMANITARIAN DEMINING.

The purpose of the work is to improve the important indicators and efficiency of the humanitarian demining system due to the use of military robotic complexes.

The object of the study is the process of humanitarian demining on the territory of Ukraine using RCVP.

The subject of the research is robotic complexes of military purpose that can be used in the system of humanitarian demining.

To model the system of the humanitarian demining process with the use of military robotic complexes, the technical task was analyzed, the hardware and software tools were selected and substantiated. An algorithm for the demining process and the interaction of explosive object identification methods has been developed. Already existing robotic complexes used in the process of humanitarian demining were analyzed. Various types of explosives, methods of their search and identification were studied.

Modeling the process of humanitarian demining with the use of military robotic complexes is an urgent scientific and technical task. The main area of use of the system is working at a distance with dangerous objects, such as mines, explosives, toxic and radioactive objects, etc.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз сучасного стану системи гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів.....	12
1.1 Аналіз системи гуманітарного розмінування та її складових	12
1.2 Вибухонебезпечні предмети, їх класифікація та методи пошуку.....	16
1.2.1 Різновиди ВВП.....	16
1.2.2 Методи виявлення ВР.....	27
1.3 Актуальність розробки процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів.....	31
1.4 Постанова задач досліджень.....	32
1.5 Висновки до першого розділу.....	33
2 Методика процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.....	34
2.1 Порівняльний аналіз засобів пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів.....	34
2.2 Складові процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.....	43
2.2.1 Сканування місцевості.....	44
2.2.2 Позиціонування РКВП.....	47
2.2.3 Контроль РКВП.....	47
2.3 Висновки до другого розділу.....	49
3 Реалізація процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.....	50
3.1 Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.....	50

3.2	Архітектура та алгоритм побудови процесу гуманітарного розмінування.....	52
3.2.1	Аналітична модель сценарію виявлення ВНП.....	54
3.2.1.1	Індукційна напруга в приймачі за рахунок передавача і ґрунта.....	55
3.2.1.2	Індукційна напруга в приймачі за рахунок металевого об'єкта.....	56
3.2.2	Чисельне моделювання сценарію виявлення ВНП.....	57
3.2.3	Моделювання геодетекторів методом скінченних елементів.....	58
3.2.3.1	Потенціали формулювання рівнянь Максвелла.....	58
3.2.3.2	Рішення формули Ungauged Curl-Curl.....	59
3.3	Моделювання процесу знищення ВНП.....	61
3.4	Програмна реалізація процесу гуманітарного розмінування.....	74
3.4.1	Вплив зміни властивостей детектора.....	81
3.4.2	Вплив зміни властивостей металу.....	83
3.4.3	Вплив варіювання властивостей ґрунту.....	85
3.5	Висновки до третього розділу.....	87
4	Охорона праці.....	90
4.1	Правила безпеки під час проведення гуманітарного розмінування.....	90
4.2	Висновки до четвертого розділу.....	92
	Висновки.....	93
	Перелік джерел посилання.....	95
	Додаток А Демонстраційний матеріал.....	100
	Додаток Б Відомість кваліфікаційної роботи.....	110

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БРКВП – блокування радіокерованих вибухових пристроїв;
ВНП – вибухонебезпечний предмет;
ВП – вибуховий пристрій;
ВР – вибухова речовина;
ВШ – вогнепровідний шнур;
ДЕЗ – детектор електронного захвату;
ДШ – детонуючий шнур;
ЕД – електродетонатор;
ЕОП – електронно-оптичний перетворювач;
ЗВ – засіб вибуху;
ІЧ – інфрачервоне випромінювання;
КД – капсуль-детонатор;
МВС – Міністерство внутрішніх справ України;
МД – металодетектор;
ОК – об'єкт контролю;
ПВ – пластикова вибухівка;
ПВЧ – понадвисока частота;
ПЗЗ – матриця передачі із зарядовим зв'язком;
ПС – піротехнічні суміші;
РКВ – пристрій з радіосигнальним керуванням;
РКВП – роботехнічний комплекс військового призначення;
УФ – ультрафіолетове випромінювання.

ВСТУП

У теперішній час для Збройних сил України та працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій є актуальною задачею мати стійку побудовану роботизовану систему, головною з функцій якої буде пошук та подальша нейтралізація вибухонебезпечних об'єктів різного походження у процесі гуманітарного розмінування. На даний момент відсутній стійка система проведення розмінування та широке використання роботехнічних комплексів військового призначення, розглядаються до покупки дорогі іноземні аналоги.

Метою роботи є удосконалення важливих показників та ефективності процесу системи гуманітарного розмінування за рахунок використання роботехнічних комплексів військового призначення.

Об'єктом дослідження є процес гуманітарного розмінування на території України з використанням РКВП.

Предметом дослідження є моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення.

Актуальність роботи, виходить з того, що внаслідок повномасштабного вторгнення Російської Федерації в Україну майже 30 % її території забруднена або потенційно може бути забруднена мінами та вибухонебезпечними предметами (ВНП), що становить значну загрозу для життя та здоров'я мирного населення та військовослужбовців Збройних Сил України, інших військових формувань, які здійснюють виконання бойових завдань у зонах бойових дій, на деокупованих територіях, територіях, які підлягали/підлягають обстрілам та бомбардуванню. На даний час пошук, виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів здійснюють 160 піротехнічних розрахунків Державної служби з надзвичайних ситуацій

України (ДСНСУ), а також значна кількість піротехнічних підрозділів інших військових формувань. Ситуація ускладнюється постійними обстрілами низки населених пунктів і областей нашої держави.

Для збереження життя та здоров'я особового складу піротехнічних підрозділів ДСНС та інших військових формувань, які здійснюють гуманітарне розмінування, організації планомірної роботи на об'єктах та територіях, на яких виявляються ВВП, необхідне застосування робототехнічних комплексів військового призначення (РКВП). З метою вирішення даної задачі буде проведено глибокий аналіз сучасної структури процесу гуманітарного розмінування, видів вибухонебезпечних предметів, методів їх пошуку та ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану системи гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів;
- дослідження методики процесу гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів військового призначення;
- порівняльний аналіз існуючих засобів пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів;
- змодельовати процес гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів військового призначення;
- обґрунтувати обрані архітектуру та алгоритм побудови процесу гуманітарного розмінування;
- представити програмну реалізацію роботи алгоритму побудови процесу гуманітарного розмінування.

Кваліфікаційна робота виконано згідно з [1-4].

Результати роботи пройшли апробацію на 26-му Міжнародному молодіжному форумі «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування», а також на 17-тій Міжнародній науково-практичній конференції «Мультидисциплінарні наукові

записки. Теорія, методологія і практика». Тези були опубліковані у збірнику студентських наукових та на міжнародній конференціях: «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології AERT-2022» [5], «Виробництво & Мехатронні Системи 2022» [6].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОБОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Аналіз системи гуманітарного розмінування та її складових

У наш час пошук та зниження ВНП вважаються такою ж самою проблемою надзвичайної важливості в Україні, як і в Афганістані, Ірані чи Колумбії. Трагедія будь-якого сучасного конфлікту не обмежується тим фактом, що технологічний розвиток дав людству зброю, здатну за дуже малий відрізок часу вбити багатьох людей. Не менш сумним наслідком є те, що зіткнення сучасних армій залишає після себе величезні ділянки землі, забруднені бомбами або снарядами, що не вибухнули одразу, покинуті чи забиті мінами. Всі ці речі, створені вбивати, на жаль, зберігають свою здатність десятиліттями після закінчення бойових дій. Саме такий трагічний досвід багатьох країн, наприклад Хорватії, досі змушений продовжувати програму пошуку та знешкодження вибухонебезпечних залишків війни 1990-х [7]. Це дуже знайомий досвід для українців, яким досі доводиться десь мати справу зі смертельною небезпекою воєн ХХ століття і, на жаль, стикатися з цією проблемою знову, враховуючи події у східних регіонах. Ця проблема продовжує забирати життя цивільних і військових. Тому тема проведення процесу гуманітарного розмінування сьогодні є дуже гострою.

Гуманітарне розмінування спрямоване на зменшення шкідливого фактору дії вибухової речовини на життєдіяльність людей. Вона являє собою набір заходів, які проводяться органами безпеки з метою ліквідації небезпеки, що пов'язана із ВНП, включаючи як нетехнічне обстеження територій так і застосування РКВП забруднених ВНП, їх картографування, маркування, пошук, ідентифікація та знешкодження ВНП, здійснення оцінювання якості

розмінування тощо. Усі складові процесу проведення гуманітарного розмінування можна побачити на рисунку 1.1 [6].

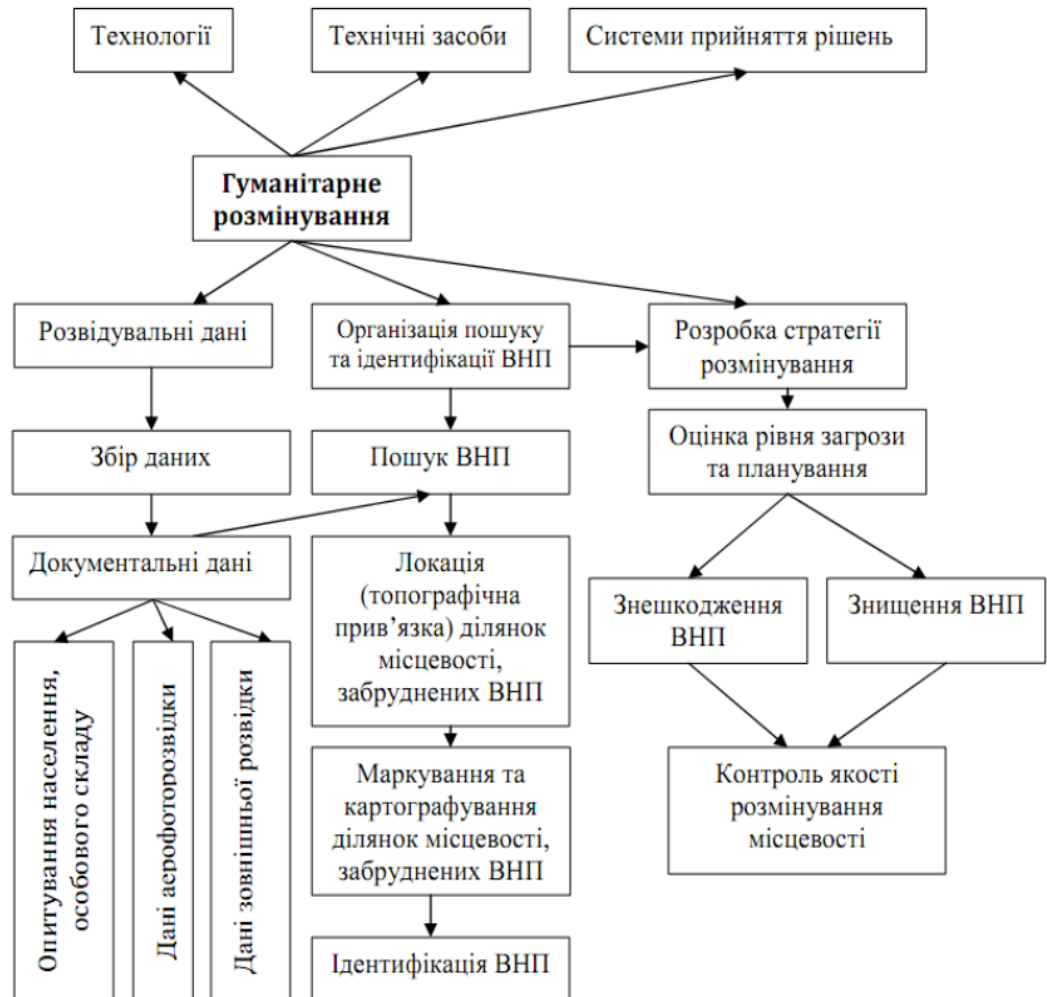


Рисунок 1.1 – Складові гуманітарного розмінування

Процес розмінування можна розділити на такі основні частини:

- розташування та ідентифікація мінного поля з метою нанесення його на карту;
- підготовка мінного поля до операції з розмінування, яка може включати видалення рослинності, збір уламків металу з поверхні тощо;
- розташування та маркування шахти в межах визначеної території;

- усунення загрози виявлених мін шляхом знешкодження (або видалення, або підриву);
- забезпечення заходів контролю якості.

Необхідно з високою достовірністю перевірити, чи очищена територія вільна від мін. Кожному нанесеному на карту мінному полю має бути присвоєний пріоритет очищення, беручи до уваги фактори соціального та економічного характеру, а також ті, що пов'язані з погодними умовами та станом землі. Необхідно пов'язувати усі етапи з програмою мінної обізнаності, яка спрямована на зменшення жертв серед цивільного населення, спричинених міни та інші вибухові пристрої. Виявлення забрудненої землі допоможе відокремити небезпеку від людей і негайно зробити незабруднену землю доступною для використання.

На сьогодні у світі склалася тенденція на розмежування зазначених складових з метою їх удосконалення. Проблеми ефективності процесу проведення гуманітарного розмінування, на думку фахівців, мають бути вирішені тільки в комплексі організаційно-технічних заходів, які в межах сучасного процесу трансформації в Збройних Силах розділяються на дві окремі складові:

- використання мережно-центричної концепції ведення бойових дій;
- розвинення використання РКВП.

Для проведення гуманітарного розмінування у нащ час широко використовуються вибухотехнічні дистанційно-керовані апарати. Основні завдання, що виконують даний вид РКВП:

- дистанційний візуальний огляд предметів і приміщень щодо наявності в них вибухонебезпечних предметів;
- візуальна ідентифікація (по можливості) типу вибухонебезпечних предметів, його підривача, маси заряду вибухової речовини, наявність або відсутність уламків корпусу;

- пошук й ідентифікація вибухонебезпечних предметів за допомогою технічних засобів пошуку: газоаналізатора типу «АРГУС», стетоскопа, міношукача; приладу для взяття проб повітря;

- приведення до спрацьовування оптичних підривачів і підривачів з натяжними (що розкидаються) датчиками цілі (розтяжками) в приміщеннях і на відкритій місцевості;

- доставка до вибухонебезпечних предметів різного роду засобів руйнування ближнього радіусу дії і локалізаторів дії вибуху, закріплення на вибухонебезпечних предметах й інших предметах вала.

На рисунку 1.2 показано вибухотехнічний дистанційно-керований апарат для розвідки та знешкодження вибухонебезпечних предметів, що було розроблено та впроваджено вибухотехнічним підрозділом УМВС у Дніпропетровській області [8].



Рисунок 1.2 – РКВП для розвідки та знешкодження ВП

На практиці даний вибухотехнічний апарат показав високі результати. Цей прилад використовується для пошуку і безпечного знешкодження вибухонебезпечних предметів в умовах міста і промислової забудови. Роботизована система включає саморухоми базу на колісному шасі (всі колеса

– ведучі), систему дистанційного керування, оглядову телекамеру з системою передачі інформації на монітор, джерело ІЧ-підсвітлення, лазерний цілепоказчик, одноступінчатий маніпулятор із закріпленою на ньому платформою для додаткового обладнання [8].

1.2 Вибухонебезпечні предмети, їх класифікація та методи пошуку

В залежності від регіону, ситуація із поширеністю ВНП дещо відрізняється, так на території Донецької, Луганської, Харківської та Полтавської областей можливість знайти той чи інший вибухонебезпечний предмет є надзвичайно високою. Також досить велика кількість цих предметів вилучається у прифронтових областях, таких як місто Київ. Але загрози вторгнення ворога та бажання себе захистити у будь-який спосіб, при необґрунтовано високих цінах на зброю і боєприпаси, призводить до того, що в інших областях нашої держави сформувався величезний попит на зброю та боєприпаси який задовольняється в тому числі і незаконним шляхом.

На сьогодні, згідно інформації наших правоохоронних органів, в основному вилучаються з обігу та знаходяться у громадян, переважно такі вибухонебезпечні предмети, як – гранати (ручні різних типів, для підствольного гранатомету та для станкового гранатомету), боєприпаси до ручної вогнепальної зброї, боєприпаси для автоматичних гармат, вибухові речовини фабричного та саморобного виготовлення і засоби ініціювання [9]. Тож розглянемо вище зазначені вибухонебезпечні предмети класичного типу.

1.2.1 Різновиди ВНП

Пластична вибухівка (ПВ) – це поширений вид вибухової речовини, що використовується у вибухових пристроях при вчиненні терористичних актів, головним чином, через стабільність, велику потужність та можливість надати

їй будь-яку форму. Пластичні вибухові речовини – суміші бризантних речовин (гексоген, тетрил та ін.) з пластифікованими добавками, яким можна надавати будь-яку форму. За своїми властивостями пластичні вибухові речовини на 1/3 перевищують потужність тротилу. Їх виробництво досить поширено в США, Великобританії та Чехії. Так, американское пластична вибухівка типу «С-4» має розмір 280 мм × 50 мм × 60 мм, без запаху, вагою 560 г, кріпиться до місця закладки клейкою поверхнею [12]. Англійська пластикова вибухівка типу «Р-3А», що представлена на рисунку 1.3, залежно від потужності: темного чи темно-коричневого кольору, покрита пергаментним парафіновим папером. У своєму складі містить графіт, який при обробці залишає сліди.



Рисунок 1.3 – Пластична вибухівка

Пастоподібна пластична речовина типу «DEMEX-400» (виробництва Чехії), а також «SEMEX-400» використовується для заповнення ємностей різних форм та об'ємів шляхом спринцювання [12]. Однорідна щільність пластичних речовин, їх тістоподібність дозволяють легко деформувати

бризантні речовини і виготовляти заряди відповідної форми, використовуючи різні види камуфляжів.

Основними характерними ознаками, які дозволяють виявляти пластичні вибухові речовини, є пластичність, колір, маслянистість, інколи специфічний (мигдальний) запах.

Фосфорні вибухові пристрої зображено на рисунку 1.4. У багатьох запальних приладах використовується спеціальна речовина – фосфор, на вигляд, як жовтуватий віск. Ця речовина має таку властивість, як миттєве запалювання при взаємодії з повітрям. Для вчинення терористично-диверсійних актів його змішують із сірковуглецю, що забезпечує інертність запалювання фосфору, а після цього розсипають на поверхні пальної речовини. Після випаровування сірковуглецю фосфор запалюється. Оскільки в цьому разі не потрібно ні годинникового механізму, ні детонатора, вибуховий пристрій виявити дуже складно. Тротилові шашки випускаються вагою 75 г, 200 г, 400 г і 2750 г і мають колір від світло-жовтого до жовто-коричневого [12].



Рисунок 1.4 – Фосфорні вибухові пристрої

Для захисту від зовнішнього впливу їх обертають пропарафінованим папером або вкривають тонким прошарком парафінопетролатумної суміші. Для з'єднання із засобами вибуху і надійного збудження детонації всі шашки мають гніздо під капсуль-детонатор (електродетонатор) або крізний канал циліндричної (конічної) форми під детонуючий шнур. Тротиллові шашки маркуються чорним кольором на паперовій оболонці – вид і маса виробу. Проте маркування різними заводами відрізняється графікою букв і знаків. За допомогою цих відмінностей можна встановити завод-виробник шашки, а в окремих випадках – дату виготовлення.

Промислові вибухові речовини. Більшість з них є складними багатокомпонентними сумішами, що складаються з окислювача, горючих компонентів і технологічних добавок. Головним окислювачем є аміачна селітра, як горючі компоненти використовуються тротил, динітро-нафталін, гексоген, рідкі нітроефіри, дрібнодисперсний порошок алюмінію, дизельне паливо, індустриальні масла, парафіновий віск. Крім окислювача і горючих компонентів, окремі композиції містять хлорид натрію (кухонна сіль), хлорид кальцію, хлористий амоній, стеарат кальцію, деревну муку, бавовну, призначені для надання вибуховій речовині необхідних технологічних і експлуатаційних властивостей. Найпоширеніші у виробництві і, відповідно, найчастіше викрадаються такі: амоніт № 6 ЖВ (порошок жовтуватого кольору), скельний амоніт № 1 (порошок сіро-стального кольору), грамоніт 79/21 (суміш гранул білого кольору і лусочок жовтого кольору), алюмотол (гранули сіро-стального кольору), пресований скельний амоніт СК-250 (дві спарені шашки сіро-стального кольору у паперовій оболонці) [13]. Основна маса промислових вибухових речовин випускається в патронуваному виді (паперових оболонках) і мішках, один із прикладів виду промислової ВР можна побачити на рисунку 1.5. Паперова оболонка може зберігатися на заряді у разі дефектного спрацьовування вибухового пристрою. На місці події можна знайти її фрагменти.



Рисунок 1.5 – Промислова вибухова речовина

Ручні гранати – це боєприпаси, призначені для знищення живої сили і військової техніки противника на близьких відстанях [10]. Вони вельми доступні для застосування в злочинних цілях. Їх поділяють на оборонні, наступальні і протитанкові, мають бойовий, учбовий і учбово-імітаційний варіанти виконання. В бойових виробках корпус гранати фарбують у захисний (зелений) колір. Збоку на поверхні чорною фарбою наносяться маркувальні позначки у виді цифр і букв. Маркування характеризує умовне позначення споряджувального заводу, заводський номер партії, рік і шифр вибухової речовини, яким споряджена граната. Підричник ручної гранати іменується запалом. У гранатах типу «Ф-1», «РГД-5», «РГ-42» використовується уніфікований запал ручних гранат. Маркування підричника виконують на зовнішньому боці скоби тавруванням, а також чорною фарбою. Тавруванням указується тип запалу «УЗРГМ», рік виготовлення і шифр споряджувального заводу. Чорною фарбою – номер заводської партії. У учбових і учбово-імітаційних варіантах маркування складових частин виробів здійснюється інакше [12]. Корпуси виробів пофарбовано, як правило, в чорний колір, на їх поверхні можуть бути клейма у виді «У», «УЧ» або «Хол». Крім того, в донній

частині корпусу може бути отвір. Крім того, на поверхні пробок можуть залишитись придатні для ідентифікації відбитки пальців рук. Осколкова граната типу «Ф-1» містить заряд тротилу масою від 50 г до 56 г, має чавунний корпус і під час вибуху роздрібнюється приблизно на 1000 осколків різної ваги. Більшість осколків має масу від 0,1 г до 0,8 г і початкову швидкість від 700 м/сек до 800 м/сек., радіус їх розльоту дорівнює від 150 м до 200 м. Вражаючу здатність вони зберігають на відстані до 50 м. Окремі осколки від частин корпусу в місці загвинчування запалу мають велику масу (більше 1 г) і зберігають морфологічні особливості зовнішньої і внутрішньої поверхні корпусу (різьблення, ливарні радіуси та ін.). Крім осколків корпусу, на місці вибуху залишаються деформовані частини і фрагменти деталей запалу типу «УЗРГМ»: частини корпусу, пружини, ударник, шайби, втулки [14].

Далі на рисунку 1.6 надано ілюстрацію зазначених вище типів гранат, а саме: а) РГД-5, б) РГ-42, в) Ф-1, г) РГН, д) РГО, е) кумулятивна граната РКГЗ.

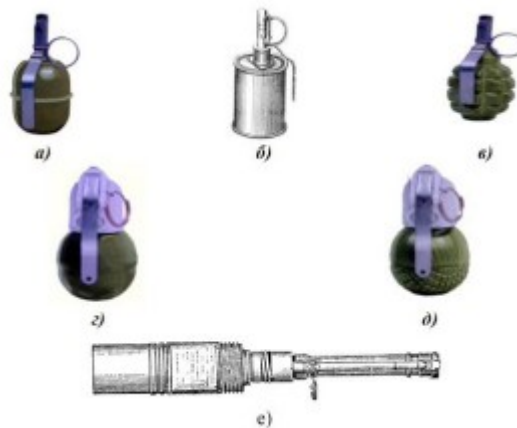


Рисунок 1.6 – Ручні протипіхотні (а, б, в, г, д) і протитанкова гранати (е)

Міни – боєприпаси, призначені для устрою мінно-вибухових загороджень, а також знищення живої сили і техніки противника [10]. Існують

протитанкові, протипіхотні, протидесантні і спеціальні. Вони можуть бути фугасної, осколкової і кумулятивної дії. Далі на рисунку 1.7 представлено ілюстрацію протитанкових мін, які можна зустріти на території України. Міни вибухають миттєво від різних видів зовнішньої дії (натиск, розвантаження, обрив дроту, струс ґрунту в місці закладки тощо).



Рисунок 1.7 – Найбільш поширені протитанкові міни в Україні

Бойові вироби мають корпус, пофарбований в зелений колір. Маркування виконують чорним кольором. При цьому вказують: шифр виробу, шифр заводу-виробника, номер партії, рік виготовлення, шифр вибухової речовини, яким споряджений виріб. На учбових боєприпасах в місці, на якому проставляється шифр вибухової речовини, наносять білу смугу завширшки від 7 мм до 10 мм, а на учбово-імітаційних виробках – червону смугу такої ж ширини. Іноді на виріб можуть бути нанесені буквені написи: «учбов» або «інерт», що свідчить про те, що предмет є учбовим, вибухової речовини не містить і споряджений інертним наповнювачем. Саморобні вибухові пристрої. Такі пристрої не містять довідково-інформаційних даних, що викликає певні труднощі при їх виявленні та знешкодженні. Через те, що конструкція

саморобного вибухового пристрою і рівень майстерності його розробника невідомі, тому їх відносять до найнебезпечніших вибухових пристроїв.

Протипіхотні фугасні міни найчастіше встановлюють на поверхні або у товщі ґрунту. Вони виготовлені з пластику та мають невеликий розмір. Принцип дії – натискний. Щоб така міна спрацювала, на неї треба наступити, впасти, надавити. Але деякі з них мають механізм самоліквідації та можуть вибухнути в будь-який момент. До таких належить поширена міна ПФМ-1 – це так звані "метелики", чи "пелюстки".

Протипіхотні міни осколкової дії в більшості випадків розміщують на поверхні чи у товщі ґрунту або маскують на деревах. Такі міни встановлюють на розтяжку або керованими. Це означає, що вони вибухають, якщо зачепити натягнутий дріт або якщо їх активують дистанційно. Найнебезпечнішими мінами уламкової дії є ті, що вистрибують та вибухають у повітрі. Дія ураження може бути круговою або спрямованою в один бік. Деякі осколкові міни теж мають механізм самоліквідації.

Через своє забарвлення протипіхотні міни підступно маскуються у природі. Їх важко помітити людським оком. Саме тому на час воєнного стану категорично заборонене відвідування лісів, парків та будь-яких територій, де ворог міг залишити смертельні пастки.



Рисунок 1.8 – Протипіхотні міни, які можна виявити в Україні

Саморобні вибухові пристрої. У певних кримінальних колах підвищений інтерес виявляється до саморобних вибухових пристроїв (приклад на рисунку 1.9), що приводяться у дію радіосигналом за допомогою дистанційного керування.



Рисунок 1.9 – Приклад саморобних вибухових пристроїв

Вони спрацьовують у момент перебування об'єкта посягання на місці установки саморобного вибухового пристрою (в кабінеті, квартирі, автомобілі, а також за маршрутом руху). Поширеність використання саморобних вибухових пристроїв пояснюється наявністю уразливих місць, можливістю надійно замаскувати вибуховий пристрій, зниженням рівня виявлення під час транспортування до місця закладки тощо. Радіокерований пристрій маскується в окремо розміщених предметах, транспортних засобах, обладнанні. Місця їх установки можуть бути на вулиці, в автотранспорті, при вході до будівель, під'їзду, ліфту, на сходах тощо. У разі неможливості візуально виявити радіокерований вибуховий пристрій застосовується локальний радіолокаційний захист (радіоблокувач). Він блокує радіосигнал, що подається з пульта керування, на який спрацьовує вибух, наприклад, такі прилади, як «Персей», «Гном 1(4)», «Завада» та ін [14].

Димні і бездимні порохи. Їх можна придбати в мисливських магазинах, у мисливців, їх витягують з учбово-імітаційних засобів, патронів до стрілецької зброї та з ін. вибухонебезпечних виробів. Димні порохи поділяють на такі: звичайні, фігурні, трубкові, шнурові, мисливські і для виконання гірських робіт. Як можна побачити на рисунку 1.10, зерна димного пороху мають аспідно-чорний колір і матовий глянець. Вони не забруднюють рук, не залишають пилу на папері і не розчавлюється при стисканні руками.



Рисунок 1.10 – Димний порох

Різні сорти порохів можна виокремити за розміром і формою зерен. Так, у боєприпасах до короткоствольної вогнепальної зброї (наприклад, револьвер, пістолет, пістолет-кулемет) використовується бездимний порох у формі тонких пластинок; пористий порох у боєприпасах до довгоствольної зброї (наприклад, гвинтівка, кулемет) – у формі зерен з одним каналом; для зарядів до гармат малого калібру (від 20 мм до 76 мм) – зерна з одним або сімома каналами; для гармат калібру понад 76 мм застосовують, в основному, порохи трубчастої форми [12].

Детонатори. Здебільшого тільки за наявності елементів детонатора (капсуля-детонатора) можна визначити можливе застосування вибухового пристрою. Це прості вмикачі, необхідні для спрацьовування вибухового пристрою. Далі на рисунку 1.11 буде перелічені види детонаторів які можна зустріти на території України.



Рисунок 1.11 – Детонатори та запали які можна зустріти на території України

Детонатори поділяють на капсуль-детонатори та електродетонатори. Залежно від принципу спрацьовування вмикачі поділяють на три основні типи: з затримкою за часом, фізичної дії та за зміною стану довкілля. Вдалим прикладом детонатора, що спрацьовує із затримкою за часом, є хімічні олівці, запальні шнури або простий пристрій, який складається з двох дротів, приєднаних до стрілок годинникового механізму. Коли стрілки зустрічаються, контакт замикається і відбувається вибух. Крім того, детонаторами можуть бути хімічні рідини, що запалюються або підриваються при змішуванні через деякий час. Детонатори фізичної дії – це пристрої, які спрацьовують після

надавлювання. Таким чином, вибух пристрою відбувається у результаті натискання на будь-що або, навпаки, звільнення чого-небудь від тиску [21].

На розглянутих виді ВР, можна виділити основні та найпоширеніші методи їх пошуку, які застосовуються під час проведення процесу гуманітарного розмінування.

1.2.2 Методи виявлення вибухової речовини

Перший метод що буде розглянуто у роботі – це метод механічного зондування ґрунту. Він реалізується з використанням щупів. За допомоги щупів проколюванням поверхневого шару землі здійснюється пошук інженерних боєприпасів (ДБЖ) та уточнюється характер виявленого предмета. Подібні щупи є в більшості комплектів армійських міношукачів, як вітчизняних, і зарубіжних. На сьогодні це найбільш ефективний спосіб пошуку мін, однак не позбавлений недоліків: низький темп пошуку (від 100 м/год до 150 м/год); трудомісткість; ефективний лише пошук ДБЖ, встановлених на глибини до 15 см; ризик для оператора.

Оптичний спосіб пошуку. Оптичне видиме випромінювання (від 0,4 мкм до 0,76 мкм) у більшості випадків (крім чистої річкової чи морської води) не проникає у середовище, що вкриває. Однак виявлення прихованого об'єкта можна здійснювати за непрямыми ознаками – порушення структури природного фону навколишнього середовища в місці встановлення цього об'єкта (кольору рослинності або ґрунту, мікрорельєфу і т.д.). Фізично тут реалізується контраст у коефіцієнтах відображення окремих хвиль оптичного випромінювання сонця або штучного підсвічування (елементами фону) [16].

Теплолокаційний метод виявлення. Встановлення будь-якого об'єкта в середовище викликає неминуче порушення її структури, насамперед у щільності, навіть за найретельнішої маскуванія. Виникає відмінність у

ступені теплового випромінювання маскуючого шару середовища, розташованого над об'єктом пошуку та решти природного фону. Основними недоліками теплового методу, що ускладнює його широке використання для виявлення малорозмірних об'єктів штучного походження в середовищах, що вкривають, є:

- значна кількість перешкод через неоднорідність верхнього шару ґрунту та рослинності;
- наявність порівняно великого проміжку часу протягом доби (від 6 год до 8 год), в якому тепловий контраст між місцем встановлення заглибленого об'єкта та тлом відсутній;
- вартість тепловізійної апаратури (вартість «чутливих» зразків становить десятки тисяч доларів США і більше).

Електромагнітні способи виявлення. В даний час виявлення аномалій в напівпровідних вкриваючих середовищах за допомогою електромагнітних полів широко використовується в різних галузях науки та техніки. Загалом електромагнітний метод виявлення полягає в реєстрації спотворень первинного (зондуючого) електромагнітного поля при потраплянні в нього об'єкта пошуку через контраст електромагнітних характеристик між цим об'єктом та вкриваючим середовищем. Первинне поле може бути природним (постійне магнітне поле Землі, поле грозових розрядів та ін.) чи штучного походження (власного передавального пристрою, віддаленої радіостанції та ін.). Електромагнітний метод виявлення об'єктів у середовищах, що вкривають, включає в себе: електричний контактний метод виявлення; магнітометричний метод виявлення; індукційний метод виявлення; радіохвильовий метод виявлення; радіолокаційне зондування напівпровідних середовищ. Контактні електричні методи виявлення об'єктів у ґрунті широко використовуються в електророзвідці корисних копалин з початку 20-х років, ХХ ст [17]. Сутність цих методів (опірив, зарядженого тіла та ін.) полягає у фіксації спотворень зовнішнього електричного або магнітного поля, що

виникають при обтіканні струмом об'єкта пошуку, що знаходиться у ґрунті. Зовнішнє поле створюють за допомогою металевих електропроводів, що мають електричний контакт з ґрунтом. На жаль, метод опорів, як і інші електричні контактні методи, дуже трудомісткий. Механізувати пересування зондів важко, жорстке кріплення їх на рамі неможливо, тому що потрібен різний механічний тиск на зонди для правильного занурення їх у ґрунт.

Магнітометричний метод виявлення дозволяє зафіксувати просторові спотворення магнітного поля Землі, створювані феромагнітним об'єктом пошуку. Виявлення діелектричних (пластмасових, дерев'яних тощо), а також діамагнітних (дюралюміній, золото, срібло, бронза тощо) об'єктів з використанням цього методу неможливо. В той же час використання переносної апаратури із застосуванням цього методу всередині або поблизу сучасних споруд (будівель, мостів, аеродромних покриттів тощо) утруднено через заважаючий вплив сталевих елементів їх конструкцій (арматури, балок, труб тощо). Іноді й у гірській місцевості, багатою металовмісними рудами, використання магнітометрів ускладнено.

Індукційний метод виявлення металевих об'єктів найпоширеніший. Він широко використовується для виявлення рукотворних об'єктів, виконаних з металу або предметів які мають окремі металеві елементи у своїй конструкції, причому метал може бути як феромагнітним, так і діамагнітним. Індукційний метод виявлення провідних металевих об'єктів заснований на реєстрації вторинних полів вихрових струмів, що виникають у цих тілах під впливом первинного низькочастотного магнітного поля. Первинне магнітне поле створюється з допомогою котушок, що живляться змінним струмом. Вихрові струми залежать від сили струму збуджуючої (генераторної) котушки, його частоти та конфігурації провідного тіла (об'єкта пошуку). Висока чутливість міношукача призводить до того, що на одну виявлену міну припадає від 100 до 1000 хибних сигналів, джерелами яких стають уламки та кулі, що знаходяться в землі [23]. Це робить практично неможливим подальше

використання приладу і змушує сапера взяти в руки саперний щуп і сантиметр за сантиметром промацувати перед собою ґрунт.

Радіохвильовий метод виявлення. При опроміненні напівпровідних середовищ ВЧ або НВЧ електромагнітним полем будь-які неоднорідності (порожнечі, металеві та пластмасові предмети та ін), розміри яких можна порівняти з довжиною хвилі, будуть розсіювати це поле. Частина відбитої енергії може бути зафіксована приймальним пристроєм шукача. Фактично радіохвильовий метод є окремим випадком широко відомого радіолокаційного методу виявлення об'єктів. Основна відмінність полягає в тому, що в радіохвильовому методі відстань до об'єкта пошуку порівняно з робочою довжиною хвилі електромагнітного поля. Процес виявлення здійснюється на малих відстанях – у ближній чи проміжній зоні випромінювання передавальної антени шукача.

Радіолокаційне зондування напівпровідних середовищ. З усіх відомих методів - виявлення методом радіолокації є одним з найбільш перспективних. Це пояснюється насамперед можливістю дистанційно виявляти та розпізнавати об'єкти незалежно від метеоумов та природного освітлення Землі. Крім того, НВЧ-зондуючі електромагнітні поля мають проникаючу здатність через напівпровідні, що вкривають середовища (ґрунт, рослинність, сніг, воду), під якими можуть бути об'єкти пошуку.

Газоаналітичний метод виявлення вибухових пристроїв. Вибуховий пристрій містить, як правило, від кількох десятків грамів до кількох кілограмів ВР. Тому його можна виявити шляхом реєстрації газоподібних випарів продуктів повільного розкладання чи випаровування вибухових речовин. Реєстрація може здійснюватися за допомогою хімічного, маспектрометричного та інших способів.

Біофізичний спосіб виявлення. Сутність біофізичного ефекту зводиться до того, що в руках деяких осіб відрізок вигнутого металевого дроту, роздвоєна гілка або інший індикатор поблизу підземних аномалій (покладів

руд, порожнин, підземних вод та ін.) відхиляється чи обертається. Цей ефект налічує 4000-річну історію. Однак природа цього ефекту досі точно не встановлена. Основна сучасна робоча гіпотеза пояснює це, як реакцію людини-оператора на просторові градієнти природної електромагнітного поля, пов'язані з наявністю підземних аномалій. Основними причинами, перешкоджаючими в даний час широкому використанню цього методу для виявлення ВВП у середовищах, є залежність надійності виявлення об'єктів пошуку від психофізіологічного стану оператора та неможливість в даний час створення пошукового пристрою на основі ефекту через відсутність повної ясності природи цього ефекту [19].

1.3 Актуальність розробки процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів

Через воєнні дії на території України небезпечною вважається територія в 300000 км², або половина України [20]. Ці данні надало Міністерство внутрішніх справ України. Також ми маємо оцінку Асоціації саперів України – майже чверть території країни, або близько 132 000 км². Ця статистика показує наскільки актуальною є тема гуманітарного розмінування на території України.

Сьогодні сферою гуманітарного розмінування на території України займаються: Міністерство оборони України, Державна спеціальна транспортна служба, Державна служба з надзвичайних ситуацій, Національна гвардія України, Службу безпеки України. Але також існують недержавні компанії, які прийшли допомагати долати наслідки конфлікту: Датська група з розмінування (Danish Demining Group – DDG), Швейцарський фонд з розмінування (Fondation Suisse de Déminage – FSD), Хала Траст (Halo Trust) та місцева українська компанія Demining Solutions [20]. Кожна з цих організацій має свої практики роботи з вибухонебезпечними загрозами, процеси та засоби

розмінування, а результат їхньої діяльності має прямий вплив на безпеку людей.

Таким чином для працівників різних державних та недержавних служб що працюють на території України є актуальною задачею мати стійку побудовану роботизовану систему, головною з функцій якої буде пошук та нейтралізація вибухонебезпечних об'єктів різного походження. На даний момент відсутній стійкий процес проведення розмінування та широке використання роботів даного типу, розглядаються до покупки дорогі іноземні аналоги. Скоординованість дій та стандартизація процесів роботи є однією з найактуальніших тем в Україні. Розробка моделі процесу гуманітарного розмінування дозволить узяти за основу одну ефективну модель проведення гуманітарного розмінування, що в свою чергу підвищить якість обґрунтування конструкторських рішень та створить підставу для скорочення обсягу полігонних випробувань різних видів РКВП.

1.4 Постановка задач досліджень

Моделювання процесу гуманітарного розмінування є актуальним завданням. Основна сфера використання системи – робота на дистанції з небезпечними об'єктами, такими як міни, вибухівка, токсичні та радіоактивні об'єкти тощо.

У ході досліджень треба

- провести аналіз існуючих видів ВВП на території України;
- провести аналіз існуючих методів пошуку ВВП;
- знайти найбільш ефективне поєднання РКВП з методами пошуку;
- змоделювати процес пошуку ВВП із застосуванням РКВП;
- змоделювати процес розмінування ВВП;
- провести необхідні розрахунки та перевірки.

1.5 Висновки до першого розділу

У ході дослідження було представлено аналіз сучасного стану системи гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів у світі та на території України.

Було розглянуто класифікацію ВНР з аналізом їх особливостей, недоліків та способи їх ідентифікації. Також було представлено розгорнутий опис існуючих методів пошуку ВНР.

На основі представленого аналізу було сформовано та зазначено актуальність теми гуманітарного розмінування із застосуванням РКВП у наш час на території України.

2 МЕТОДИКА ПРОЦЕСУ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОБОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1 Порівняльний аналіз засобів пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів

Однією з переваг є підвищення безпеки за рахунок віддалення оператора з небезпечної зони. Існують певні сумніви, чи таке обладнання працюватиме так само ефективно, коли оператор знаходиться на відстані. Система, яка робить життя оператора безпечнішим, але менш ефективна при розчищенні землі, мало цінна. Відповідно, слід провести оцінку та аналіз засобів пошуку та ідентифікації ВНП.

Зрозуміло, що важко розробити універсального робота/машину, яка б застосовувалася до різних місцевостей і працювала в різних умовах навколишнього середовища, щоб відповідати вимогам розмінування. Окрім високої вартості і складних технологій, які використовуються в роботах, вони також потребують висококваліфікованого персоналу для роботи та обслуговування. Це є додатковими факторами, які обмежують можливості використання роботів для гуманітарного розмінування.

На сьогодні в світі розробляється і виготовляється цілий ряд засобів пошуку зарядів ВР і ВНП, як за прямими так і непрямими ознаками. Прямою ознакою є наявність ВР або її окремих компонентів. До непрямих ознак відносяться: наявність металевих і пластмасових деталей, напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів, інтегральних мікросхем) вибухових пристроїв, ліній управління, антен, певна форма корпусу (циліндр, паралелепіпед) тощо.

Найбільш надійними з точки зору виявлення ВНП є засоби пошуку, що забезпечують виявлення прямих ознак. До таких засобів відносяться прилади

газового аналізу (газоаналітичні прилади); прилади, робота яких заснована на ядерно-фізичних методах і спеціальні хімічні тести. Крім цього, для виявлення ВНП широко використовуються спеціально підготовлені за спеціальним курсом мінно-пошукові собаки.

Газоаналітичні прилади виявляють пари або мікрочастинки ВР в пробах повітря, що відбираються за допомогою спеціальних конструкцій і за принципом дії поділяються на дрейф-спектрометри та газові хроматографи. Робота дрейф-спектрометрів заснована на іонізації безперервного потоку газу, розподілу утворених іонів мікродомішок за їх рухливістю в електричному полі спеціальної форми та реєстрації розділених іонів.

Завдяки своєму принципу дії дрейф-спектрометри володіють досить високою швидкістю (від сотих часток секунди до декількох секунд), але при цьому мають низьку розподільну здатність.

Недостатня перешкодозахищеність цих приладів визначає їх використання в якості індикаторів наявності ВР без ідентифікації його типу [5].



Рисунок 2.1 – Дрейф-спектрометр

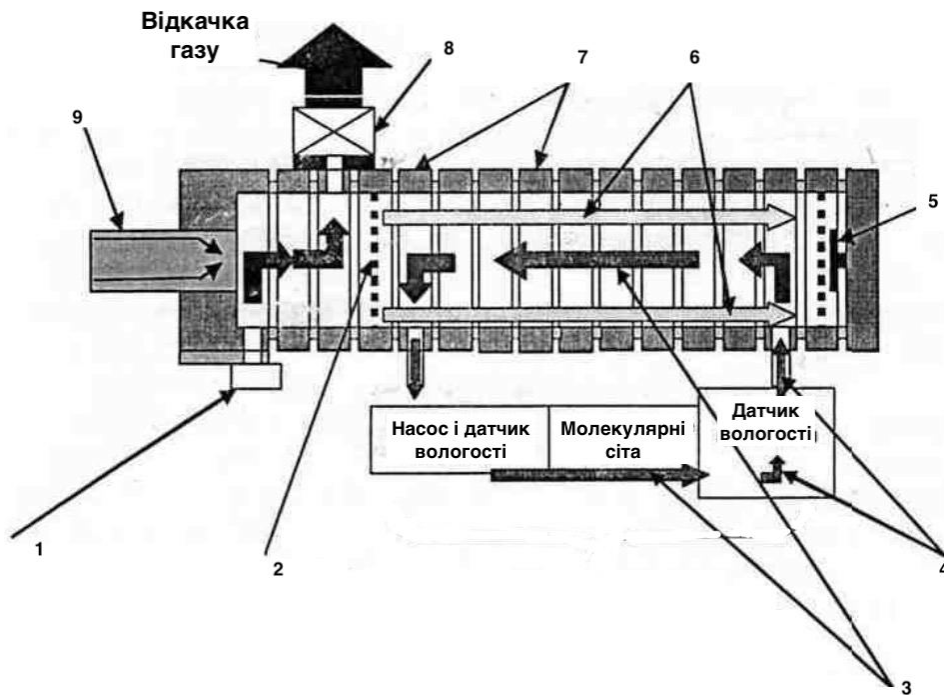


Рисунок 2.2 – Конструкція та принцип роботи дрейф-спектрометра

На рисунку 2.2 зображено типову конструкцію дрейф-спектрометра, яка включає в себе: 1 – насос, що робить набір повітря, 2 – запираюча сітка (іонний затвір), 3 – система циклічної продувки області дрейфу, 4 – датчик вологості, 5 – колектор, 6 – циркуляція газу в системі циклічної продувки, 7 – ізольований корпус, 8 – прилад відкачки газу, 9 – вентилятор.

Типовий принцип роботи представлений на рисунку 2.2 має таку послідовність дії: проба повітря через отвір «Забір повітря(проби)» за допомогою вихрового ефекту (дрейфу), створюваного вентилятором, потрапляє в іонізатор. В іонізаторі за допомогою джерела іонізації повітря частково іонізується (атоми перетворюються на заряджені частинки – іони) дією електричного струму, далі рухаються до колектора з різною швидкістю залежно від розмірів, ступеня поляризації. Це дозволяє побудувати іонний спектр.

Дрейф-спектрометри показують добрі результати при пошуку ВР, до складу яких входить тротил і нітрогліцерин, що володіють досить високою летючістю при позитивних температурах навколишнього середовища.

Недоліком більшості дрейф-спектрометрів є обмежена номенклатура ВР, які підлягають виявленню, оскільки багато з них мають низьку летючість (октоген і гексоген, що входять до складу більшості пластичних і еластичних ВР). Іншим недоліком цих приладів є можливість їх використання тільки при позитивних температурах повітря.

Найбільш популізованим приладом є металодетектор. Це електронний прилад для виявлення предметів, виготовлених з металу. Пристрої даного типу дозволяють виявити ознаки можливої присутності ВНП. Серед таких приладів відрізняється обладнання, що реагує на мінерали. Існує два види металодетекторів за типом використання: ручні та встановлені у РКВП.

У процесі розмінування застосовують ручний металодетектор. Це невеликий та компактний прилад, який з легкістю можна переносити на різні поверхні та об'єкти. Ручний металодетектор найбільш доцільно використовувати саме при близькому контакті безпосередньо з місцем де знаходиться ВНП (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Приклад проведення розмінування із застосуванням ручного металодетектора

У ручному металодетекторі перетинатися два електромагнітні поля. Одне поле створюється безпосередньо приладом. Інше поле – створюється за допомогою дії металу на сам металодетектор. У результаті взаємодії обох полів – ви отримуєте звуковий або світловий сигнал, який свідчить про наявність металу.

Для виявлення ВВП не потрібно тісного контакту. Сучасні прилади відмінно справляються зі своїм завданням на відстані як 10 см, так і 25 см [26]. Проте, на перешкоді можуть стати інші предмети, які присутні наприклад в гардеробі людини: гудзик, персні, а також монети і тому подібне. Основні переваги ручного металошукача, у порівнянні з іншим обладнанням:

- миттєве дослідження поверхні;
- велика пошукова площа;
- універсальність використання;
- обладнання пристосоване до різних кліматичних та погодних умов.

Тепер розглянемо використання металодетектора у поєднанні з мобільним роботом, тобто у складі РКВП.

У звичайних системах РКВП з використанням металодетектора, встановлених на транспортних засобах, використовується низька сенсорних пристроїв для досягнення смуги виявлення зазвичай від 2 м до 4 м завширшки. У деяких системах використовується більше ніж один тип сенсорної технології. Приклад таких РКВП наведено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – РКВП с системами сенсорів

Ці системи, будучи дуже корисними, часто є дорогими, небезпечними, складними та негнучкими. Тим не менш, світова статистика, навпаки, показала, що використання робототехнічних систем може підвищити безпеку та ефективність очищення, і що це можна розглядати як перспективні інструменти. Однак розробка такого РКВР передбачає дизайн, надійність і економічну ефективність її модульних компонентів.

З іншого боку, було описано кілька мобільних дистанційно керованих платформ (з маніпуляторами або без них), де в більшості випадків сенсорні потреби в контролі руху та навігації є дуже складними. Звичайний рух у складній місцевості потребує вдосконаленого адаптивного контролю, а чітко контрольований рух потрібен для доставки датчиків у точні позиції під час виявлення. Рух робота вимагає найвищих вимог до потужності. Хоча деякі сценарії дозволяють використовувати дротове живлення, багатьом потрібна додаткова автономність, тому потрібен бортовий блок живлення. Таким чином, ефективність руху є найважливішою, вимагаючи передового алгоритму керування [25]. З іншого боку, швидкість навряд чи буде надзвичайно важливо, оскільки виявлення займе час і, ймовірно, обмежить рух вперед. Необхідно уточнити режими роботи. Більшість вимог передбачають використання людини та дію прямої видимості на безпечній відстані. Необхідно вказати цю безпечну відстань, а також метод забезпечення правильного встановлення захисних обмежень. Як правило, сучасні методи дистанційного керування на відстані від 1 км до 2 км використовують телеоперацію. Прикладами переваг дистанційного керування є те, що завдання може виконувати один оператор і що положення камери можна легко вибрати за допомогою мікрохвильового зв'язку або оптоволокна для передачі відео прямої видимості від машини до віддаленої командної станції. Для виконання складних завдань необхідно враховувати кількість необхідних камер та їх розташування. Цілком імовірно, що принаймні дві стаціонарні або одну

ротаційну камеру потрібно встановити на транспортний засіб, щоб забезпечити круговий огляд під час роботи та дозволити моделювати ґрунт.

Повідомлялося про останні розробки з всенаправленою стереосистемою стеження [29]. Блоки керування оператора можуть бути встановлені для відображення одного або декількох зображень. Канал зв'язку може бути відеоканалом 1,4 ГГц. Можна використовувати волоконно-оптичні канали зв'язку, які забезпечують високу пропускну здатність, але затягування кабелів може бути проблемою на великих відстанях. Також необхідна лінія зв'язку для передачі сигналів керування та зворотного зв'язку датчиків. Підсумовуючи, машини для проведення робіт з розмінування замість людей-саперів, як правило, будуть колісними або гусеничними. Однак існує ймовірність того, що на певній місцевості саперу будуть більш ефективні. Такі машини, швидше за все, мають невелику вагу. Система керування та зв'язку, має характер, який сприятиме додаванню функціональних можливостей вищого порядку, таких як об'єднання датчиків, НМІ, навігація тощо. Повна система потребує в інтеграції систем керування транспортним засобом та навігації з системою об'єднання даних що дозволяє з високим ступенем впевненості розрізняти умови «міни» та «не-міни».

Наступним найбільш популіризованим пристроєм є тепловізор. Такий тип датчиків переважно використовується у БПЛА. Тепловізор – оптико-електронний прилад для візуалізації температурного поля та вимірювання температури. Переважно працює в інфрачервоній частині електромагнітного спектру.

Принцип дії тепловізора базується на перетворенні випромінення інфрачервоного спектру в видимий діапазон світлового випромінення. Спектральний діапазон, в якому працюють тепловізори, визначається інтервалами довжин хвиль в області максимуму енергії випромінення об'єктів спостереження у відповідних параметрах прозорості атмосфери. Зазвичай, це інтервали довжин хвиль від 3,5 мкм до 5,5 мкм або від 8 мкм до 13,5 мкм.

Сучасні тепловізори дозволяють виявляти об'єкти, які мають температурні контрасти до десятих і навіть до сотих частин градусів, і формують зображення високої якості. Основними технічними параметрами тепловізорів є:

- діапазон вимірюваних температур;
- роздільна здатність по температурі (різниця температур, еквівалентна шуму);
- поле зору;
- миттєве поле зору (просторова роздільна здатність);
- робочий спектральний діапазон;-кількість елементів у приймачі випромінювання.

Тепловізор, встановлений на БПЛА мультироторного типу (рисунок 2.5), перетворює його у потужний інструмент, який може застосовуватися для виявлення ВВП [7].



Рисунок 2.5 – Приклад БПЛА з тепловізором

ІЧ-термографія – це метод перетворення інфрачервоного зображення в радіометричне, що дозволяє зчитувати значення температури із зображення. Більшість тепловізорів видає відеосигнал, в якому білі області показують

максимальну випромінювану енергію, а чорні області – більш низьке випромінення. Сіре зображення містить максимальну кількість інформації. Щоб прочитати точні температури, необхідно прийняти до уваги випромінювальну здатність – ефективність, при якій об'єкт випромінює інфрачервоне випромінення. Вона залежить від якостей матеріалу або об'єкта. Це міра ефективності поверхні, що випромінює теплову енергію відносно ідеального джерела – чорного тіла. Випромінювальна здатність залежить від морфології поверхні, шорсткості, окислення, спектральної довжини хвилі, температури і кута огляду. На якість роботи тепловізора впливає відбивна здатність – міра здатності поверхні відбивати випромінення. Камера, що знаходиться поблизу поверхні, сприймає як тепло, отримане від поверхні, так і відбиту фонову температуру навколишнього середовища. Результати сканування території за допомогою БПЛА з тепловізором можна побачити на рисунку 2.6.

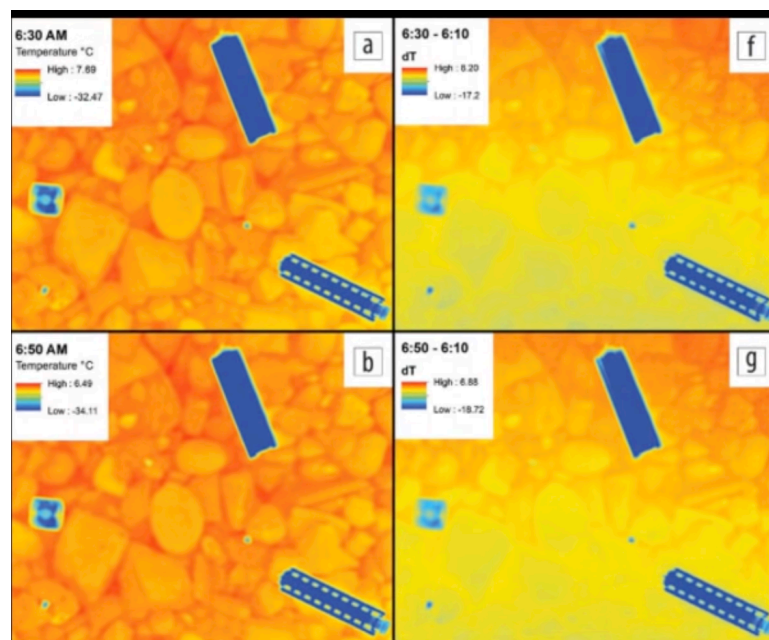


Рисунок 2.6 – Результати отримані з тепловізора встановленого на БПЛА

Складно проводити вимірювання температури відбиваючої поверхні тому, що на зображення впливають фонові теплові відображення. Слід також потурбуватись про те, щоб не проводити вимірювання під досить похилими кутами, оскільки відбивна здатність погіршується в залежності від кута огляду. В останні два десятиліття швидко розвивається техніка дистанційного дослідження об'єктів, що використовує методи оптичного спектрального аналізу та розпізнавання.

За допомогою даних методів у зображеннях досліджуваної поверхні, у вибраному вузькому спектральному діапазоні, вдається спостерігати фрагменти, котрі розрізняються спектральною яскравістю, що обумовлено різними коефіцієнтами відбиття, поглинання або випромінювання. Крім того об'єми оптичної інформації про досліджувані об'єкти значно збільшуються порівняно з випадком, коли об'єкт спостерігають у широкому спектральному діапазоні, наприклад, за допомогою звичайного тепловізора.

Головними недоліками такого способу виявлення ВВП є те, що вимірювання за допомогою тепловізора займають багато часу, мають велику похибку та можуть знаходити ВВП, які знаходяться тільки на поверхні ґрунту.

2.2 Складові процесу гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів військового призначення

Більшість спеціалістів у спільноті гуманітарного розмінування надають перевагу виконання їх роботи дистанційно або за допомогою роботів. Переваги встановлення міношукача на транспортному засобі з дистанційним керуванням необхідно збалансувати з додатковими витратами та можливим зниженням ефективності. Необхідно провести аналіз витрат, щоб визначити, наскільки виправданими є транспортні засоби з дистанційним керуванням. Робототехнічні рішення належного розміру з відповідною модульною механізованою структурою, добре адаптовані до місцевих умов. Усунення

мінних полів за допомогою РКВП значно підвищує безпеку персоналу, а також ефективність, продуктивність і гнучкість роботи. Крім того, використання багатьох роботів, які координують свої рухи, підвищує продуктивність загальних процесів виявлення мін за рахунок використання командної співпраці та координації [18].

Під час процесу гуманітарного розмінування завжди має бути абсолютна впевненість у здатності приладу пошуку знайти цільовий пристрій на необхідній глибині, перш ніж використовувати процедури очищення металодетектора. Оскільки несправними можуть бути як обладнання, так і сапери, важливо переконатися, що пристрій і його оператор можуть визначити місцезнаходження передбачуваної цілі. Щоб визначити, чи можна використовувати детектори, потрібно встановити зони тестування та калібрування пристрою.

РКВП мають можливість працювати в різних режимах керування, включаючи дистанційне керування та напівавтономний режим. Також запорукою ефективного розмінування є надійні навігаційні можливості над територією, яку потрібно розчистити, з ефективними та гнучкими можливостями пересування.

Сучасний процес гуманітарного розмінування з використанням РКВП можна поділити на такі розділи: сканування місцевості, позиціонування та контроль РКВП.

2.2.1 Сканування місцевості

Першим етапом у гуманітарному розмінуванні полів є нетехнічне обстеження території (НТО). Фактично це збір інформації з конкретної ділянки. Для цього використовується спеціальна група людей, яка прибуває на місце, знімає координати і формує поля в інформаційну систему та робить висновки або рекомендації щодо подальших дій. За результатами їх роботи

ділянка може бути виключена із небезпечних, якщо, звісно, на полі не знайдено непрямих доказів присутності вибухонебезпечного предмета. Ця складова гуманітарного розмінування є однією з найнебезпечніших для життя людини, тому у іноземних компаніях, що займаються розмінуванням, для виконання цього етапу використовують роботехнічні комплекси, що представляють із себе мобільних роботів із системами датчиків.

Георадари використовуються в багатьох мобільних роботах та БПЛА у якості датчиків обробки та виконувати сканування зацікавленої поверхні. Це справді складне завдання. Наприклад, під час використання таких датчиків (зазвичай використовується в поєднанні з металодетектором) на сигнал сильно впливає поверхня землі. Якщо вона не плоска і рівна, реакція від поверхні землі змінюється набагато сильніше, ніж від наземних мін. Крім того, така зміна реакції поверхні землі заважає відображенню міни, іноді скасовує його. Отже, обов'язковим є адаптивне сканування поверхні землі, щоб зменшити вплив неправильного позиціонування на корисний сигнал відбиття.

Приклад роботи GRIPHON-IV, представлені на рисунку 2.7 [30].

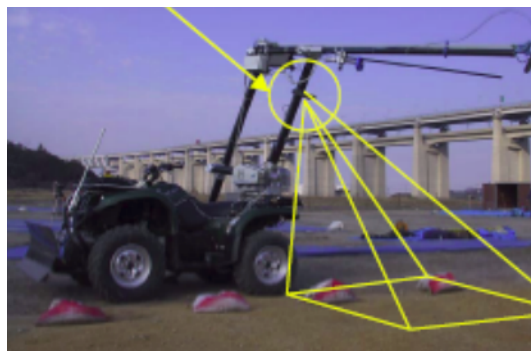


Рисунок 2.7 – Приклад роботи РКВП GRIPHON-IV

У РКВП GRYPHON-IV було обрано пасивну стереосистему, яка працює у два етапи: спочатку створюється регулярна сітка, яка буде накладатися на

зображення місцевості, потім обчислюється команда для приводи маніпулятора з мультисенсорною головкою.

Датчики наближення, прикріплені безпосередньо до головки датчика, можуть бути дуже простим рішенням для рефлекторної схеми керування для автоматичного регулювання вертикальної відстані головки датчика до рельєфу. Однак, хоча це технічно складніше та дорожче, для того, щоб зробити можливим більш ефективно картографування та сканування ширших територій за мінімальний час, використовують камери та/або лазерні далекоміри.

Одним з самих популярних засобів для сканування місцевості є БПЛА. Даний пристрій зависає у повітрі над територією певного розміру (обмеження залежить від моделі БПЛА та її налаштувань), що забруднена ВВП. Та на протязі від 15 год до 24 год будує картографічне зображення території та ідентифікує ВВП (рисунок 2.8).

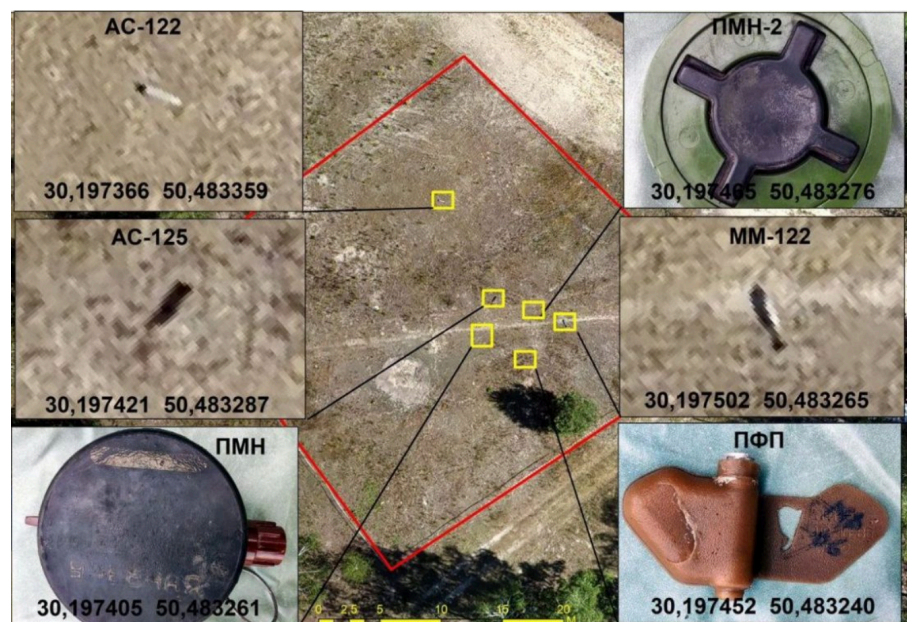


Рисунок 2.8. – Приклад результату сканування місцевості за допомогою БПЛА

2.2.2 Позиціонування РКВП

Здатність відстежувати позицію мобільного робота відносно його середовища, одночасно будуючи карту самого середовища, є критичним фактором для успішної навігації в частково або повністю невідомому середовищі. Таким чином, одночасна локалізація та створення карт були дуже активною темою досліджень протягом останнього десятиліття. У той час як більшість існуючих підходів до цього використовують сонари або лазерні сканери, використання датчиків зору, як стерео, так і монокулярів, також вивчалось, головним чином тому, що оптика може давати набагато повнішу інформацію про навколишнє середовище порівняно з іншими видами датчики дальності. Всеспрямована стереосистема відстеження представляє перевагу повного огляду 360 градусів з механічною простотою впровадження.

Нарешті, зазначається, що хороша точність позиціонування може бути отримана за допомогою комерційних систем, таких як ДНСП (диференційні глобальні системи позиціонування), оскільки комунікаційні системи підтримують їх використання [27].

2.2.3 Контроль РКВП

Як згадувалося раніше та як чітко зазначено на рисунку 2.3, робототехнічна система не обмежується мобільною платформою, але включає пропріоцептивні та екстероцептивні датчики, що підтримують точно приведення в дію механічних частин робота, а також точне позиціонування самого робота та, у випадку гуманітарного розмінування, детекторів вибухових пристроїв. Крім того, навіть якщо це рішення не використовуються у певних системах, кілька роботів можуть бути використані на одному мінному полі зі спеціальними завданнями з розмінування (підсікання кущів, виявлення, видалення тощо). Комп'ютерні системи є основою всіх

робототехнічних програм. Протягом багатьох років розміновувачі розробляли спеціальні програми для кожної нової системи.

Наприклад, для розробки CORBA, спеціального програмного забезпечення для керування декількома роботами: таке керування базується на надійних комунікаційних бібліотеках, і щоб стверджувати, що воно відкрито, воно максимально відповідає існуючим стандартам. Розглядаючи комунікаційні бібліотеки, здається, що одне проміжне програмне забезпечення для зв'язку існує більше 10 років і зараз досягло своєї зрілості, це проміжне програмне забезпечення – CORBA [18]. Окрім розробки архітектури та покращення її можливостей, симулятор MoRoS3D, написаний на Java, уже довів послідовність вибраного проміжного програмного забезпечення.

На рисунку 2.9 представлено віртуальний світ з симуляцією роботи мобільного робота. Тривимірні елементи розділені на різні категорії: роботи, перешкоди та місцевість.

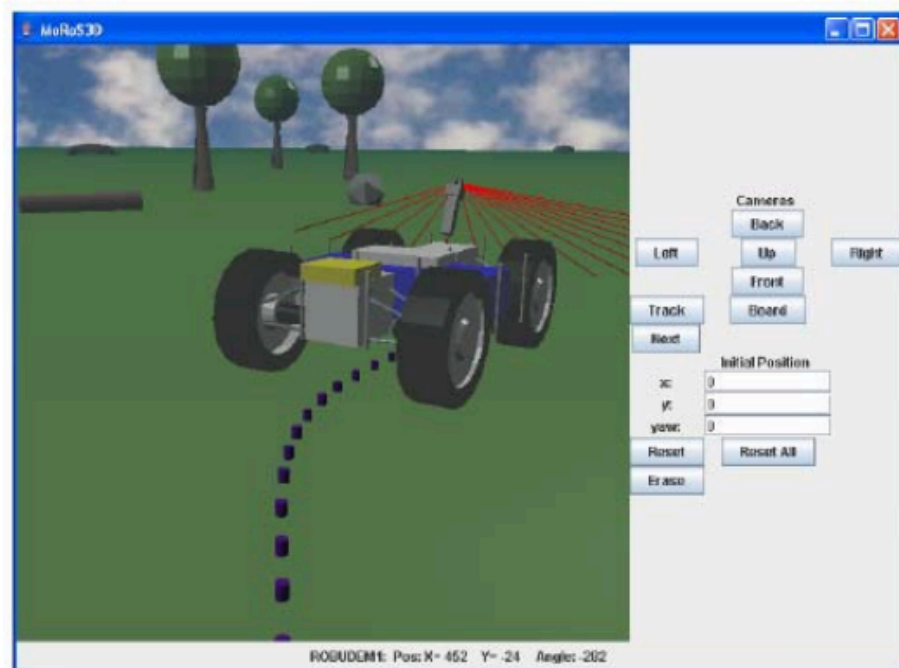


Рисунок 2.9 – Симуляція роботи РКВП

Геометрію елементів можна зчитувати з файлів або безпосередньо створювати за допомогою коду Java. На даному етапі реалізуються реальні впровадження на вуличному роботі ROBUDEM і закритому NOMAD.

2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі було досліджено методику процесу гуманітарного розмінування із застосуванням різних видів роботехнічних комплексів військового призначення.

Було проведено порівняльний аналіз засобів пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів, який показав що найбільш доцільним та ефективним рішенням для виконання цієї задачі є використання металодетектора, оскільки цей прилад має дуже високу чутливість до пошуку ВНП, універсальний у використанні та може виявляти заглиблені ВНП.

Розглянуто складові процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення, де було виявлено, що цей процес залежить не тільки від технічних аспектів і модульних компонентів РКВП, а і від правильного сканування місцевості та позиціонування й контролю РКВП. Обмеження, пов'язані з гуманітарним розмінуванням і, загалом, із зовнішнім застосуванням РКВП, можна підсумувати таким чином: високий рівень захисту від умов навколишнього середовища (пил, вологість, температура тощо), захист і стійкість від вібрації та механічних ударів, тривалий і безперервний час роботи між заряджанням/заміною батареї або заправкою, дальність бездротового зв'язку залежно від місцевості та розташування мінного поля, низька вартість, доступні ціни за рахунок використання поза -складні компоненти, висока надійність, безвідмовність, просте обслуговування, легкість у використанні, застосування зрілої технології.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОБОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних комплексів військового призначення

Основним засобом вивчення складних систем є їхнє моделювання, що відіграє особливу роль у вивченні об'єктів, які не піддаються безпосередньому спостереженню або експериментуванню. До них відносять і виробничі системи.

Модель являє собою відображення певних характеристик об'єкта з метою його дослідження. Вона відбиває не всі, а тільки істотні для конкретного дослідження характеристики об'єкта (структуру, зв'язки, властивості, параметри функціонування). Відповідність моделі об'єкту може бути різною й визначається методикою дослідження. Практичне значення мають моделі, які більш доступні для дослідження, ніж самі об'єкти. Передумовою більшої доступності моделі для дослідження порівняно з об'єктом, є те, що моделювання, як правило, супроводжується спрощенням образу об'єкта.

Представленим типом моделі буде – аналітична модель. Аналітична модель – один з класів математичного моделювання. Перевагою аналітичної моделі є те, що розв'язки можна аналізувати математичними методами. Недоліком аналітичних моделей є спрощення реальних ситуацій з метою отримання аналітичних розв'язків. Також даний вид моделі розповсюджений спосіб представлення екосистеми. Використовується з метою виявлення, математичного опису, аналізу і пояснення властивостей феноменів, які притаманні максимально широкому колу екосистем. Так, наприклад, широко

відома модель конкуренції Лоткі-Вольтерра дозволяє визначити умови взаємного співіснування видів в рамках різних співтовариств. Інший приклад – застосування аналітичних моделей для встановлення поведінки екосистем за умови зміни основних вхідних факторів. Хоча цей тип моделі є менш гнучким, ніж чисельні методи, вона є цінним інструментом для початку спостереження за принципом фізичних проблем функціонування та їх залежністю від параметрів системи [31].

Опираючись на проведені дослідження – найперспективнішою технологією для виявлення ВВП є георадар у супроводі металошукача (подвійний датчик). Незважаючи на те, що металошукачі використовуються для виявлення мін більше шістдесяти років, вважається, що потенціал металошукачів не використано повністю. Це пов'язано з відсутністю строгих інструментів тривимірного електромагнітного моделювання для цього типу систем і низьким рівнем розповсюдження результатів досліджень виробниками датчиків.

Як зазначалося раніше, нинішні моделі є обмежені однорідними ґрунтами, концентричними петлями передавача та приймача, одним сферичним похованим об'єктом з можливістю довільного розподілу електропровідності та магнітної проникності. Використовуючи розгнані данні, можна дійти до висновку, що магнітна проникність – це діелектричні властивості ґрунту, які найбільше впливають на роботу металошукачів. Крім того, це відображає потребу у використанні моделі, яка довільно імітувала б приховані об'єкти. Використовуючи аналітичні моделі, можна судити про високу важливість впливу ґрунту на продуктивність детекторів та можливості протидії його ефектам, зберігаючи ті самі обмеження, що використовуються, дослідження висловило необхідність використання моделей, в яких ґрунт не є однорідним.

Той факт, що ґрунт не є однорідним і що поховані об'єкти мають довільну форму вже було охоплено у деяких роботах, однак представлені

моделі не дозволяють визначити магнітну проникність ні ґрунту, ні прихованим об'єктам, на відміну від вакуумної проникності.

Це дослідження має на меті продемонструвати деякі результати за допомогою аналітичної моделі, щоб отримати кращі знання про фізичні явища, присутні в металодетекторі, і продемонструвати кінцево-елементну модель яку можна застосовувати для моделювання сценаріїв розмінування, виконуючи експериментальні перевірка з використанням програмного прототипу РКВП з георадаром безперервної хвилі.

У даному розділі буде змодельовано два головні етапи проведення гуманітарного розмінування, а саме: сканування місцевості на наявність ВВП та процес проведення розмінування після виявлення ВВП на території.

3.2 Архітектура та алгоритм побудови процесу виявлення ВВП

Модель РКВП з георадаром має представляти типовий сценарій розмінування, який включає круглу або прямокутну котушку передавача, що живиться струмом, що змінюється в часі, однорідний або шаруватий ґрунт з електропровідністю « σ_{soil} » і проникністю « μ_{soil} », один або багато металевих закопаних об'єктів з провідність « σ_{target} » і проникність « μ_{target} » (рисунок 3.1).

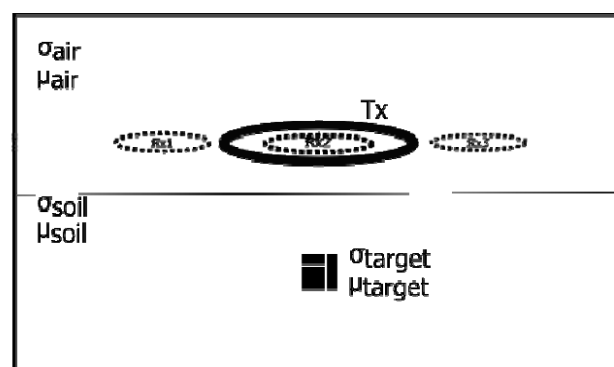


Рисунок 3.1 – Змінні сценарію розмінування

Також одна або багато приймальних котушок, розташованих у різних місцях для обчислення індукованого електромагнітного поля або напруги [30].

Датчик РКВП, який використовується для розмінування, використовує принцип електромагнітної індукції, відповідно до цього принципу котушка передавача створює змінне електромагнітне поле, яке індукує струми в закопаних об'єктах; ці струми створюють електромагнітні поля, які можуть сприйматися котушками приймача.

Метод безперервної хвилі (частотна область) і метод імпульсної індукції (часова область) є найпоширенішими методами, що використовуються в комерційних детекторах, ці методи використовують різні електромагнітні поля, створювані струмами, як показано на рисунку 3.2. У методі СВ величина та фаза електромагнітного поля, що сприймається приймачем, залежать від проникності та провідності ґрунту та похованих об'єктів [30]. У методі РІ магнітне поле, створене закопаним металом, згасає з часом залежно від характеристик об'єкта, а швидкість його зміни вимірюється приймачем.

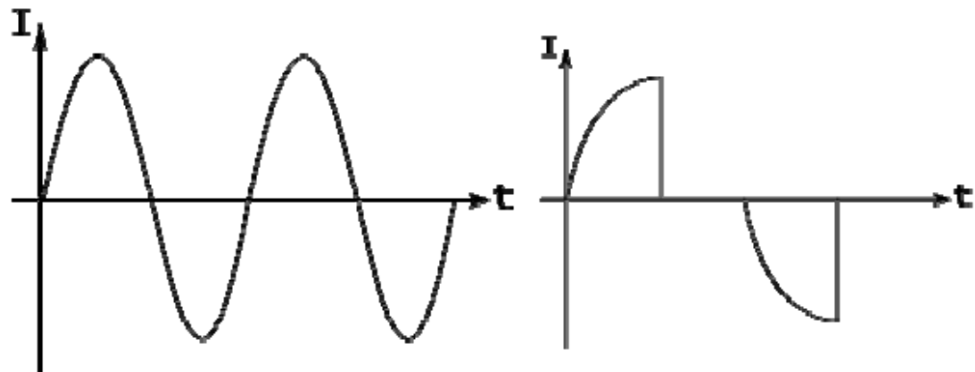


Рисунок 3.2 - Форма струму в безперервних та імпульсно-індукційних геодатчиках

Явища індукції описуються рівняннями Максвелла:

$$\nabla \times H(\omega) = \sigma(r)E(\omega) + J_p(\omega) + i\omega\epsilon E(\omega), \quad (3.1)$$

$$\nabla \times E(\omega) = -i\omega\mu H, \quad (3.2)$$

$$\nabla \times H(\omega) = 0, \quad (3.3)$$

$$\nabla \times E(\omega) = \frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

де $E(\text{В/м})$ – електричне поле;

$H(\text{А/м})$ – магнітне поле;

$\omega(\text{рад})$ – кутова частота;

$\mu(\text{Н/м})$ – магнітна проникність;

$\sigma(\text{См/м})$ – електропровідність;

$\varepsilon(\text{Ф/м})$ – це електрична проникність;

$J_P (\text{А/м}^2)$ – це щільність струму джерела, яка змінюється синусоїдально.

Оскільки найвища частота передачі в металодетекторах зазвичай становить 50 кГц [31], а провідність ґрунту нижче 1 См/м, а діелектрична проникність становить 10-11 Ф/м, переконано, що: $\omega/\sigma \ll 1$ відповідно до цього струм зміщення ($i\omega\varepsilon E(\omega)$) дуже низький порівняно зі струмом провідності ($\sigma(r)E(\omega)$), і поточне електромагнітне явище є не явищем розповсюдження хвилі, а явищем дифузії всередині земля. Таким чином, можна змоделювати систему за допомогою рівнянь дифузії Максвелла, з формули (3.1), стає формулою (3.5), а електрична проникність ґрунту або металу не має значення.

$$\nabla \times H(\omega) = \sigma(r)E(\omega) + J_P(\omega). \quad (3.5)$$

3.2.1 Аналітична модель сценарію виявлення ВВП

Змодельований сценарій включає живлення котушки передавача зі змінним у часі синусоїдальним струмом (детектор безперервної хвилі), концентричний із котушкою приймача передавача, плоский і однорідний ґрунт із довільною електропровідністю « σ_{soil} » і магнітною проникністю « μ_{soil} », а

також металевий похований ґрунт. сфери, розташованої на глибині «d» і відстані « ρ_0 » від осі петлі (рисунок 3.3).

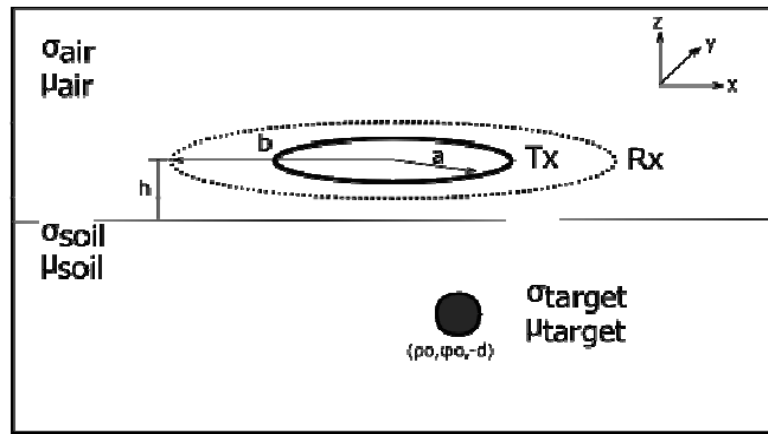


Рисунок 3.3 – Змодельована система

Ця модель дозволяє розрахувати наведену напругу в котушці приймача передавачем (V_{air}), ґрунтом (V_{soil}) і заглибленим об'єктом (V_{target}).

3.2.1.1 Індукційна напруга в приймачі за рахунок передавача і ґрунта

Напруга, що індукіювали котушкою передавача та ґрунтом у приймальній котушці радіусом «b» і N_r витків, концентричних до передавача та розміщених на одній висоті, становить:

$$V^{air} = \pi N_r b i \mu_0 \omega N_t I a \int_0^{\infty} J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) d\lambda \hat{\phi}, \quad (3.6)$$

$$V^{air} = \pi N_r b i \mu_0 \omega N_t I a \int_0^{\infty} \frac{\mu_{soil} u_0 - \mu_0 u_1}{\mu_{soil} u_0 + \mu_0 u_1} J_1(\lambda a) J_1(\lambda \rho) e^{-2u_0 h} d\lambda \hat{\phi}, \quad (3.7)$$

де $u_0^2 = \lambda^2 + k_0^2$, $u_1^2 = \lambda^2 + k_1^2$;

$k_0^2 = 0$ (у квазістатичній області);

$k_1^2 = i\sigma_{soil}\mu_{soil}\omega$ (у квазістатичній області);

$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ (магнітна проникність вільного простору);

μ_{soil} (магнітна проникність ґрунту);

ω (частота струму, що протікає через передавач);

$J_1(x)$ (функції Бесселя першого роду і першого порядку);

a (радіус передавача котушки);

b (радіус приймача котушки);

I (амплітуда струму);

N_t (кількість витків в котушці передавача);

λ (змінна інтегрування).

3.2.1.2 Індукційна напруга у приймачі за рахунок металевого об'єкта

Відповідно до цього наближення, прихований об'єкт замінюється еквівалентним магнітним диполем і струмовим диполем, а принцип взаємності використовується для отримання індукованої напруги, у такий спосіб (V^{target}) обчислюється з використанням еквівалентного магнітного та поточного дипольних моментів \vec{M} і \vec{P} .

$$V^{target} = i\omega\mu_0\vec{H}_1^b \times \vec{M} + E_1^b \times \vec{P}, \quad (3.8)$$

де E_1^b у \vec{H}_1^b – напруженість електричного та магнітного полів, які виникли б у ґрунті в місці розташування еквівалентного диполя, якби одиниця струму проходила через котушку приймача.

\vec{M} і \vec{P} залежать від форми закопаного предмета. Вирази \vec{M} і \vec{P} залежать від індукованих полів, створюваних струмом, що протікає через приймальну

катушку, від диспергованого об'єкта (його геометрії та властивостей матеріалу $(\mu_2, \sigma_2, \epsilon_2)$) і від властивостей ґрунту $(\mu_1, \sigma_1, \epsilon_1)$.

Оскільки вираз для \vec{M} і \vec{P} нелегко отримати для всіх форм, захована ціль апроксимується сферою, вирази для \vec{M} і \vec{P} легко знайти в літературі. Для кулі з радіусом R та з електромагнітними властивостями $(\mu_{target}, \sigma_{target}, \epsilon_{target})$, схованого в ґрунті з властивостями $(\mu_{soil}, \sigma_{soil}, \epsilon_{soil})$.

3.2.2 Чисельне моделювання сценарію виявлення ВПП

Реакція закопаних об'єктів була змодельована чисельно з використанням таких методів, як кінцеві різниці, кінцеві елементи та інтегральний метод. Моделювання проблеми електромагнітної індукції повинно задовольняти трьом критеріям [12]: здатність довільного моделювання прихованих об'єктів, можливість моделювання високого контрасту між електромагнітними властивостями ґрунту та прихованих об'єктів і висока обчислювальна ефективність. Проте метод інтегрального рівняння об'єму та його варіацій є швидким; максимальний контраст, дозволений цим методом, становить 300:1.

Метод кінцевих різниць може моделювати високі контрасти (близько 105:1), але він не дозволяє моделювати складні форми. Метод скінченних елементів допускає контрасти більше 105:1 і дозволяє гнучко моделювати складні форми. Цей метод подібний до кінцево-різничного методу [30] щодо швидкості виконання та вимог до пам'яті.

Більшість розроблених моделей здатні моделювати об'єкти з довільною провідністю, але постійною проникністю. У нашому випадку легше розв'язати лінійну систему, якщо припустити, що проникність постійна протягом усього сценарію, оскільки змінна проникність створює погано обумовлені матриці.

3.2.3 Моделювання геодетекторів методом скінченних елементів

Хоча рівняння Максвелла можна безпосередньо розв'язати в термінах електричного поля (E) і магнітного поля (H) за допомогою методу скінченних елементів, необхідно використовувати функції штрафу або зробити формулювання на основі ребер, щоб уникнути помилкових мод. Хорошою альтернативою для уникнення паразитних мод є розв'язання рівнянь Максвелла, сформульованих як система пов'язаних потенціалів (A, V) [6], враховуючи, що потенціали є неперервними на межах розділу матеріалів.

3.2.3.1 Потенціали формулювання рівнянь Максвелла

Щільність магнітного поля (B) і електричне поле (E) можна записати через магнітний векторний потенціал (A) і скалярний електричний потенціал (V) як:

$$B(\omega) = \nabla \times A(\omega), \quad (3.9)$$

$$E = -(i\omega A + \nabla V). \quad (3.10)$$

Оскільки $B = \mu H$ рівняння (3.5) стає таким:

$$\nabla \times B(\omega) = \mu (J_p(\omega) + \sigma E(\omega)). \quad (3.11)$$

Використовуючи вираз реактивності $\nu = \frac{1}{\mu}$ і підставляючи рівняння потенціалів у (11):

$$\frac{1}{\nu} \nabla \times \nabla \times A(\omega) + i\omega\sigma A + \sigma \nabla V = J_p(\omega). \quad (3.12)$$

У магнітоквазістатичному наближенні густина струму ($\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E}$) є безрозбіжною [14], тому:

$$\nabla \times (\sigma\mathbf{E}) = 0. \quad (3.13)$$

Заміна рівняння (3.10) у попередньому рівнянні:

$$-\nabla \times [i\omega\sigma A + \sigma\nabla V] = 0. \quad (3.14)$$

Рівняння (3.12) і (3.14) відомі як формулювання рівнянь Максвелла на основі зв'язаного потенціалу Ungauged Curl-Curl.

3.2.3.2 Рішення формули Ungauged Curl-Curl:

Рішення формулювання Ungauged Curl-Curl було запропоновано [9] з використанням вторинного потенціалу, щоб уникнути дискретизації котушки передавача [5], отримуючи наступну систему рівнянь:

$$-\nabla \times (i\omega\sigma A_s + \sigma\nabla V_s) = \nabla \times (i\omega\sigma_s A_p + \sigma\nabla V_p), \quad (3.15)$$

$$v\nabla \times \nabla \times A_s + i\omega\sigma A_s + \sigma\nabla V_s = -v_s\nabla \times \nabla \times A_p - i\omega\sigma_s A_p - \sigma_s\nabla V_p, \quad (3.16)$$

де A_s і V_s – вторинні потенціали (магнітний векторний потенціал і скалярний електричний потенціал, індукований похованими об'єктами відповідно);

σ_s і v_s – провідність і відновлюваність похованих об'єктів. A_p і V_p первинні потенціали (магнітний векторний потенціал і скалярний електричний потенціал, індукований котушкою передавача в півпросторі);

σ_p і ν_p електропровідність ґрунту або повітря у відповідному положенні,
 $\sigma = \sigma_s + \sigma_p$ і $\nu = \nu_s + \nu_p$.

Цей первинний потенціал можна знайти в [13].

Розв'язок формулювання Ungauged Curl-Curl з використанням традиційного методу кінцевих елементів на основі вузлів призводить до погано обумовленої лівої частини лінійної системи. Хорошою альтернативою для цього є використання методу FEM на основі країв. У ньому пропонується змішане формулювання, яке описує A_s як лінійну комбінацію реберних базисних функцій (a_j) і V_s як лінійну комбінацію вузлових базисних функцій (φ_j).

$$A_s(x, y, z) = \sum_{j=1}^M A_{s_j} a_j(x, y, z), \quad (3.17)$$

$$V_s(x, y, z) = \sum_{j=1}^M V_{s_j} \varphi_j(x, y, z), \quad (3.18)$$

де M – кількість ребер;

N – кількість вузлів.

Відповідно до цього методу A_{s_j} є магнітним векторним потенціалом, дотичним до ребра j , а V_{s_j} є електричним потенціалом у вузлі j .

Замінивши (3.17) і (3.18) в (3.15) і (3.16), застосувавши метод Гальоркіна і функцію Гріна для зниження порядку диференціювання, отримаємо наступну лінійну систему:

$$\sum_{j=1}^M (v A_{s_j} (\nabla \times a_i(x, y, z), \nabla \times a_j(x, y, z))_V + A_{s_j} (a_i(x, y, z), i\omega\sigma (a_j(x, y, z))_V)) \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^N V_{sk}(a_i(x, y, z), \sigma \nabla \varphi_k)_V = (a_i(x, y, z), \sigma_s E_p)_V, \\
& \sum_{j=1}^M A_{sj}(i\omega \sigma \nabla \varphi_i, a_j(x, y, z))_V + \sum_{k=1}^N V_{sk}(\nabla \varphi_i, \sigma \nabla \varphi_k)_V = -(\sigma_s \nabla \varphi_i, E_p)_V. \quad (3.20)
\end{aligned}$$

Це лінійна система, яку можна розв'язати за допомогою методу квазімінімального залишку (QMR) із прекодиціонером Якобі. Праву частину лінійної системи можна розв'язати за допомогою методу квадратури Гауса або методу інтегрування, а внутрішні добутки можна обчислити за допомогою виразів, знайдених у [28], [29] або [30].

3.3 Моделювання процесу знищення ВВП

Розмінування вибуховим способом є одним з найбільш поширених способів знешкодження інженерних боєприпасів як в Україні, так і в світі [1]. Зокрема, даний спосіб широко поширений при створеннях безпечних проходів у протитанкових та змішаних мінних полях. В даний час відсутні ознаки переходу на зразки, що функціонують на інших фізичних принципах формування безпечних проходів.

Необхідний результат – прохід заданої ширини та довжини, в якому відсутні функціонуючі міни, забезпечується за рахунок пов'язаної сукупності процесів різної природи, основним з яких є викид мін вибухом.

Рівень розвитку технологій чисельного моделювання на сучасному етапі дозволяє відтворювати практично всю пов'язану сукупність процесів, що призводять до знешкодження міни:

- детонація заряду вибухової речовини;
- взаємодія міни з ударною хвилею у повітрі та землі;

– рух міни за інерцією.

Розрізняючись за ступенем відпрацьованості та деталізації, перераховані процеси в сукупності відповідають викиду міни вибухом у ході розмінування. На підставі наявного досвіду, постановка та вирішення ускладненої чисельної задачі описує всі перелічені підпроцеси викиду міни вибухом в одному програмному середовищі, автор вважає надмірно ресурсомісткою та недоцільною. Найбільш доцільне використання комплексу програм, що забезпечують вирішення задачі моделювання за мінімальний час та з використанням мінімальних обчислювальних ресурсів.

На першому етапі реалізації комплексної методики з використанням модуля ANSYS Autodyn чисельно моделювався у двовимірній та трьох мірній постановках вибух подовженого заряду.

Основна увага зосереджувалася на отриманні оцінки величин швидкості, тиску та питомого імпульсу при проходженні повітряної ударної хвилі на різних відстанях від поздовжньої осі заряду. На рис. 9 наведені геометричні моделі для двовимірної та тривимірної задач, в яких заряди однієї й тієї ж вибухової речовини (ВР) мали однакові розміри у площині перпендикулярній осі симетрії. При цьому в 2D випадку заряд ВР передбачався суцільним в осьовому напрямку, а в 3D варіанті - рознесеним, що складається з трьох циліндричних шашок з повітряним проміжком між ними (рисунок 3.4).

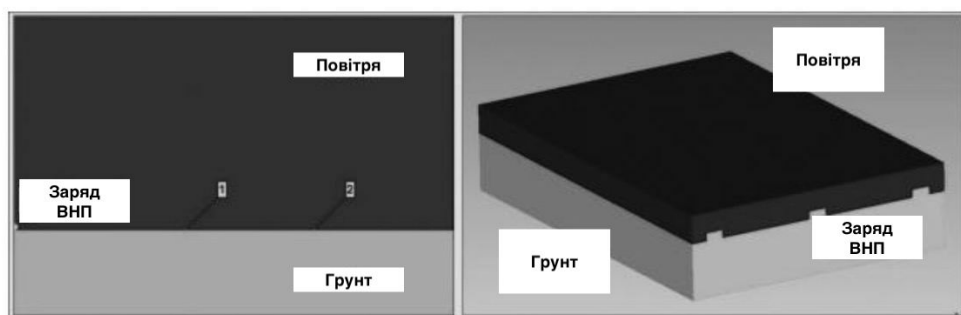


Рисунок 3.4 – Геометричні моделі 2D і 3D задач

На рисунку 3.4 написами і виносками позначені повітря, заряди ВР і ґрунт (пісок). Цифрами позначені положення датчиків.

У розрахунку використовувалися датчики, які розміщувалися вздовж піщаної поверхні на відстанях 2, 3,5 і 7 м відповідно. Ініціювання детонації проводилося з осі симетрії заряду ВР у 2D постановці або з геометричних центрів торцевих поверхонь у 3D випадку.

При чисельному моделюванні у 2D випадку передбачалося таке:

- розрахункова площина перпендикулярна до осі симетрії заряду;
- у всіх подібних площинах процес розвивається однаково, тобто детонація подовженого заряду відбувається одномоментно по всій довжина осі симетрії.

Розрахункова область у 2D постановці представлена прямокутником з розмірами 10 м × 3,5 м. Верхня та права межі на лівій половині рис. 9 являють собою межі з вільним витіканням матеріалів, нижня і ліва абсолютно тверді стінки.

У 3D випадку використовувалася наступна модель завдання:

- три зосереджені заряди у формі паралелепіпеда ініціювалися послідовно із затримкою 0,288 мс за своїм правим торцем зліва направо згідно з правою половиною рисунку 3.4;

- розміри кожного заряду: довжина 300 мм, в перетині – квадрат зі стороною 125 мм, відстань між центрами мас зарядів – 2 м;

- розрахункова область являла собою паралелепіпед з розмірами 4,9 м × 7,01 м × 1,5 м;

- граничні умови на всіх поверхнях розрахункової області, крім нижньої, відповідали умові вільного витікання, а нижня представлена «жорсткою стінкою» в ролі площини симетрії.

У розрахунковій 3D області встановлювалися групи ейлерових датчиків. Відстань від датчиків до осі, на якій розташовувалися заряди — 2 м, 3 м, 5 м, 7 м. Група датчиків 1–3 перебувала на промені, що виходить із центру мас

самого лівого на рисунку 3.4 заряду, який ініціюється першим. Група датчиків 4-6 знаходилася на промені, розташованому посередині між правим зарядом і центральним зарядами, рисунок 3.5 та рисунок 3.6. Група датчиків 7-9 розташовувалась посередині між центральним та правим зарядами, рис. 3.6.

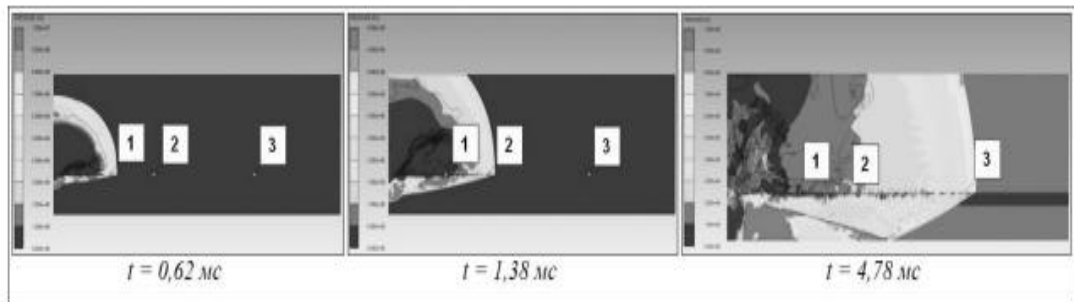


Рисунок 3.5 – Кінограмма розподілу тиску

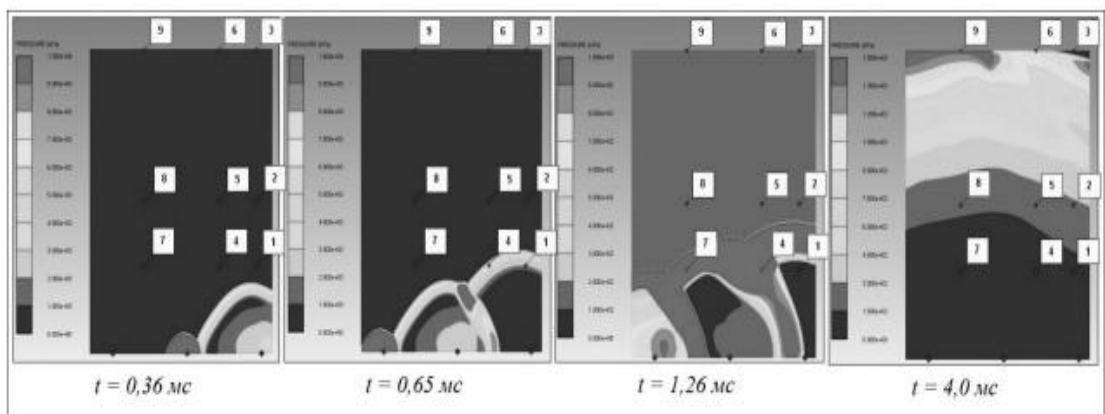


Рисунок 3.6 – Кінограмма розподілу тиску на перетині піска і повітря

Для всіх постановок (2D і 3D) як моделей повітря і піску використовувалися матеріали Air і Sand, запозичені з бібліотеки Autodyn.

На рисунку 3.5 наведено розподіл тиску для 2D постановки в різні моменти часу. На рисунку 3.5 показано порядок розповсюдження повітряної ударної хвилі і породжуваної нею ударної хвилі в піску. На п'ятій мікросекунді видно відбита від нижньої межі розрахункової області (умовна «жорстка

стінка») ударна хвиля в піску. Розподіл тиску на кордоні між піском і повітрям для 3D постановки наведено на рисунку 3.6.

На рисунку 3.6 чітко спостерігається ефект посилення повітряної ударної хвилі при детонації наступного заряду в порівнянні з попереднім. Найбільша відмінність у величині тиску на фронті ударної хвилі спостерігається у хвилях, які породжені зарядами, які ініціює перший і другий, в 1,8 раза. Тиск на фронті ударної хвилі від третього заряду більше тиску на фронті ударної хвилі від другого заряду приблизно у 1,3 рази. Очікується, що відносно посилення тиску на фронті ударної хвилі від кожного наступного заряду буде знижуватися.

Приклади розподілу параметрів, зареєстрованих датчиками в різні моменти часу, представлені на рисунку 3.7.

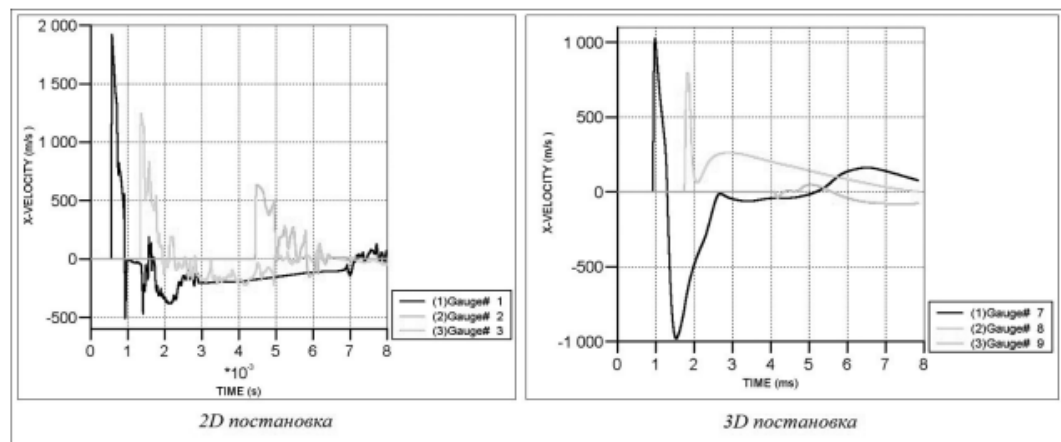


Рисунок 3.7 – Залежність швидкості від часу на датчиках

Аналізуючи дані рисунок 3.7 можна зробити висновок, що зі збільшенням відстані до осі симетрії заряду в 2D моделі максимальні тиск і швидкість знижуються, а значення питомого імпульсу веде себе немонотонно: зростає до деякої відстані, а потім починає знижуватися. Причиною такого немонотонної поведінки питомої імпульсу в залежності від відстані є

різноспрямований характер зміни фізичних величин, що його визначають, - тиск на фронті ударної хвилі зменшується з відстанню, а тривалість позитивної фази стиснення зростає.

Для 3D постановки із результатів розрахунків слід зробити висновок про те, що найближчі до осі зарядів ВР датчики (1, 4, 7), що знаходяться на відстані 2 м, реєструють найбільший тиск на фронті ударної хвилі у разі їх розташування на радіальній осі, що виходить із центру мас самого правого заряду або між правим і центральним зарядом. Для крайнього правого заряду на рис. 9 максимальний тиск реєструється не найближчим до нього датчиком 7 (відстань 2 м), а датчиком 8 (відстань 3 м). Цей результат пояснюється впливом повітряних ударних хвиль, що виникають при детонації сусідніх зарядів, які стримують рух повітря в осьовому напрямку, тим самим перерозподіляючи енергію у радіальному напрямку.

Серед датчиків, розташованих на максимальній відстані від осі зарядів на рис. 3.4 (3, 6, 9) (відстань — 7 м), найбільший тиск реєструється на датчику 9, що знаходиться ближче до правого краю розрахункової області.

При цьому значення максимального тиску на датчику 9 незначно відрізняється від датчиків 3 і 6. Також цікавить порівняння картини розподілу тиску за групами датчиків 4–6 і 7–9, розташованих на радіальних променях, що виходять посередині двох зарядів, відповідно, лівого та центрального, центрального та правого на рис 1. У ближній зоні (2 м) значної різниці тисків не спостерігається. Очевидно, що обмежує вплив сусідніх зарядів не встигає позначитися на поширенні ударної хвилі. У той же час на середньому (3,5 м) та великому видаленні (7 м) вплив сусідніх зарядів починає відчуватись і проявляється у збільшенні тиску на фронті ударної хвилі (датчики 8 та 9 порівняно з датчиками 5 та 6) приблизно в 1,3 рази.

Порівняння результатів у двовимірній та трьох мірній постановках показує, що за максимальним надлишковим тиском на фронті ударної хвилі двомірний та тривимірний розрахунки розходяться у ближній до зарядів

області (тиск більше для двовимірного розрахунку) та практично збігаються на відстанях, що перевищують 3 м.

На наступному (другому) етапі реалізації методики, на підставі розподілу параметрів ударної хвилі в часі та просторі розраховувалися коефіцієнти аеродинамічних сил і моментів у комплексі «Логос».

Геометричні моделі, створені в FreeCAD представлені на рисунку 3.8.

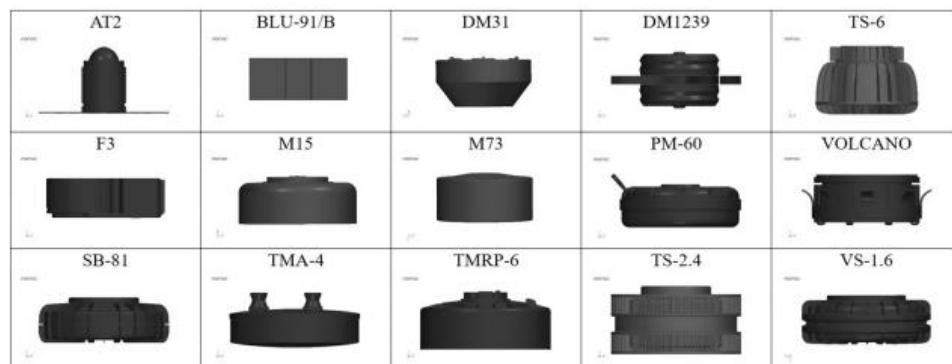


Рисунок 3.8 – Геометрія ВНП досліджених у роботі

Аналіз рисунку 3.8 показує значну різноманітність форми і потрібного рівня деталізації зовнішньої поверхні інженерних боєприпасів.

Технологія розрахункового отримання коефіцієнтів аеродинамічних сил і моментів у діапазоні швидкостей до надзвукових включно вважається традиційною, досить розвиненою і верифікованою.

У модулі інженерного аналізу ПМК «Двійник-ПС», створеного на основі ПК «Логос» реалізовано стандартний для CAE-систем алгоритм вирішення задачі, що включає послідовне створення геометричної, дискретної (сеточної), фізико-математичної моделі обчислення та аналітичну обробку результатів.

Приклади дискретних моделей, підготовлених генератором відсікання осередків, наведено на рисунку 3.9.

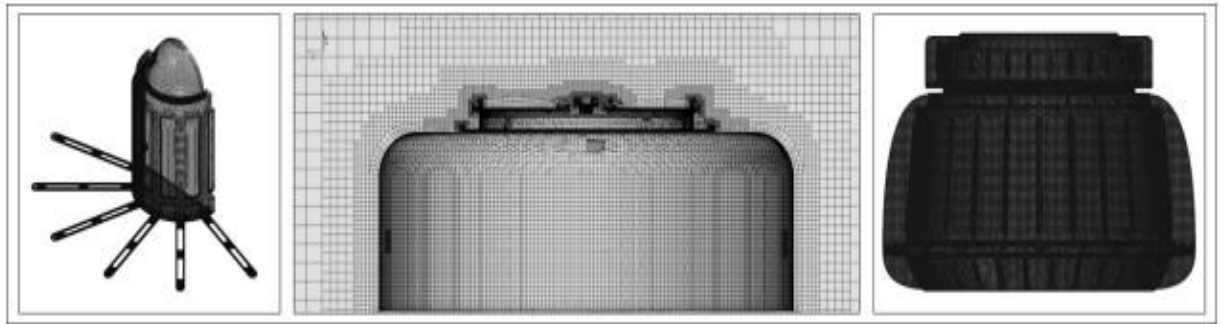


Рисунок 3.9 – Дискретні моделі

Аналіз рисунку 3.9 показує досить високу деталізацію дискретних моделей та дозволяє побічно оцінити якість збудованої сітки.

При створенні фізико-математичної моделі впливу ударної хвилі на міну параметри цієї хвилі, що утворюється після вибуху, задаються у вигляді постійних або змінних у часі швидкості та тиску потоку на вході області продування.

Загальними для всіх інженерних боєприпасів особливостями обчислення коефіцієнтів аеродинамічних сил і моментів є:

- підвищені вимоги до точності розміщення міни на опорній поверхні;
- необхідність вибору площини симетрії таким чином, щоб грані, що розсікаються, по верхності міни прагнули до нормалі січення особливо для геометричних елементів з малими радіусами кривизни;
- використання тільки надзвукового (враховує стисливість) вирішувача (TVD ПК «Логос») навіть при малих (менше 0,4) числах Маха;
- облік турбулентності потоку моделлю $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), яка забезпечує прийнятну збіжність з експериментами при розрахунку вільних і струминних зсувних течій, а також пристінкових прикордонних шарів;
- забезпечення прийнятної для обчислювальних експериментів точності моделі прикордонного шару навколо поверхні міни за рахунок кількості

призматичних шарів дискретної моделі від 3 до 10 з відносною товщиною від 0,001 до 0,007 та безрозмірною відстанню до стінки Y від 1 до 50.

Обчислювальні експерименти проводилися в режимі серійних або розпаралелених розрахунків протягом 3 с модельного часу з кроком 0,001 с (до 5 000 ітерацій).

Прийнятна збіжність отриманих рішень підтверджується графіками нев'язок, наведених на рисунку 3.10.

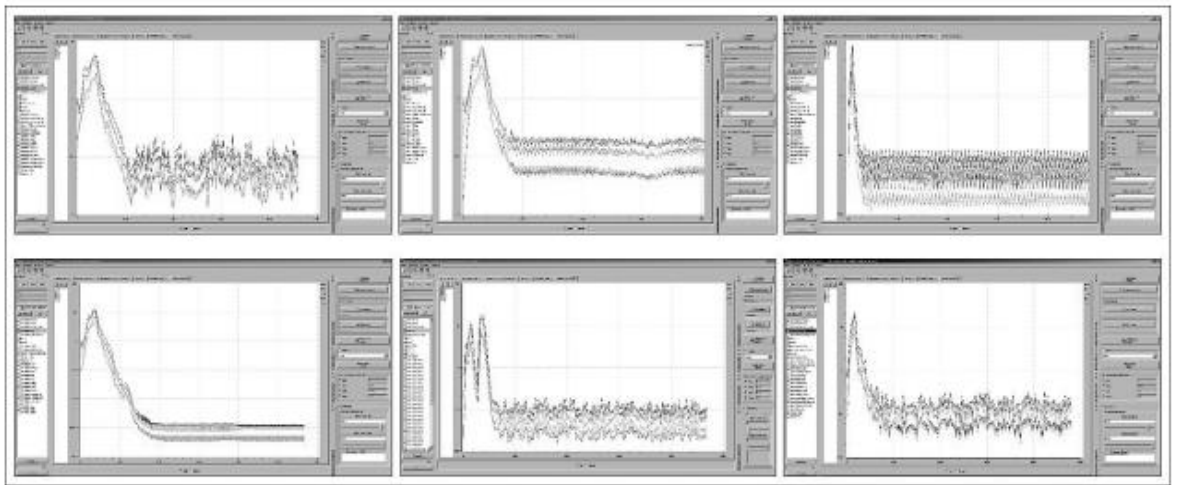


Рисунок 3.10 – Графіки в інтерфейсах Логос-Монітор

Аналіз рисунку 3.10 показує, що обчислення тривали доти, доки тривалість значення нев'язок не перевищувала тривалість перехідного процесу більш ніж у 3 рази.

Для аналітичної обробки результатів використовувалися програми Scientific View та Логос-Монітор, що входять до складу дистрибутива ПМК "Двійник-ПС". З їх допомогою отримано картини розподілу параметрів обтічного середовища по корпусу міни (рисунки 3.11, 3.13) та графіки сил, що діють на міну (рисунок 3.12).

Розгляд рисунків 3.11, 3.12, 3.13 показує схожість картин розподілу параметрів обтікаючого середовища, а також необхідність використання середніх значень сил і моментів при обчисленні аеродинамічних коефіцієнтів.

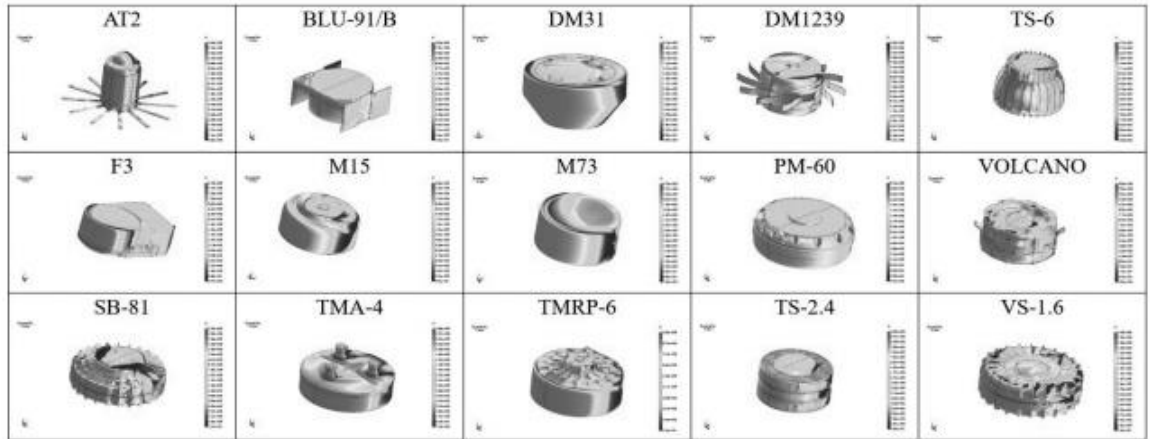


Рисунок 3.11 – Розподіл тиску по поверхні мін

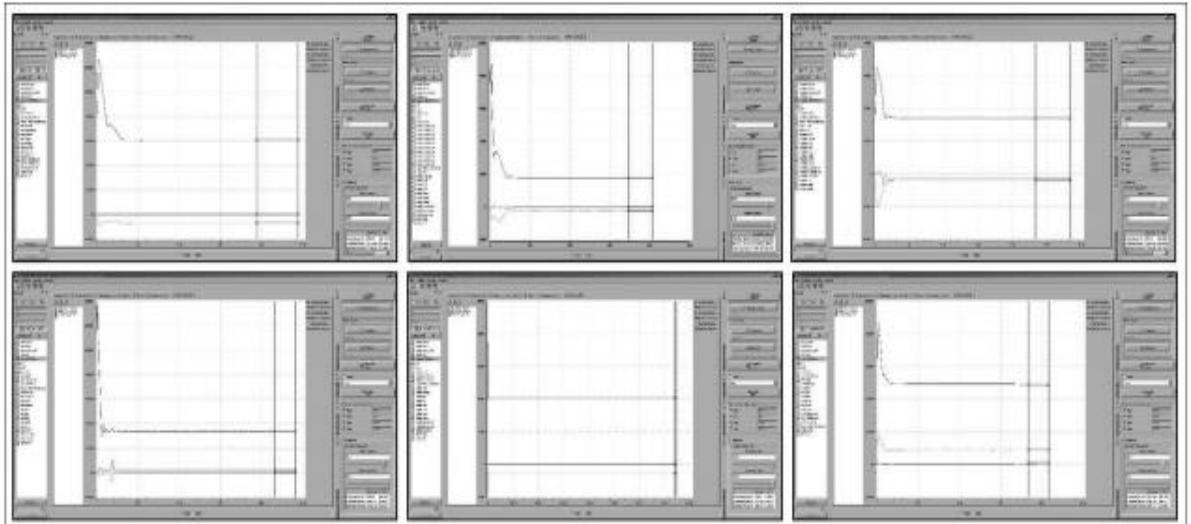


Рисунок 3.12 – Розподіл швидкості на верхній межі слою



Рисунок 3.13 – Значення F по ітерації в Логос-Моніторі

У ході подальших обчислень параметрівтраєкторії міни доцільно використовувати середні значення коефіцієнтів аеродинамічних сил і моментів.

Вихідними даними для траєкторного моделювання в ПК «Ейлер» є:

- геометрична модель міни з масо-моментними характеристиками, що задаються тензором інерції (створюється і розраховується в САПР на етапі побудови геометричної моделі);
- параметри ударної хвилі (швидкість, тиск) у часі (розраховується на першому етапі);
- коефіцієнти аеродинамічних сил і моментів (розраховуються другою етапі);
- інші необхідні параметри (коефіцієнт тертя-ковзання міни по ґрунту, жорсткість контактної взаємодії, коефіцієнт відновлення швидкості та ін.).

Інтерфейс програми Euler 10.43 (x64) з відкритою моделлю міни на ґрунті наведено на рисунку 3.15.

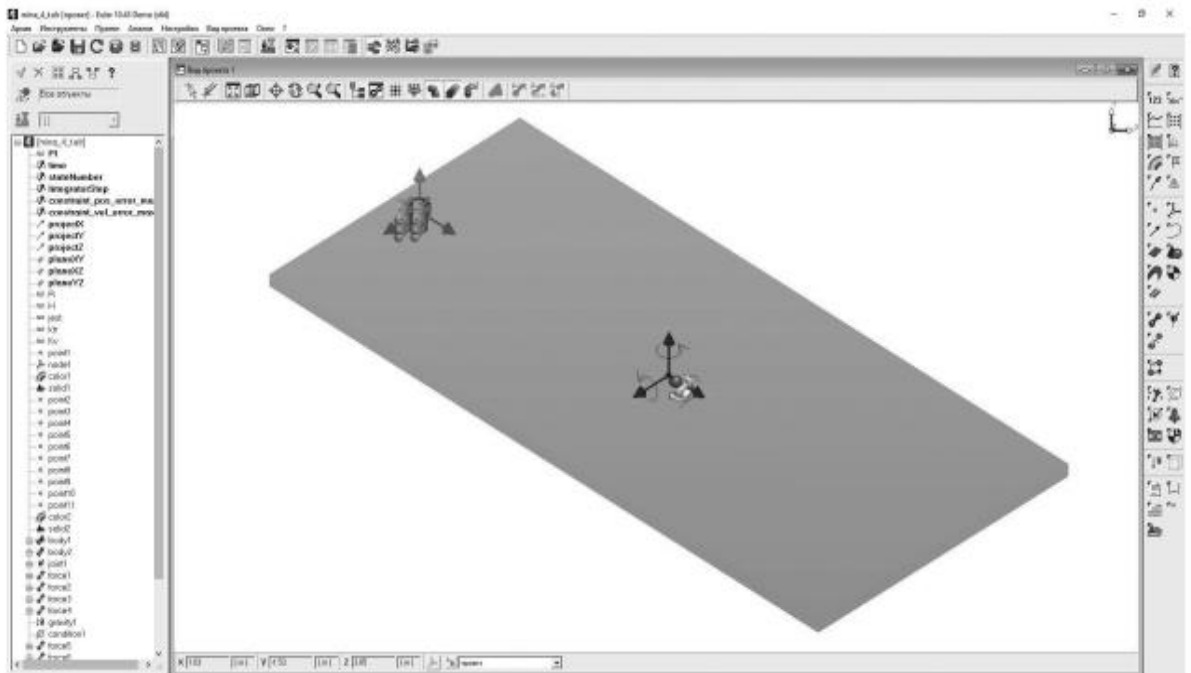


Рисунок 3.15 – Інтерфейс програми Euler

Модель представлена на рисунку 3.15, передбачає реалізацію наступних припущень та обмежень:

- всі елементи моделі представлялися як недеформоване тверде тіло;
- гравітаційний вплив здійснювався у вертикальній площині;
- щільність середовища (на відміну від швидкості та тиску) зберігається постійною;
- міна пов'язана з ґрунтом шарніром без обмежень (6 ступенів волі);
- контактна взаємодія всіх елементів міни з ґрунтом описувалася тільки однаковими закономірностями (точка-площина, точка-тіло, та ін);
- тривалість моделювання 3 с, крок модельного часу (інтегрування) 0,001 с.

Кінограма візуалізації результатів моделювання траєкторії руху міни наведено на рисунку 3.16.

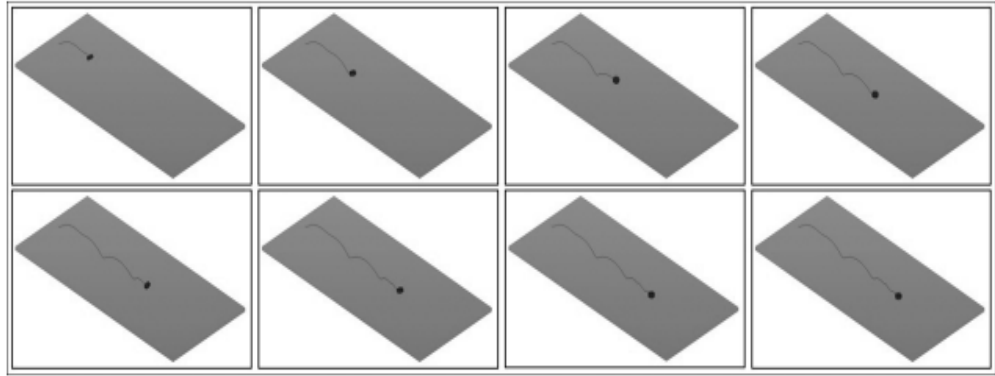


Рисунок 3.16 – Кінограма результатів моделювання

Аналіз рисунку 3.16 показує прийнятну якісну несуперечність результатів моделювання.

Приклади візуалізації параметрів траєкторії (координати та швидкість центру маси міни) наведено на рисунку 3.17.

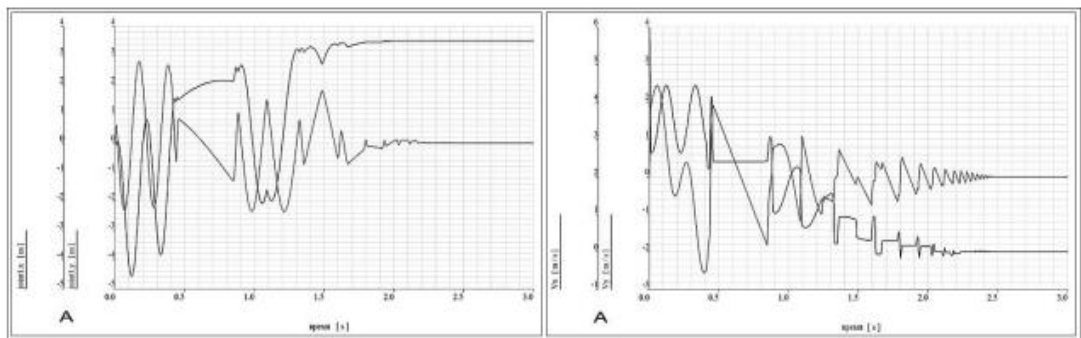


Рисунок 3.17 – Залежність координат та швидкостей центру мас мін від часу

Порівняння рисунків 3.16 і 3.17 додатково підтверджує несуперечність результатів і показує відповідність екстремумів графіків моментів взаємодії міни з ударною хвилею та ґрунтом.

Таким чином, доказово і наочно викладено зміст методики моделювання процесу розмінування шляхом викиду мін з проходу за рахунок вибуху з використанням доступного програмного забезпечення, чим підтверджено практичну значущість розділу.

Важливо зазначити, що обмеження методики, що накладаються типами заряду розмінування, міни, ґрунту та інших умов, у ході моделювання не виявлено.

Використання описаної методики під час розробки перспективних процесів розмінування дозволить підвищити якість обґрунтування конструкторських рішень та створить підставу для скорочення обсягу полігонних випробувань.

3.4 Програмна реалізація процесу гуманітарного розмінування

Для програмної реалізації побудованого алгоритму гуманітарного розмінування було обрано MoRoS3D. Головними особливостями програми є можливість розділення елементів побудованої території на різні категорії (різні типи місцевості), підтримка різноманітних бібліотек роботичних механізмів (маніпулятори, різні види датчиків), зручний інтерфейс для зображення карти мінних місць.

Для користувача видимий результат симулятора є синтетичним зображенням. Насправді, це не тільки образ, а й модель яка побудована за допомогою алгоритмів, заснованих на фізичних законах і їх використання добре визначені структури даних. Симулятор забезпечує такі функції:

- одночасне моделювання кількох роботів у реальному часі;
- взаємодія з користувачем через GUI;
- динамічне керування мобільними роботами;
- виявлення та відповідна реакція на зіткнення між рухомими та нерухомими об'єктами;

- моделювання датчиків положення та відстані;
- інтерфейси CORBA.

Спершу за допомогою інструментів програмного забезпечення MoRoS3D генеруємо нерівномірну, різногрунтову (земля та пісок) поверхню площею 20 м². Далі за допомогою бібліотеки об'єктів FreeCAD беремо моделі представлені на рисунку 3.8 та розставляємо їх за допомогою інтерфейсу представленому на рисунку 3.18 у певних точках. Бібліотека що використовується показує значну різноманітність форми і потрібного рівня деталізації зовнішньої поверхні інженерних боєприпасів. Технологія розрахункового отримання коефіцієнтів аеродинамічних сил і моментів у діапазоні швидкостей до надзвукових включно вважається традиційною, досить розвиненою і верифікованою у програмному забезпеченні MoRoS3D.

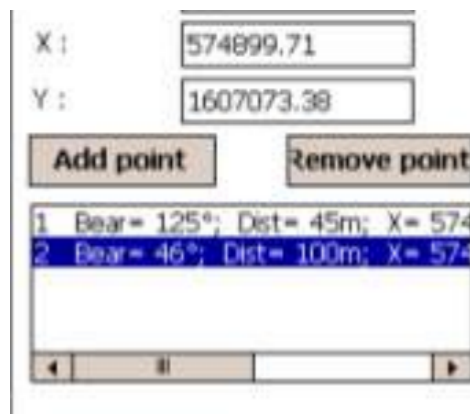


Рисунок 3.18 – Інтерфейс позиціонування боєприпасів

Наступним кроком знов завдяки програмному забезпеченню можна додати мобільного робота з геодатчиком на побудовану територію. Геодатчик було узято із бібліотеки NationalInstrumentsPXI. Ця бібліотека має власний інтерфейс, який представлено на рисунку 3.19 та дозволяє внести налаштування для датчиків.

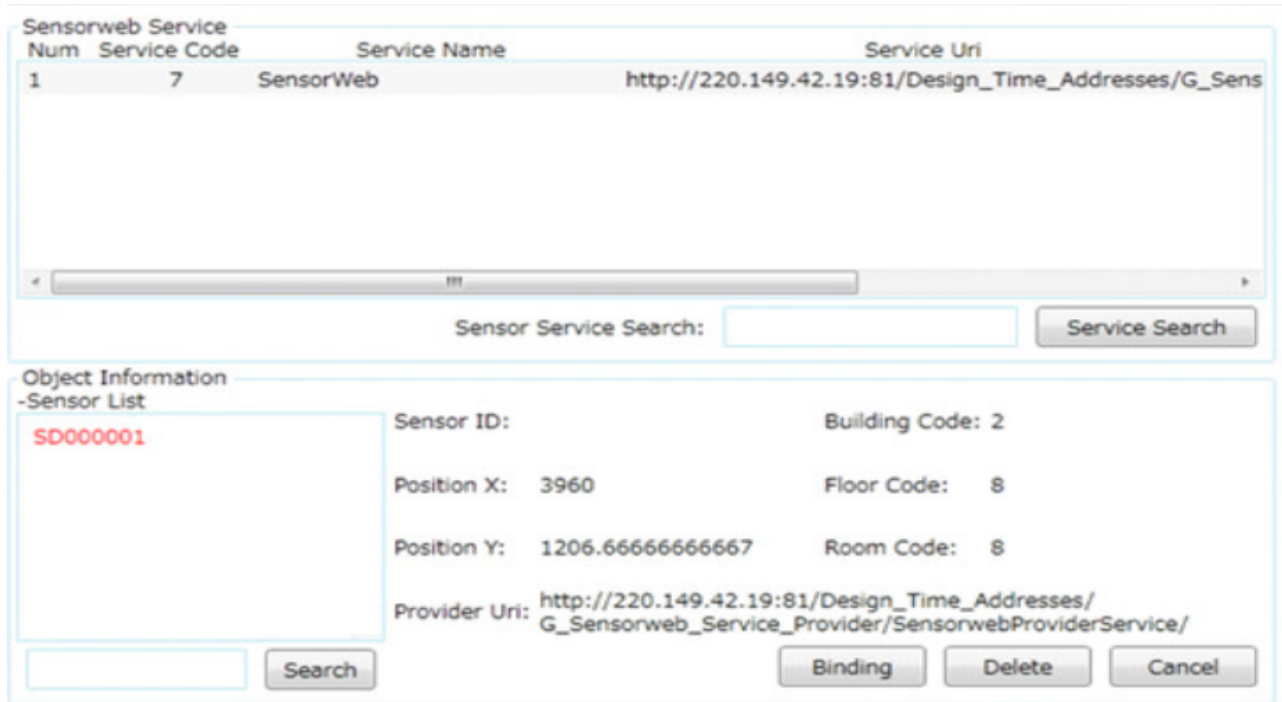


Рисунок 3.19 – Інтерфейс бібліотеки NationalInstrumentsPXI

Щоб перевірити модель на відповідність лабораторним вимірюванням, був побудований прототип металошукача безперервної хвилі з використанням генератора сигналів, платформи з модулем осцилографа, набору котушок (передавача та приймача), системи автоматичного позиціонування та контейнера з перегнійним ґрунтом.

Налаштування що було внесено у датчик представлено у таблиці 3.1 та таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Встановлені характеристики металодетектора

Радіус котушки передавача (м)	0,14
Радіус приймальної котушки (м)	0,06
Частота (ГГц)	357
Амплітуда струму (А)	0,006

Таблиця 3.2 – Встановлені налаштування металодетектора

Висота передавача та приймача (м)	0,02
Радіус котушки передавача (м)	0,1
Радіус приймальної котушки (м)	0,1
Провідність ґрунту (См/м)	0,001
Сприйнятливність ґрунту	0
Глибина сфери (м)	0,1
Радіус сфери (м)	0,005
Сферна провідність (См/м)	$3,54 \times 10^7$
Відносна проникність сфери	1
Продукт $NtNrI$	1

Цей набір налаштувань дозволяє вимірювати величину індукованої напруги в котушці приймача передавачем (V_{air}), ґрунтом (V_{soil}) і заглибленим об'єктом (V_{target}).

Функціонал програмного забезпечення дозволяє нам розробити алгоритм поведінки мобільного робота на території сканування (рисунок 3.20).

Тепер на згенерованій ділянці можна почати симуляцію пошуку ВВП.

У роботі розглянуто робот для пошуку ВВП, який складався із незалежної системи кермового управління з чотирма колесами, системи геодатчиків, та навігаційної системи.

Навігаційна система буде траєкторію, розділяючи робочу зону на смуги. У випадку знаходження ВВП у певній робочій смузі, навігаційна система перебудовує траєкторію таким чином, щоб відстань між новою смугою та попередньою складала не менше ніж 5 м. Схема руху РКВП зображена на рисунку 3.21.

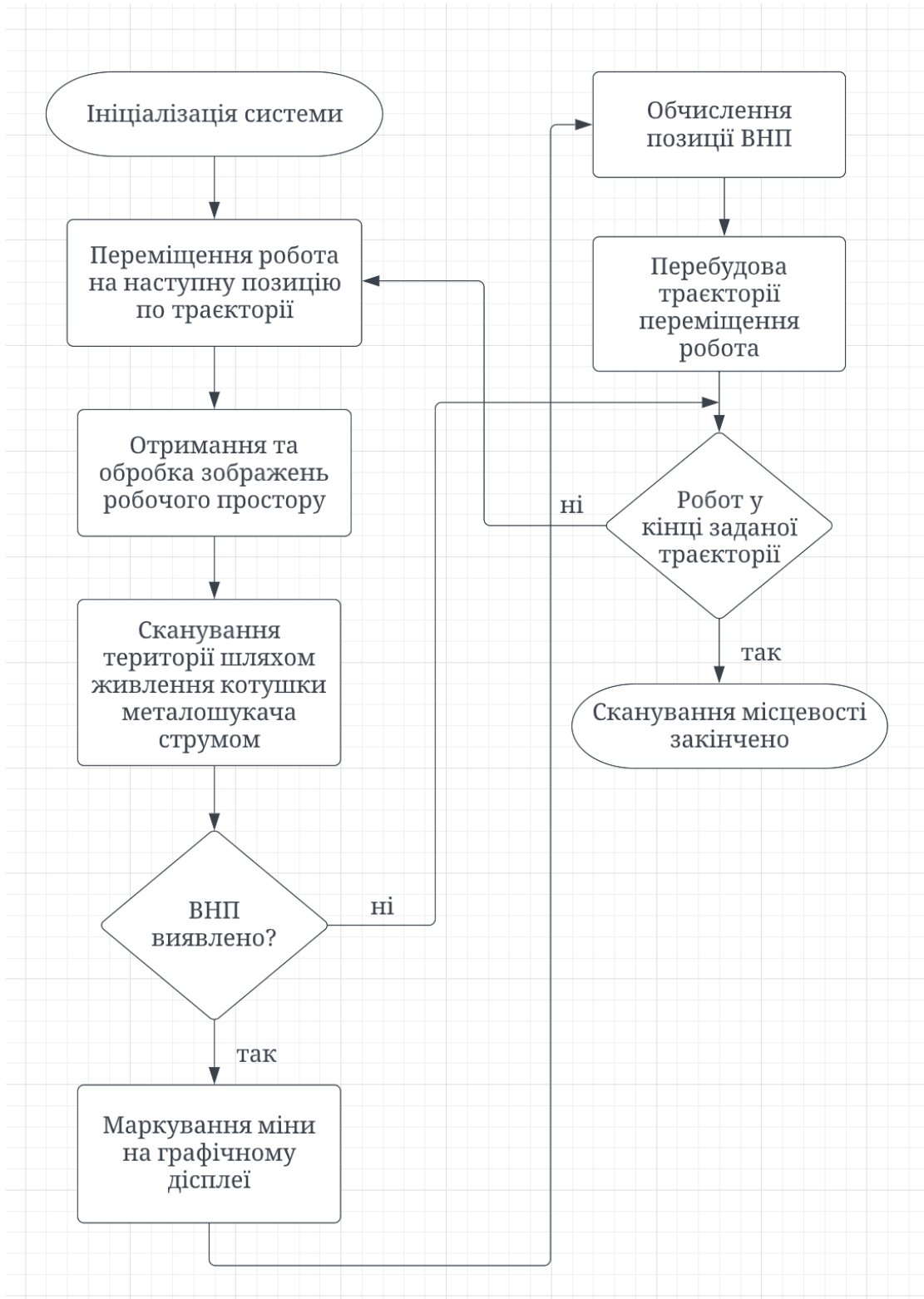


Рисунок 3.20 – Алгоритм роботи робота з металодіагностичним шукачем

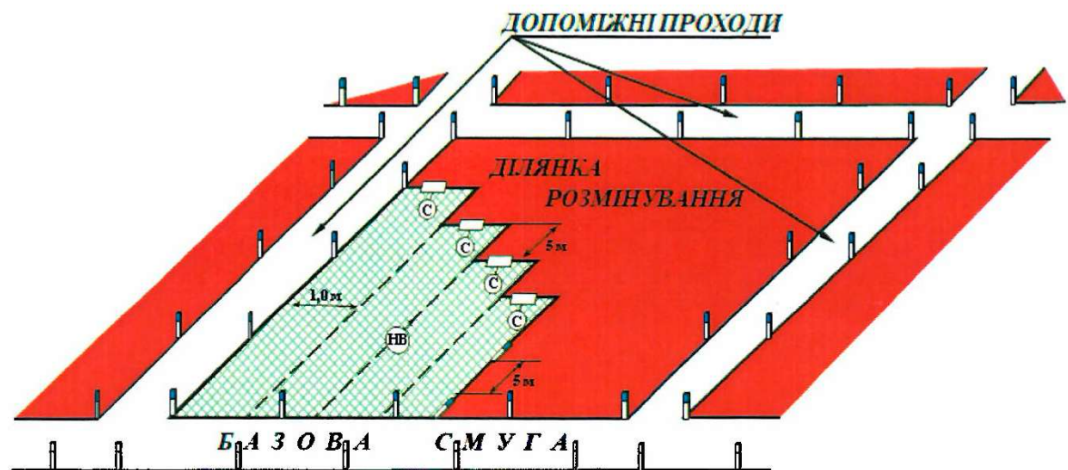


Рисунок 3.21 – Схема руху РКВП, під час проведення гуманітарного розмінування

Робочий процес роботи виглядає наступним чином: робот автоматично переміщується по траєкторії, заданій навігаційною системою, а металодетектор, встановлена на механічній руці, починає визначати, чи є в робочій зоні ВНП, за алгоритмом, що описано у частині 3.2. Як тільки ВНП виявлено, робот припиняє рух, а потім навігаційна система додатково визначає просторове розташування ВНП та відображає його на графічний інтерфейс, що показано на рисунку 3.22.



Рисунок 3.22 – Графічний інтерфейс знаходження ВНП

Після цього навігаційна система змінює траєкторію та починає виконувати алгоритм роботи знову, поки не дійде до кінцевої точки.

Головні показники що отримано надходять з датчика металодетектора, оскільки графічний інтерфейс програми не дозволяє нам наочно провести необхідні розрахунки та порівняння, для кращого відображення буде побудовано графіки основані на роботі геодатчика РКВП, використовуючі отримані данні.

Будуємо графіки показників напруги. Вона, індукована безпосередньо передавачем петлі в рецепторі (V_{air}), набагато вища, ніж напруга, індукована закопаним об'єктом, і, таким чином, V_{total} еквівалентний V_{air} . Тому зміни фази або величини через захований об'єкт непомітні. Через це необхідно розпізнавати та видаляти значення V_{air} під час проектування роботи металошукача.

Видалення V_{air} дає $V_{total} = V_{soil} + V_{target}$, отримана крива V_{total} показана на рисунку 3.23.

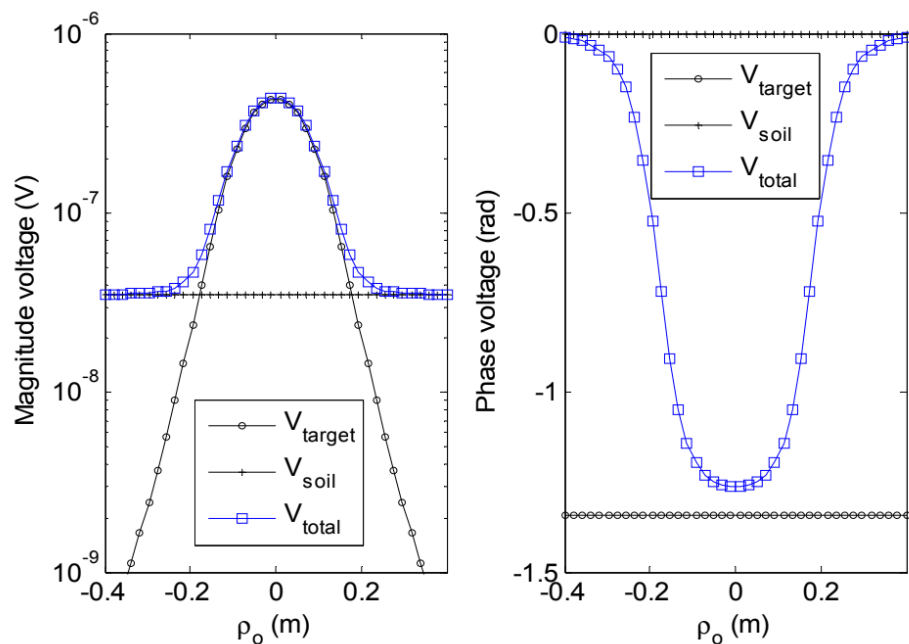


Рисунок 3.23 – Відстань від осі петлі проти індукованої напруги

3.4.1 Вплив зміни властивостей детектора

На рисунку 3.24 показано поведінку індукованої напруги як функції частоти. З графіка величини на рисунку 3.24 видно, що частота не впливає на різницю між V_{soil} і V_{total} , отже, якщо детектор вимірює лише величину напруги для виявлення цілі, прихований об'єкт має таку ж можливість бути виявленим на будь-якій частоті. Однак фаза значною мірою залежить від частоти, і зі збільшенням частоти різниця між V_{soil} і V_{total} також збільшується, поки частота не дорівнює приблизно 50 кГц. На більш високих частотах різниця стає постійною.

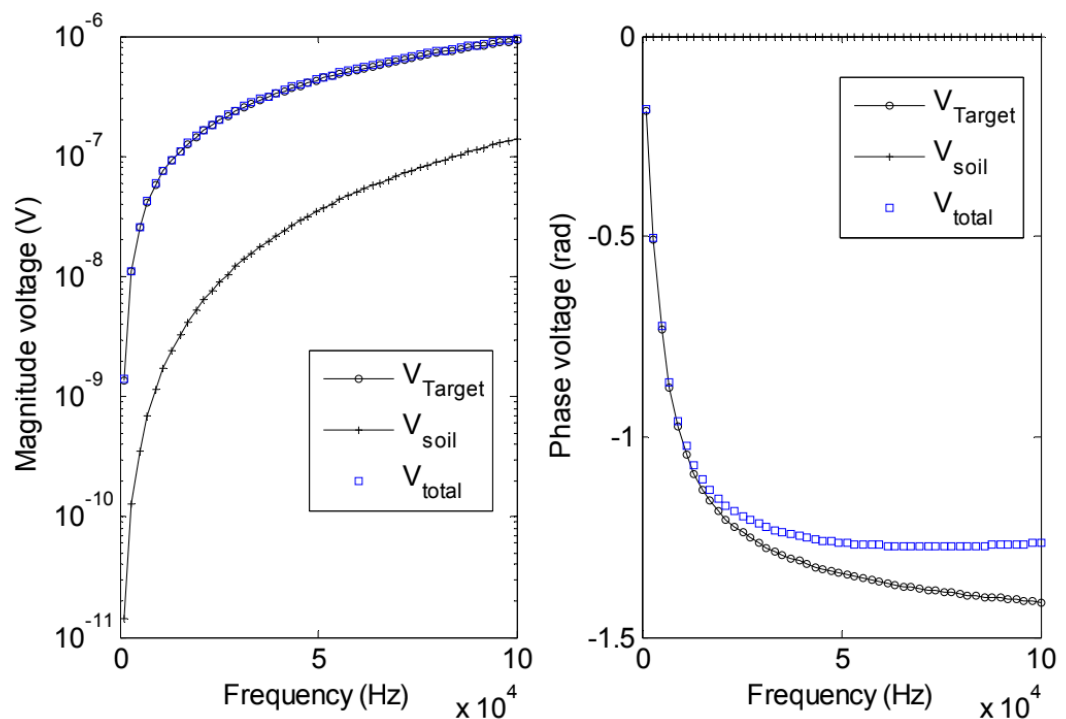


Рисунок 3.24 – Частота проти індукованої напруги

На рисунку 3.24 і рисунку 3.25 показано індуковану напругу як функцію радіуса котушок передавача і приймача відповідно, показуючи, що величини V_{soil} і V_{target} залежать від розміру обох котушок.

Найкраща ймовірність виявлення досягається, коли різниця між V_{target} і V_{soil} є максимальною. У цьому випадку найкраща ймовірність виявлення досягається з радіусом котушки передавача приблизно 7 см. Коли радіус котушки передавача перевищує 50 см, V_{soil} переважає над V_{target} , тому закопаний об'єкт неможливо помітити. Що стосується фази індукованої напруги, то зрозуміло, що фаза V_{target} переважає над фазою V_{soil} , коли радіус котушки передавача менше 10 см. Зі збільшенням радіусу котушки передавача виявлення об'єктів ускладнюється.

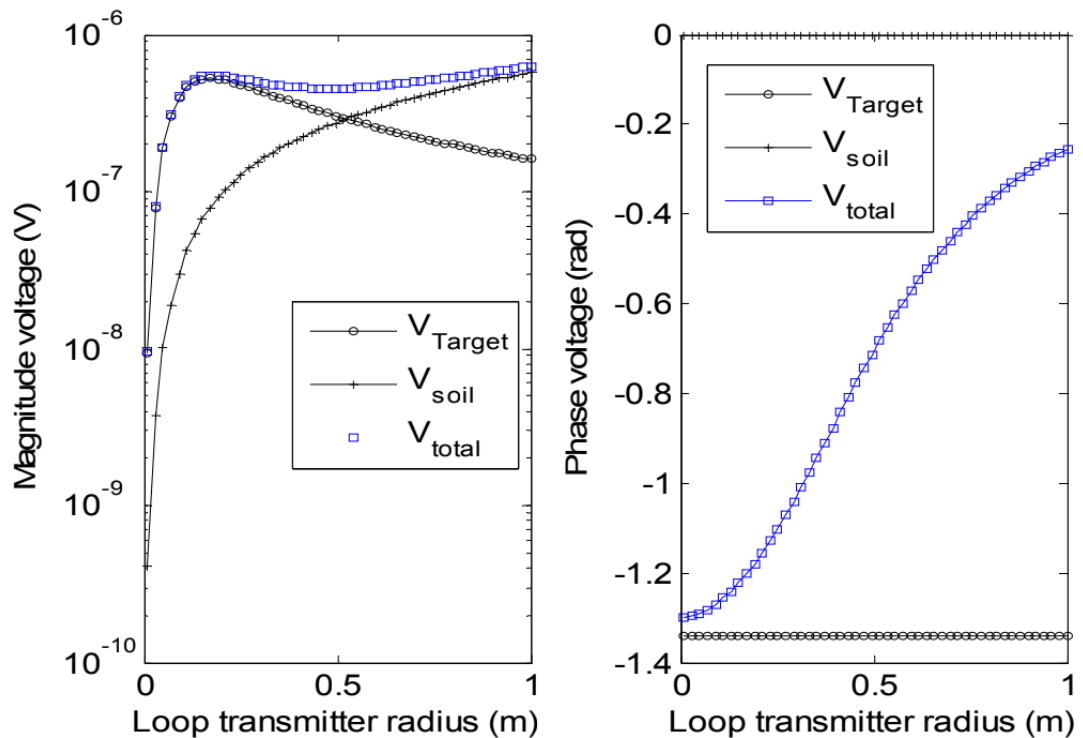


Рисунок 3.25 – Залежність радіуса котушки передавача від індукованої напруги

З огляду на рисунок 3.26 логічно зробити висновок, що аналіз радіуса котушки приймача еквівалентний радіусу передавача.

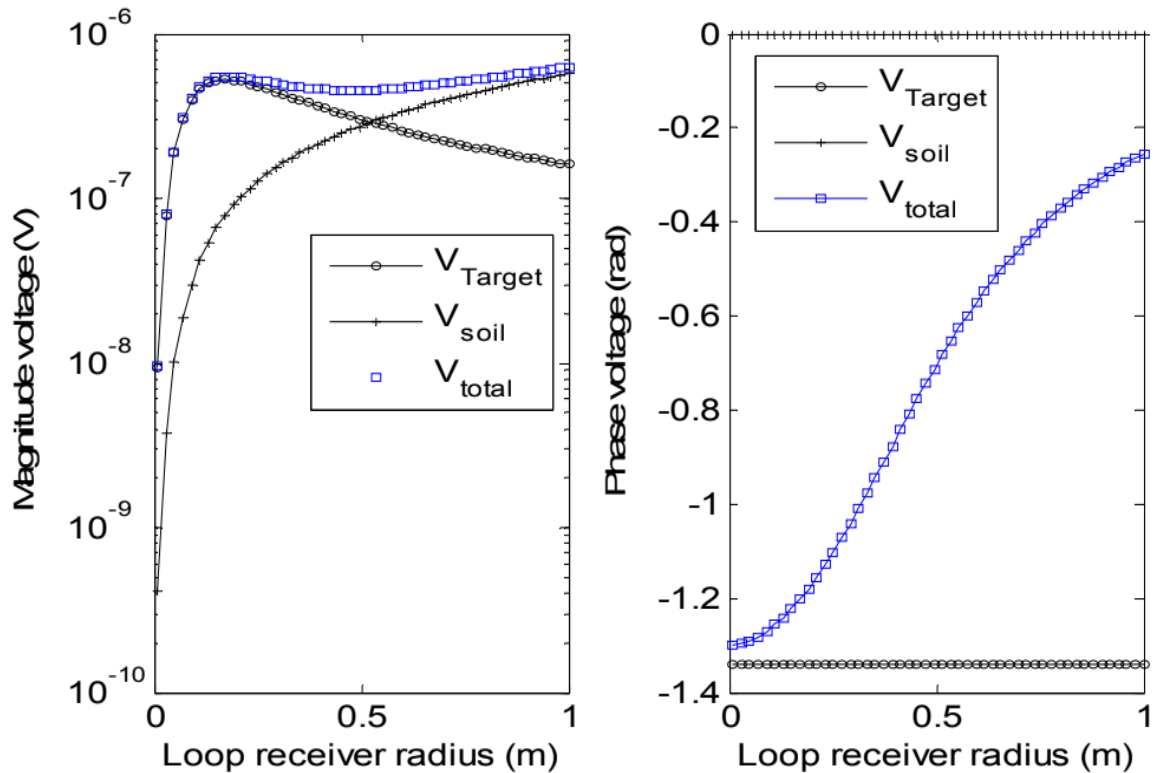


Рисунок 3.26 – Залежність радіуса котушки приймача від індукованої напруги

3.4.2 Вплив зміни властивостей металу

На рисунок 3.27 представлено індуковані напруги як функцію електропровідності заглибленої сфери. Зрозуміло, що зі збільшенням провідності збільшується також величина і зміна фази індукованих напруг. Для металеві сфери з електропровідністю понад 1×10^5 См/м величина V_{target} приблизно в десять разів більша за величину V_{soil} . Для об'єктів з більшою провідністю величина V_{target} істотно не змінюється. Потенційний висновок із цього полягає в тому, що існує насичення, що існує феномен насичення на величину V_{target} , тоді як цільова провідність зростає. Відповідно до цього неможливо розрізнити типи металів шляхом вимірювання величини V_{total} або V_{target} .

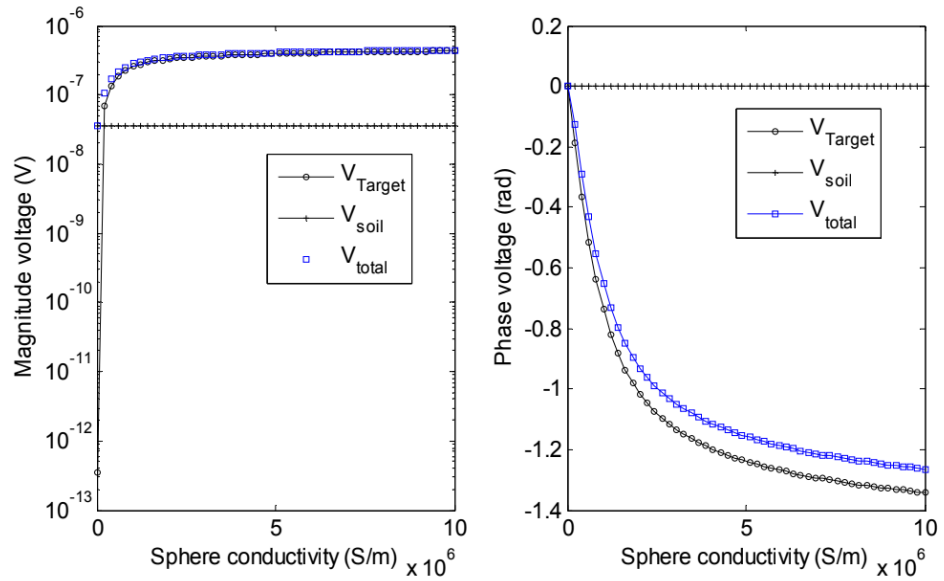


Рисунок 3.27 – Провідність сфери проти індукованої напруги

На рисунок 3.28 представлено індувану напругу як функцію відносної проникності сфери.

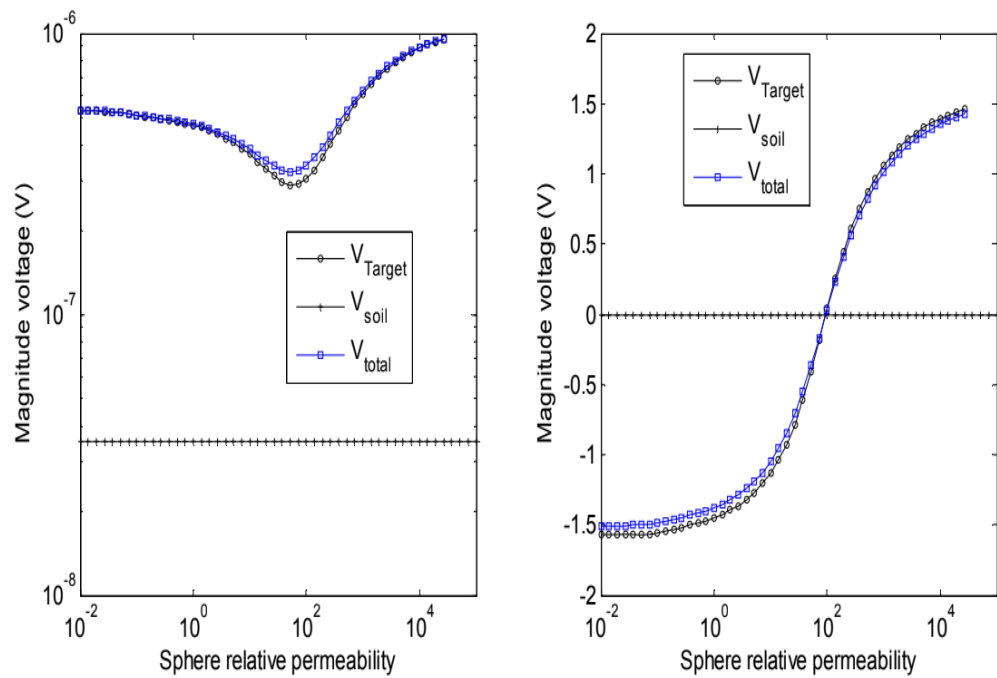


Рисунок 3.28 – Відносна проникність сфери проти індукованої напруги

Ця цифра свідчить про те, що проникність не дуже впливає на величину V_{target} , але дуже впливає на фазу V_{target} . Згідно з фазовим графіком, сфера з відносною проникністю, близькою до 1, індукує форму хвилі напруги, яка відстає від форми хвилі струму. У той час як сфера з відносною проникністю, набагато більшою за 1, індукує напругу, що випереджає струм приблизно на 90° .

На рисунок 3.29 показана залежність індукованих напруг від радіуса сфери. У цьому випадку зрозуміло, що чим більше радіус, тим вище величина напруги, а фазова затримка збільшується, поки не досягне максимального значення -90° .

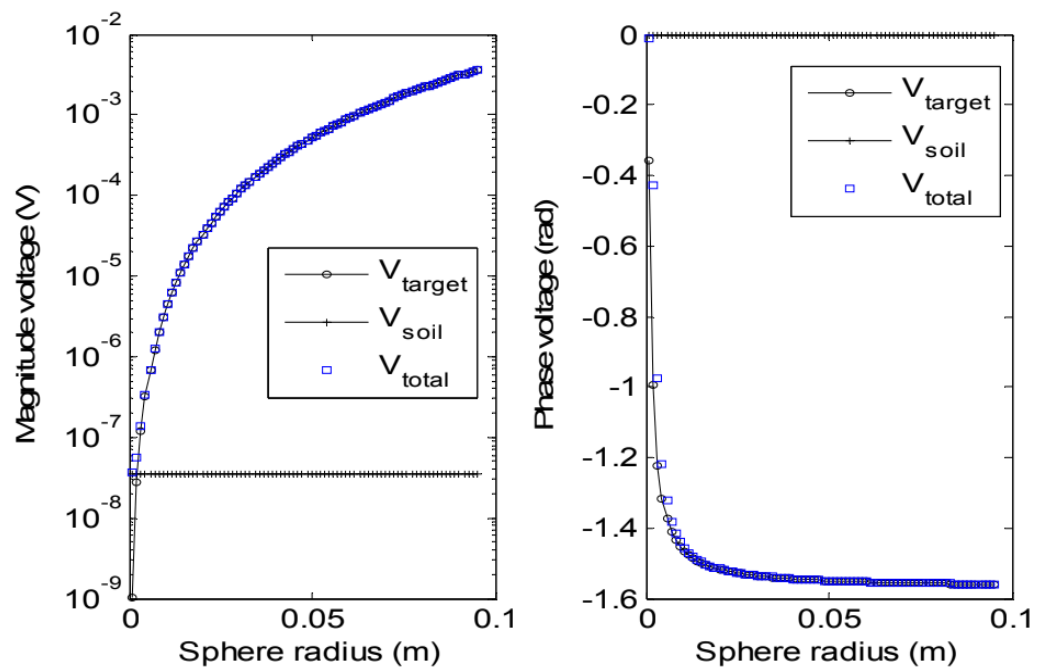


Рисунок 3.29 – Радіус сфери проти індукованої напруги

3.4.3 Вплив варіювання властивостей ґрунту

На рисунку 3.30 показано вплив електропровідності ґрунту на індуковані напруги.

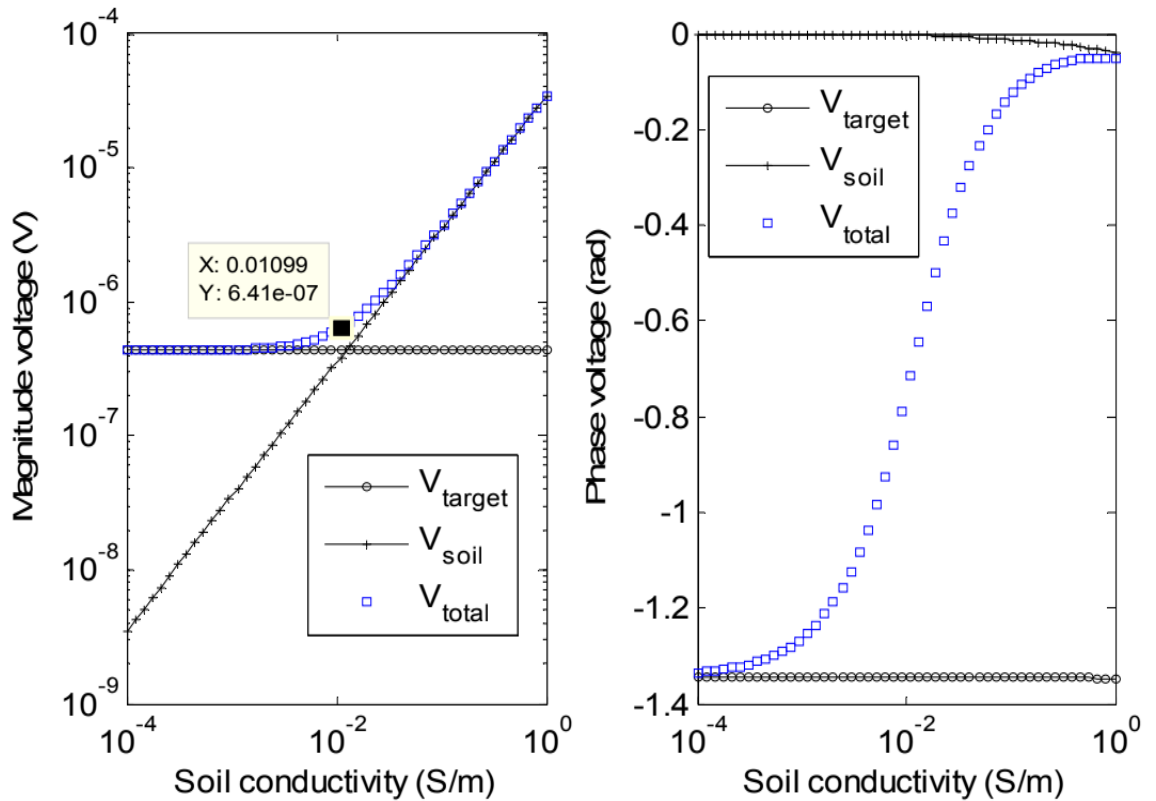


Рисунок 3.30 – Провідність ґрунту проти індукованої напруги

У типовому сценарії розмінування, коли закопаний об'єкт знаходиться на глибині 10 см під поверхнею, висока електропровідність ґрунту може зробити об'єкт неможливим для виявлення під час аналізу величини або фази V_{total} .

У цьому випадку для обох показників (величини та фази) об'єкт неможливо виявити, якщо ґрунт має електропровідність вище 0,01 См/м. Можна також побачити, що величина та фаза V_{target} істотно не змінюються, коли змінюється електропровідність ґрунту.

На рисунку 3.31 показано вплив зміни магнітної сприйнятливості ґрунту на індуковані напруги.

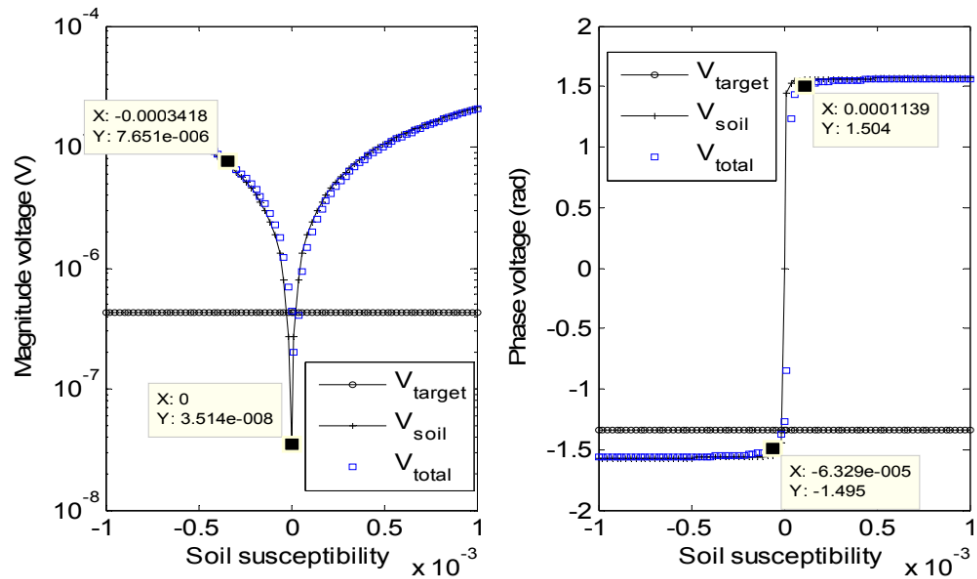


Рисунок 3.31 – Магнітна сприйнятливість ґрунту проти індукованої напруги

Величина V_{soil} є мінімальною, коли магнітна сприйнятливість ґрунту дорівнює нулю, у цьому випадку $|V_{total}| = |V_{target}|$. Однак невеликі зміни в сприйнятливості ґрунту можуть зробити $|V_{total}| = |V_{ґрунт}|$ а закопаний предмет неможливо виявити. У цьому конкретному випадку ціль неможливо виявити, якщо сприйнятливість ґрунту менша за -1×10^{-5} або вища за 4×10^{-5} . Аналогічно для фази, і тільки коли сприйнятливість дуже близька до нуля, фаза V_{target} переважає над фазою V_{soil} .

У цьому конкретному випадку, якщо сприйнятливість ґрунту більша ніж 1×10^{-4} або менша ніж -6×10^{-5} , фаза V_{total} дорівнює фазі V_{soil} і заховану ціль неможливо виявити.

3.5 Висновки до третього розділу

Результати чисельної моделі підтверджено даними отриманими завдяки програмній реалізації РКВП з металодетектором, який дозволяє вимірювати

величину індукованої напруги. Результати добре збігаються, тому цю модель можна застосувати до сценаріїв виявлення мін, коли міни містять високий вміст металу, як-от осколки.

Представлена аналітична модель є менш гнучкою, ніж чисельні методи, тим не менш, це цінний інструмент для спостереження за принципом роботи металодетекторів і швидкого отримання результатів.

Таким чином, напруга, індукована безпосередньо передавачем петлі в рецепторі, зазвичай вища, ніж напруга, індукована закопаним об'єктом, зміни фази і величини напруги в присутності металу незначні. Дуже важливо видалити це значення, використовуючи електронні методи або програмне забезпечення.

Коли металошукач з концентричними петлями знаходиться безпосередньо над закопаним об'єктом, він отримує максимальну зміну величини та фази індукованої напруги. У типовому сценарії виявлення величина напруги може бути в сто разів вищою, а зміна фази може досягати 90° .

Із збільшенням частоти величина індукованих напруг також зростає. Якщо детектор вимірює лише величину напруги для виявлення цілі, схований об'єкт має однакову ймовірність виявлення на будь-якій частоті. Однак фаза значною мірою залежить від частоти. Максимальна величина наведеної напруги заглибленим об'єктом залежить від розміру шлейфів передавача та приймача. Зі збільшенням радіусу котушки передавача або приймача виявлення мін ускладнюється. Величина і фаза індукованої напруги невеликим заглибленим об'єктом не змінюються суттєво при зміні електропровідності ґрунту. Не вважається можливим розрізнити тип металу за допомогою металодетектора, який вимірює величину напруги, коли проникність металу еквівалентна. Ґрунт із високою електропровідністю може зробити об'єкт неможливим для виявлення під час аналізу величини або фази V_{total} .

Невеликі зміни в магнітній сприйнятливості ґрунту значно впливають на продуктивність детектора, який може генерувати помилкові тривоги, якщо вимірюється величина індукованої напруги, або об'єкт неможливо виявити під час вимірювання фази.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Правила безпеки під час проведення гуманітарного розмінування

Безпека на ділянках розмінування (контролю якості розмінування), забезпечення безпечних умов праці досягається органами та підрозділами ЦЗ за допомогою складання схем і розміток ділянок розмінування (контролю якості розмінування) шляхом огороження та маркування небезпечних зон, контролю переміщень фахівців з розмінування (контролю якості розмінування), відвідувачів і громадян, установленням і дотриманням робочих відстаней, а також ефективним медичним забезпеченням і заходами аварійної евакуації.

Схема ділянки розмінування (контролю якості розмінування) повинна проектуватися таким чином, щоб [33]:

- забезпечувалося чітке візуальне відокремлення небезпечних зон (включаючи небезпечні зони підірваних робіт), очищених/розмінованих територій та службові ділянки (безпечні зони);
- дотримувалися встановлених робочих відстаней між окремими фахівцями з розмінування, машинами розмінування та мінно-розшуковими собаками (далі – МРС) й іншим персоналом на ділянках розмінування;
- контролювався рух відвідувачів та персоналу на ділянках розмінування (включаючи представників громадськості) на робочих місцях;
- контролювався рух машини для розмінування та інших транспортних засобів;
- дотримувались обмеження кількості відвідувачів та персоналу на ділянках розмінування, що встановлені для небезпечних зон;

– забезпечувався весь комплекс застережних заходів з метою виключення перебування персоналу на ділянці розмінування, відвідувачів та представників місцевого населення в небезпечних зонах підривних робіт під час контрольованого знищення мін і вибухонебезпечних залишків війни (далі – ВЗВ), або ж надання належного захисту всередині будівель, бункерів, або спеціальних мобільних конструкцій;

– здійснювалися заходи з попередження негативного впливу на довкілля та структурних руйнувань.

Небезпечна зона – це зона конкретної небезпеки, в якій фрагменти вибуху очікуваного джерела небезпеки можуть завдавати шкоди здоров'ю. Безпечні та небезпечні зони в межах робочих місць повинні бути розділені чітким та постійним маркуванням відповідно до вимог стандартної оперативної процедури 08.40/ДСНС «Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту маркування територій, забруднених вибухонебезпечними предметами», затвердженої наказом ДСНС від 31.05.2017 № 298. У межах робочих місць під час проведення розмінування найбільший ризик загрожує фахівцям з розмінування, які виконують очищення і, за необхідності, найбільше наближаються до джерела небезпеки.

Для інших, що перебувають на робочих місцях, ризики мінімальні і є вторинними. З метою зниження ризику травмування інших осіб на робочому місці до припустимого рівня органи та підрозділи ЦЗ, що займаються розмінуванням, повинні встановити відповідні значення робочих відстаней між окремими фахівцями з розмінування, машинами розмінування або МРС й іншим персоналом ділянки розмінування. Робочу відстань розмінування інколи також називають безпечною відстанню, яка повинна встановлюватися на підставі деталізованої та документальної оцінки ризиків з урахуванням небезпек, пов'язаних із особливостями конкретного місця, топографії цього місця та захисту персоналу спеціальним обладнанням. Всі оцінки ризиків мають постійно оновлюватися відповідно до змін ситуації. Чим далі буде

просуватися розмінування на конкретній ділянці, тим більше буде змінюватись інформація, на основі якої виконувалась перша оцінка ризиків. Тому для урахування цих змін необхідно на регулярній основі оновлювати оцінку ризиків. Оцінка ризиків для визначення робочих відстаней відомих мін та ВЗВ включає оцінку ймовірності ненавмисної детонації та тяжких травм при цьому [33].

Ймовірність ненавмисної детонації мін або ВЗВ залежить від їх стану, ділянки розмінування, інструментів та заходів розмінування. Клімат, погода та можливі хвороби особового складу на робочому місці також можуть збільшувати ймовірність дискомфорту, поганого самопочуття або просто втоми фахівців з розмінування. Це додатково збільшує ризик ненавмисної детонації.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі було розглянуто правила безпеки під час проведення гуманітарного розмінування із застосуванням роботехнічних засобів військового призначення.

Наведено план та структуру проектування ділянки гуманітарного розмінування, поняття небезпечних та безпечних зон під час проведення гуманітарного розмінування.

Зазначено що для зменшення ризику травмування осіб чи ненавмисної детонації вибухонебезпечних предметів – є необхідність встановлення відповідних значень робочих відстаней між окремими фахівцями з розмінування, РКВП та іншим персоналом ділянки розмінування.

ВИСНОВКИ

Таким чином у ході виконання магістерської роботи було проведено збір інформації шляхом аналізу сучасного стану системи гуманітарного розмінування, де було розглянуто саму систему проведення гуманітарного розмінування у наш час, класифікацію ВНП та методи їх пошуку.

Наведено існуючу проблемну галузь та встановлено, що на даний момент існує стійка потреба у спільній моделі системи проведення розмінування із використанням роботехнічних комплексів військового призначення. Це довело важливість подальшого розвитку системи гуманітарного розмінування, шляхом впровадження моделі системи із використанням роботехнічних засобів.

Було проведено порівняльний аналіз засобів пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів з метою визначення найкращого та найефективнішого способу. Результатом аналізу було виявлено, що найкращим поєднанням технологій та методів для виявлення ВНП є подвійний датчик, що являє собою георадар у супроводі металошукача. У порівняльному аналізі методів та технологій пошуку ВНП було встановлено, що потенціал металошукачів не використано повністю. Це пов'язано з відсутністю строгих інструментів тривимірного електромагнітного моделювання для цього типу систем і низьким рівнем розповсюдження результатів досліджень виробниками датчиків.

У результаті розглянутих технологій, засобів, систем розмінування та методів, покладених в основу гуманітарного розмінування, було зроблено розглянуто позитивні аспекти та недоліки існуючих систем у наш час, наведено актуальність моделювання нового роботехнічного засобу для пошуку ВНП із застосуванням роботехнічних засобів.

Завдяки проведеному аналізу було розроблено модель процесу гуманітарного розмінування із використанням РКВП з геодатчиком, що може здійснювати пошук (не тільки на поверхні ґрунту, але і на певній глибині), ідентифікацію та прийняття рішення щодо мін та ВНП. У роботі представлено програмну реалізацію, що використовує власний алгоритм роботи РКВП на основі існуючих технічних рішень разом із зробленими у процесі дослідження розрахунками, налаштуваннями та моделлю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 30 с.
2. Методичні вказівки до підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та роботехнічні системи» / упоряд. : І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, В.В. Безкоровайний, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 55 с.
3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: довід. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. К.: Київ-56, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. 320 с.
4. Положення про протидію академічному плагиату в ХНУРЕ / nure.ua. URL: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennjaproakademichnu-dobrochesnist.pdf (дата звернення : 16.10.2022).
5. Янушкевич Д. А., Бондаренко А. О. Моделювання процесу гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів / Д. А. Янушкевич, А. О. Бондаренко // Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2022. Харків, ХНУРЕ, 2022. С. 54-58.
6. Янушкевич Д., Бондаренко А. Розроблення засобів формування баз даних про вибухонебезпечні предмети, методи їх пошуку та ідентифікації / Д. Янушкевич, А. Бондаренко // Виробництво & Мехатронні Системи 2022 // Матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2022 р. Харків: ХНУРЕ, [електронний друк]. 2022. С. 43-48.

7. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. 332 с.
8. Oleksandr Tsymbal, Artem Bronnikov, Paolo Mercorelli. Decision-making models for Robotic Warehouse // Proceedings of 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Virtual Meeting, June 24-26, P. 546-551.
9. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ. 2019. 366 с.
10. Основи роботехнічного будування: навчальний посібник / Ю. Г. Козак, О. А. Єрмакова, Т. Спорек та інші. Київ-Катовіце, Центр учбової літератури, 2016, 325 с.
11. Невлюдов І. Ш., Янушкевич Д. А., Іванов Л. С. (2021) Збірник матеріалів III форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2021. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-modelb/specifications> (дата звернення : 16.10.2022).
12. Струтинський В. Б., Юрчишин О. Я. , Кравець О. М. (2021). Розвиток основних положень проектування маніпуляторів мобільних роботів спеціального призначення адаптованих для роботи з небезпечними об'єктами. Матеріали ХХІІ міжнародної НТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, С. 129–131.
13. Kasban H., Zahran O., Sayed M. Elaraby, M. El-Kordy, F. E. Abd El-Samie. (2010). A Comparative Study of Landmine Detection Techniques. An International Journal Sensing and Imaging volume 11, P. 89–112.

14. Кобець М.В., Хахановський В.Г. Боротьба з проявами тероризму, що пов'язані з використанням вибухових речовин: Навч.-метод. посібник. К.: НАВСУ, 2000, 72 с.

15. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021, 55 с.

16. Дрон для розмінування. URL: <https://euromag.biz/ua/p1651722039-dron-dlya-razminirovaniya.html> (дата звернення: 09.12.2022).

17. Дослідження можливостей виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою безпілотних авіаційних комплексів: звіт про науково-дослідну роботу. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки; наук. керівник: В.Г.Башинський; відп. викон.: В.А. Журахов Чернігів: ДНДІ ВС ОВТ, 2020, 101 с.

18. Скворцов Л.А. Дистанційне виявлення вибухових речовин за допомогою методів активного формування спектральних відображень // Квантова електроніка: електр. наук. спец. видання. 2011. Т.41. Вип. 12, С. 1051–1060.

19. Донец В.В. Особливості використання датчиків випромінювання у бортових гіперспектрометрах / В.В. Донец, Л.И. Муравський // Космічна наука і технологія. Київ: НАНУ, 2012. Т.18. Вип. 3. С. 20–37.

20. The Military Balance 2021. The International Institute for Strategic Studies/Arundel House, 6 Temple Place, London, WC2R 2 PG, UK, P. 78-99.

21. Офіційний сайт ЗАО «Автомеханіка»: 2021. URL: [https://
https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/](https://https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/)
(дата звернення : 16.10.2022).
22. Посібник під спільною редакцією Веремеева Ю.Г. «Сапер». 2022. URL: [https://
https:// http://saper.isnet.ua](https://https://http://saper.isnet.ua) (дата звернення : 16.10.2022).
23. Jane's Mines and Mine Clearance 1999– 2000 (Editor of Jane's Mines and Mine Clearance at Jane's Information Group Colin King). URL: <https://thedigital.gov.ua/news/mintsifra-ta-amazon-aws-spivpratsyuvatimut-dlyapriskorennya-rozvitku-khmarnikh-tekhnologiy> (дата звернення : 16.11.2022).
24. L. Xi, W. Bo-Liang, H. Zao, Z. Ning ning. Numerical Simulation of Thermobaric Explosive Explosion in Free Field // Applied Mechanics and Materials. Vols 687–691. P. 696–700.
25. Дрон для розмінування. URL: <https://euromag.biz/ua/p1651722039-dron-dlya-razminirovaniya.html> (дата звернення: 09.12.2022).
26. Сирямкін В.І. Інтелектуальні робототехнічні та мехатронні системи. Київ, 2017, 256 с.
27. Code Bullet. A.I. Learns to FLY // YouTube. 2020. URL: [https://
www.youtube.com/watch?v=D5xX6nRWDko](https://www.youtube.com/watch?v=D5xX6nRWDko) (дата звернення: 09.12.2022).
28. Mostafa Ghoniema, Taher Awadb, Ossama Mokhiamar. Control of a new lowcost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks // ScienceDirect. Alexandria Engineering Journal. 2020. Жовтень. URL: [https://
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820303380](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820303380) (дата звернення: 10.12.2022).
29. Дрон для розмінування. URL: <https://euromag.biz/ua/p1651722039-dron-dlya-razminirovaniya.html> (дата звернення: 09.12.2022).
30. Lino Marques, Aníbal T. de Almeida, M. Rachkov, «Control System of a Demining Robot», Portugal, 2014, 11 p.
31. Симулятор роботів. URL: <https://unity.com/ua/solutions/automotive-transportation-manufacturing/robotics> (дата звернення: 10.12.2022).

32. Як створити робота: огляд сучасних технологій. URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/how-to-create-robots.html> (дата звернення: 10.12.2022).

33. ДСТУ-П 8820:2018. Інформація та документація. Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) району ведення бойових дій. Київ, 2020, 76с.