

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ  
РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ  
(тема)

Виконав студент 2 курсу, групи КТРСм-22-2  
Коноваленко Кирило Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Комп'ютеризовані та  
робототехнічні системи  
(назва)

Керівник проф. каф. КІТАР Олександров Ю.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

20.01.2024

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'K' followed by a horizontal line extending to the right.

Коноваленко К.А.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові \_\_\_\_\_ Коноваленко Кирилу Андрійовичу  
(шифр і назва)

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розроблення програмно-апаратних засобів роботизованої  
платформи для розмінування

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ №1288Ст від 03.11.2023

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 24.01.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Система управління на базі «клієнт-серверної  
архітектури; 3.2 Передача потокового відео не менше 30 Fps;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз  
сучасних технологічних рішень для роботизованих платформ розмінування;  
4.3 Аналіз технічних особливостей роботизованих платформ для  
розмінування; 4.4 Аналіз існуючих рішень та їх порівняння; 4.5 Аналіз  
існуючих методів пошуку вибухонебезпечних об'єктів для роботизованих  
платформ; 4.6 Розробка загальної структурної схеми роботизованої  
платформи для розмінування; 4.7 Обґрунтування та вибір апаратних модулів  
для системи керування; 4.8 Розробка структурної схеми підключення;  
4.9 Розрахунки продуктивності плати; 4.10 Алгоритм управління/алгоритм  
роботи з оператором; 4.11 Розробка узагальненого алгоритму; 4.12 Розробка  
функцій передачі команд від оператора; 4.13 Розробка інтерфейсу керування  
мобільною платформою; 4.14 Проведення експериментального дослідження;  
4.15 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 –12 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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	Аналіз сучасних рішень у галузі розроблення програмно-апаратних засобів для роботизованої платформи для розмінування	2.09.2023-27.09.2023	виконано
2	Розробка загальної структурної схеми	28.09.2023-3.10.2023	виконано
3	Обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування	4.10.2023-15.10.2023	виконано
4	Розробка структурної схеми підключення	16.10.2023-23.10.2023	виконано
5	Розрахунки продуктивності плати	24.10.2023-6.11.2023	виконано
6	Розробка алгоритму управління та алгоритму роботи з оператором	7.11.2023-18.11.2023	виконано
7	Розробка узагальненого алгоритму	19.11.2023-21.11.2023	виконано
8	Розробка функцій передачі команд від оператора	22.11.2023-29.11.2023	виконано
9	Розробка інтерфейсу керування мобільною платформою	30.11.2023-9.12.2023	виконано
10	Проведення експериментальних досліджень	10.12.2023-20.12.2023	виконано
11	Аналіз отриманих результатів	21.12.2023-26.12.2023	виконано

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент \_\_\_\_\_

Коноваленко К.А.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Олександров Ю.М.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 108 с., 7 табл., 21 рис., 4 дод., 41 джерело.

ПЛАТФОРМА РОЗМІНУВАННЯ, ГУМАНІТАРНЕ РОЗМІНУВАННЯ,  
ПОШУК ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ, РОБОТИЗОВАНА  
ПЛАТФОРМА, ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ.

Мета дослідження – розробка програмного забезпечення системи управління мобільного робота для підвищення мобільності управління.

Об’єкт дослідження – процес керування мобільним роботом.

Предмет дослідження – методи, алгоритмічне та програмне забезпечення віддаленого управління мобільним роботом.

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасних технологічних рішень для роботизованих платформ розмінування, проаналізовано технічні особливості роботизованих платформ для розмінування та існуючі рішення, проведено їх порівняння. Проведено аналіз існуючих методів пошуку вибухонебезпечних об’єктів для роботизованих платформ. Після проведеного аналізу було розроблено загальну структурну схему роботизованої платформи, проведено обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування. Розроблено структурну схему підключення та розраховано продуктивність плати. Наступним етапом було розроблено алгоритм управління, алгоритм роботи з оператором та узагальнений алгоритм. Розроблено функції передачі команд від оператора. Далі було розроблено інтерфейс керування мобільною платформою та проведено експериментальні дослідження, проаналізовано отримані результати.

## ABSTRACT

Explanatory note: 108 pages, 7 tables, 21 figures, 4 app, 41 sources.

DEMINING PLATFORM, HUMANITARIAN DEMINING, SEARCH FOR EXPLOSIVE OBJECTS, ROBOTIC PLATFORM, SOFTWARE AND HARDWARE.

The purpose of the study is to develop mobile work management system software to increase management mobility.

The object of research is the process of controlling a mobile robot.

The subject of research is methods, algorithmic and software for remote control of a mobile robot.

In this qualification paper, an analysis of modern technological solutions for robotic demining platforms was carried out, the technical features of robotic demining platforms and existing solutions were analyzed, and their comparison was carried out. An analysis of the existing methods of searching for explosive objects for robotic platforms was carried out. After the analysis, a general structural diagram of the robotic platform was developed, justification and selection of hardware modules for the control system was carried out. A structural diagram of the connection was developed and the performance of the board was calculated. The next stage was the development of a control algorithm, an algorithm for working with an operator, and a generalized algorithm. Functions for transmitting commands from the operator have been developed. Next, the mobile platform control interface was developed and experimental studies were conducted, the obtained results were analyzed.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних рішень у галузі розроблення програмно-апаратних засобів для роботизованої платформи для розмінування .....	12
1.1 Аналіз сучасних технологічних рішень для роботизованих платформ розмінування.....	12
1.2 Аналіз технічних особливостей роботизованих платформ для розмінування.....	16
1.3 Аналіз існуючих рішень та їх порівняння .....	17
1.4 Аналіз існуючих методів пошуку вибухонебезпечних об'єктів для роботизованих платформ.....	20
1.5 Постановка задач дослідження .....	25
2 Розроблення роботизованої платформи для розмінування .....	27
2.1 Розробка загальної структурної схеми роботизованої платформи для розмінування.....	27
2.2 Обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування ....	29
2.3 Розробка структурної схеми підключення .....	38
2.4 Розрахунки часу роботи роботизованої платформи.....	40
2.5 Висновки до 2 розділу .....	42
3 Розробка програми управління роботизованої платформи для розмінування.....	44
3.1 Принцип методу пошуку та управління .....	44
3.2 Алгоритм управління/алгоритм роботи з оператором .....	45
3.3 Розробка узагальненого алгоритму .....	46
3.4 Розробка функцій передачі команд від оператора.....	50
3.5 Висновки до 3 розділу .....	61
4 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.....	62

4.1 Розробка інтерфейсу керування мобільною платформою .....	62
4.2 Проведення експериментального дослідження .....	65
4.3 Охорона праці.....	71
4.4 Висновки до 4 розділу .....	72
Висновки .....	74
Перелік джерел посилань .....	75
Додаток А Лістинг програми в Arduino IDE .....	80
Додаток Б Частина коду веб-сторінки .....	86
Додаток В Апробація результатів наукових досліджень.....	94
Додаток Г Демонстраційний матеріал .....	107

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МН – машинне навчання;

ШІ – штучний інтелект;

CVM – computer vision module;

LCS – local control system;

М – manipulator;

MCD – motor control driver;

MCM – manipulator control module;

MRCS – mobile robot control system;

PMM – power management module;

SM – sensor module;

SLAM – simultaneous localization and mapping;

ToF – структура зрушення світла.

## ВСТУП

В сучасному світі конфліктні зони, природні катастрофи та військові дії залишають за собою небезпечні території, сповнені непередбачуваними ризиками. Залишки вибухових пристроїв та мін стають смертельною загрозою для людей та навколишнього середовища. Розробка програмно-апаратних засобів роботизованої платформи для розмінування вирішує проблему безпеки та допомагає зберегти людське життя.

Не лише роботизована платформа дозволяє уникнути ризиків для людей, але й прискорює процес розмінування, забезпечуючи швидке відновлення постраждалих територій. Застосування цих технологій стає важливим кроком у напрямку глобальної безпеки та відновлення миру в постраждалих регіонах.

Розробка програмно-апаратних засобів для роботизованої платформи розмінування є важливим завданням, що вимагає високих технічних інновацій та глибокого розуміння глобальних викликів. Ці технології не тільки забезпечують безпеку, але й сприяють розвитку гуманітарних ініціатив, спрямованих на відновлення та покращення якості життя в умовах конфліктів та криз.

Мета дослідження – розробка програмного забезпечення системи управління мобільного робота для підвищення мобільності управління.

Об'єкт дослідження – процес керування мобільним роботом.

Предмет дослідження – методи, алгоритмічне та програмне забезпечення віддаленого управління мобільним роботом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні технологічні рішення для роботизованих платформ розмінування;
- проаналізувати технічні особливості роботизованих платформ для

розмінування;

- проаналізувати існуючі рішення та провести їх порівняння;
- проаналізувати існуючі методи пошуку вибухонебезпечних об'єктів

для роботизованих платформ;

– розробити загальну структурну схему роботизованої платформи для розмінування;

– провести обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування;

- розробити структурну схему підключення;

- провести розрахунки продуктивності плати;

- описати принцип методу пошуку та управління;

- розробити алгоритм управління/алгоритм роботи з оператором;

- розробити узагальнений алгоритм;

- розробити функції передачі команд від оператора;

- розробити інтерфейс керування мобільною платформою;

– провести експериментальні дослідження та проаналізувати отримані результати.

Дана кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з магістерського дипломного проекту [2] та методичними вказівками з написання робіт [3]. Результати кваліфікаційної роботи опубліковані в статті, яку можна знайти в гугл академії [4].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ

## 1.1 Аналіз сучасних технологічних рішень для роботизованих платформ розмінування

Однією з ключових технологій у роботизованих платформах для розмінування є системи штучного зору. Вони включають в себе камери, лідари, сонари та інші датчики, які забезпечують роботу з візуальною та просторовою інформацією. Розглядаються передові алгоритми обробки зображень, технології динамічної глибини та навігаційні системи [5].

Системи штучного зору та датчики відіграють критичну роль у функціонуванні роботизованих платформ для розмінування. Вони надають роботам здатність отримувати та обробляти візуальну та просторову інформацію, що є необхідним для визначення оточуючого середовища та прийняття рішень. Основними з найважливіших аспектів цих технологій є:

- різноманітні типи датчиків, такі як камери, що забезпечують візуальну інформацію та є одними з основних компонентів системи зору, розробники можуть використовувати одну або кілька камер для отримання 2D та 3D зображень, лідари, що використовують лазерне випромінювання для вимірювання відстаней та створення точного тривимірного представлення оточення та сонари, що зазвичай використовуються для вимірювання відстаней до об'єктів у водному середовищі;

- алгоритми обробки зображень, наприклад, алгоритми, які визначають різні контури та переходи в яскравості на зображенні, сегментація, розділення зображення на окремі області (сегменти) для подальшого аналізу

чи алгоритми, які дозволяють визначити рух та розташування об'єктів в просторі;

– технології динамічної глибини, такі як стереозор, що має в собі використання двох камер для створення 3D зображення та вимірювання відстаней до об'єктів або структури зрушення світла (ToF) – вимірювання часу, який потрібно світлу пройти від датчика до об'єкта та назад, для визначення відстані;

– навігаційні системи, такі як використання GPS або інших глобальних навігаційних систем для визначення географічного положення чи використання SLAM або інших алгоритмів для визначення положення в межах невідомого середовища.

Системи штучного зору та датчики є фундаментальними компонентами для роботизованих платформ для розмінування, їхнє правильне використання та інтеграція дозволяють роботам надійно та ефективно працювати в небезпечних умовах та допомагають у забезпеченні безпеки операторів та оточуючого середовища [6].

Наступним технологічним рішенням даної сфери є автономні системи навігації. Автономні системи навігації дозволяють роботам ефективно переміщатися в невідомому середовищі, уникати перешкод та долати складні терени. Аналізується використання алгоритмів мапування, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), а також планування шляху. Автономні алгоритми навігації є ключовою складовою в роботах для розмінування, оскільки вони дозволяють роботам незалежно та безперервно переміщатися у важкодоступних умовах та місцях з підвищеним ризиком. Основними аспектами алгоритмів автономного навігування є Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) – це метод, що дозволяє роботам одночасно створювати карту оточуючого середовища та визначати своє поточне положення в цій карті. Це важливий етап для надання роботам свідомості про своє оточення та здатність навігувати в ньому [7]. Алгоритми планування

шляху визначають найоптимальніший маршрут від початкового положення до місця призначення, уникати перешкод та мінувати потенційно небезпечні області. Вони можуть бути основаними на класичних методах або використовувати нейронні мережі для навчання з підсиленням. Алгоритми керування рухом роботів гарантують ефективне виконання запланованих маршрутів та уникнення колізій. Вони враховують фізичні обмеження руху робота, такі як максимальна швидкість, радіуси обороту тощо. Управління прямують та орієнтацією відповідають за правильне вирішення питань орієнтації та руху робота, забезпечуючи його стійке та точне рухання в потрібному напрямку, а системи аварійного управління дозволяють роботам виявляти небезпеку, уникати аварійних ситуацій та приймати необхідні заходи для забезпечення безпеки. Автономні алгоритми навігації мають інтегруватися з системами глобального та локального визначення місцезнаходження (GPS, SLAM) для точного визначення положення робота в просторі [8].

Ще одним технологічним рішенням є впровадження систем штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН), які відіграють ключову роль у розвитку роботизованих платформ для розмінування. Вони надають роботам здатність навчатися, приймати рішення та адаптуватися до непередбачуваних ситуацій. Використання нейронних мереж та алгоритмів МН для розпізнавання об'єктів на зображеннях або відео дозволяє роботам ідентифікувати потенційно небезпечні об'єкти, такі як вибухові пристрої або міни, а також мають здатність аналізувати та розуміти складні сценарії, які включають в себе велику кількість об'єктів та їх взаємодію. Використання алгоритмів ШІ та МН для аналізу великих обсягів даних дозволяє робити вірогідні та точні висновки для вибору найбільш оптимального способу навігації та розмінування. Динамічне пристосування до умов є здатністю робота адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, урахуваючи зміну освітлення, клімату та інших умов. Також, є місце для застосування

аналізу даних та алгоритмів прогнозування для визначення потенційних небезпек та уникнення їх [9].

Інтеграція та сумісність з іншими системами є крайнім каменем успішної функціонування роботизованих платформ для розмінування тісно пов'язані зі здатністю робота взаємодіяти з оточуючим середовищем та іншими технічними засобами. Інтеграція є процесом, який передбачає сполучення різних елементів чи систем в єдину функціональну одиницю. У випадку роботизованих платформ для розмінування це включає в себе об'єднання апаратного та програмного забезпечення, датчиків, систем навігації та управління в єдину систему, що працює відмінно та ефективно.

Забезпечення сумісності, у свою чергу, передбачає можливість робота взаємодіяти з іншими технічними засобами, такими як інші роботи, дрони, системи моніторингу тощо. Це дозволяє створювати командні системи, де кілька роботів можуть спільно працювати над вирішенням загальних завдань, що є критичним в небезпечних умовах розмінування. Важливість інтеграції та сумісності виявляється на кількох рівнях. По-перше, це підвищує загальну ефективність системи. Робот, який може ефективно співпрацювати з іншими технічними засобами та системами, може швидше та точніше виконувати завдання розмінування. Це особливо важливо в ситуаціях, коли потрібно швидко та надійно нейтралізувати небезпечні об'єкти. По-друге, інтеграція та сумісність підвищують рівень безпеки для операторів та навколишнього середовища. Робот, який може ефективно взаємодіяти з іншими системами, може легко обмінюватися даними та інформацією з операторами, що дозволяє оперативно приймати рішення та управляти роботом у реальному часі. Крім того, інтеграція та сумісність дозволяють реалізувати більш амбіційні та складні завдання розмінування. Наприклад, командна група роботів може спільно працювати для швидкого та ефективного очищення великої площі від небезпечних об'єктів [10].

## 1.2 Аналіз технічних особливостей роботизованих платформ для розмінування

Роботизовані платформи для розмінування є важливими технічними засобами для нейтралізації небезпечних об'єктів у небезпечних умовах. Для ефективного функціонування, такі платформи повинні мати ряд технічних особливостей, які дозволяють їм виявляти та нейтралізувати міни та інші вибухові пристрої. У цьому розділі детально проаналізуємо ключові технічні особливості роботизованих платформ для розмінування [11]. У таблиці 1.1 представлено узагальнені технічні особливості роботизованих платформ для розмінування.

Таблиця 1.1 – Технічні особливості роботизованих платформ для розмінування

Технічні особливості	Опис
Датчики та системи спостереження	Камери
	Лідари
	Сонари
	Інфрачервоні датчики
Системи навігації	SLAM
	GPS
	GNSS
	Інерціальні системи навігації
Системи безпеки та аварійного відключення	Детектори вибухів
	Автоматичне вимкнення у разі аварійних ситуацій
Механічна міцність та маневреність	Висока стійкість до вибухів
	Здатність подолати різноманітні перешкоди
Спеціалізоване обладнання для нейтралізації	Маніпулятори для нейтралізації небезпечних об'єктів
Системи енергопостачання	Надійні та ефективні системи живлення

Роботизовані платформи для розмінування вирізняються великою кількістю технічних особливостей, що роблять їх дієздатними та безпечними для використання в небезпечних умовах. Вони оснащені важливими

датчиками та системами спостереження, що надають їм здатність виявляти небезпечні об'єкти. Крім того, роботи володіють системами навігації, які гарантують їх точну орієнтацію та можливість планування оптимальних маршрутів. Системи безпеки та аварійного відключення дозволяють реагувати на негативні ситуації та надати операторам можливість вжити негайних заходів. Крім того, роботи володіють високою міцністю та маневреністю, що робить їх стійкими до впливу вибухів та здатними подолати різноманітні перешкоди. Спеціалізоване обладнання для нейтралізації небезпечних об'єктів дозволяє роботам впливати на потенційно небезпечні ситуації. Не менш важливою є система енергопостачання, що забезпечує надійне живлення для тривалої та надійної роботи в небезпечних умовах. Усі ці технічні особливості роботизованих платформ для розмінування доповнюють одна одну, утворюючи комплексний технічний апарат, спроможний ефективно та безпечно виконувати завдання розмінування [12].

### 1.3 Аналіз існуючих рішень та їх порівняння

Протягом останніх десятиліть було запропоновано та розроблено різноманітні механічні конструкції для роботів та транспортних засобів для процесу виявлення та розмінування. Декілька прикладів цих розробок включають платформу tEODog [13], яка призначена для гуманітарного розмінування, пошуку та порятунку; безпілотні транспортні засоби для розмінування [14], що включають концептуальний дизайн кінцевого ефектора; та роботизовані системи Gryphon-I та Gryphon-II, які мають різні функціональні можливості [15-16]. Крім того, існують інші роботизовані системи та механізми, які використовуються для гуманітарного розмінування, такі як SR Husky, RAMS, SILO6, які відрізняються своєю конструкцією та функціональністю.

Необхідно відзначити, що більшість цих систем мають свої переваги та обмеження, пов'язані з енергоспоживанням, механічною складністю та можливістю роботи в різних умовах. Наприклад, безпілотні наземні транспортні засоби (UGV) можуть виконувати небезпечні місії без загрози для пілота, але деякі з них можуть мати обмежену місцевість. Усі ці розробки відображають різноманітність інженерних рішень для гуманітарного розмінування, які можуть бути використані в різних умовах та завданнях.

Представлені раніше роботи являють собою механічні конструкції з гусеничною або колісною платформою, на якій встановлені або системи виявлення мін, або роботизована рука паралелограмного типу з міношукачем як кінцевим елементом, або тільки системи розмінування. Крім того, існує категорія платформ, похідних від сільськогосподарських транспортних засобів, таких як трактори та екскаватори (або «картоплекопач»). Ці типи платформ для розмінування були адаптовані для гуманітарних місій з розмінування шляхом встановлення деяких систем розмінування перед транспортним засобом. Основними недоліками цих роботів є те, що більшість із них використовують викопне паливо та, неявно, час роботи обмежений, вони мають високе енергоспоживання, вони розроблені для виконання або виявлення мін, що не розірвалися, або операцій з розмінування за допомогою спеціальних механічних структур, більшість з них мають складну механічну конструкцію та великі розміри, деякі роботизовані системи нестабільні та не можуть використовуватися на будь-якій місцевості [17].

Робота над машиною Disarmadillo розпочалася у 2004 році, основна увага була приділена розробці функціональних вимог до системи розмінувальних машин, які мали працювати поруч з розміновувачами. Розробники хотіли, щоб машини допомагали у найважчих аспектах роботи, зокрема в обрізанні рослинності та обробці ґрунту, особливо важкого, зруйнованого за допомогою простого гребінця, що називається важким

гребінцем, згідно з місцевими процедурами, для видалення ґрунту, що приховує міни. На основі цих виявлених фактів була побудована перша версія машини Disarmadillo, яка називалася машиною участі в сільськогосподарській технології (машина ПАТ), в рамках докторської дисертації одного з авторів [18]. Робота над Disarmadillo продовжувалася протягом років та слід зазначити, що Disarmadillo розроблено так, щоб відповідати місцевому контексту, тому компоненти повинні бути придатні для виробництва в невисокотехнологічних майстернях.

У 2021 році проект Disarmadillo+ отримав затвердження, що забезпечило його подальший розвиток завдяки співпраці дослідників Італійського інституту технологій та Snail Aid – технології для розвитку.

Основна ідея за проектом Disarmadillo полягає в адаптації мотоблоків для розмінувальних застосувань. Мотоблоки – це невеликі сільськогосподарські машини, які широко використовуються та комерційно доступні в багатьох країнах, які постраждали від мін. Їх легко транспортувати, оскільки вони малі та легкі, і вони доступні з різними типами двигунів. Найпотужніший (приблизно 14 к.с.) достатньо міцний для використання в різних універсальних завданнях, від обробки ґрунту до обрізання рослинності. На рисунку 1.1 представлено схематичне зображення Disarmadillo+.

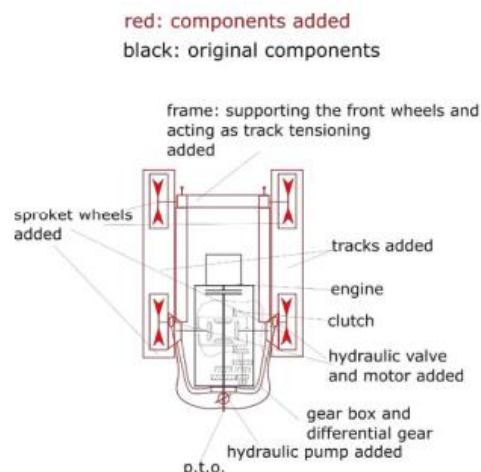


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення Disarmadillo+ [18]

Беручи до уваги зростаючу згоду щодо того, що розмінування слід розглядати як діяльність у сфері розвитку, потрібна швидка зміна поточного підходу. У цій статті узагальнено деякі теми в цій галузі і представлено проект простої модульної машини для допомоги у видаленні мін шляхом обробки ґрунту та обрізання рослинності. Для тракторної одиниці обрано категорію сільськогосподарських машин (мотоблоки), щоб забезпечити повну відповідність місцевому досвіду та звичаям. Основною метою проекту є мінімізація витрат та складності [19].

#### 1.4 Аналіз існуючих методів пошуку вибухонебезпечних об'єктів для роботизованих платформ

Існує кілька методів пошуку вибухонебезпечних предметів за допомогою робототехнічних систем. Деякі з них включають використання рентгенівського випромінювання, теплового зображення, магнітної чутливості, акустичного аналізу та використання лазерних технологій для виявлення небезпечних матеріалів.

Рентгенівське випромінювання використовується для невидимого для ока проникнення через різноманітні матеріали і виявлення їхньої внутрішньої структури. У контексті робототехнічних систем для пошуку вибухонебезпечних предметів, цей метод може бути ефективним для виявлення прихованих об'єктів, які можуть бути використані вибуховими пристроями. Використання рентгенівського випромінювання в робототехнічних системах включає в себе такі основні етапи:

– робот забезпечує випромінювання рентгенівського випромінювання в напрямку об'єкта, який перевіряється. Це випромінювання проникає через різні матеріали, але його поглиблення та розсіювання може змінюватися в залежності від властивостей матеріалів;

– рентгенівське випромінювання проходить через об'єкт, інтеракція з яким призводить до створення рентгенівського зображення. М'які тканини пропускають більше випромінювання, тоді як металеві або щільні матеріали можуть відбивати чи поглиблювати його;

– за допомогою детекторів рентгенівського випромінювання робот отримує інформацію про проходження випромінювання крізь об'єкт. Отримане зображення може бути оброблене для виділення та аналізу потенційно небезпечних областей або предметів;

– рентгенівське зображення дозволяє визначити форму, розмір та структуру внутрішніх елементів об'єкта. Це може допомогти виявити приховані вибухонебезпечні матеріали, конструкції або компоненти.

Наступним методом є теплове зображення – це метод, який використовує інфрачервоне випромінювання для візуалізації та аналізу теплових характеристик об'єктів та оточуючого середовища. У контексті робототехнічних систем, теплове зображення може бути важливим інструментом для виявлення вибухонебезпечних матеріалів або пристроїв, особливо тих, які випромінюють тепло під час своєї активації.

Принцип роботи теплового зображення базується на тому, що всі об'єкти, навіть при кімнатній температурі, випромінюють інфрачервоне випромінювання, яке може бути сприйняте тепловою камерою. Ця камера перетворює різниці в температурі на візуальне зображення, де різні кольори або відтінки відображають відмінності в температурі об'єктів.

У випадку пошуку вибухонебезпечних предметів роботи, обладнані тепловими камерами, можуть виявляти аномалії температур в оточуючому середовищі. Наприклад, під час активації вибухового пристрою або взаємодії з нього може виникнути підвищення температури. Також, теплове зображення може виявити приховані об'єкти або зони, де температура відрізняється від нормальних значень.

Цей метод є особливо корисним в умовах обмеженої видимості, таких як туман, дим чи темрява. Теплові камери також можуть працювати навіть у темряві, що дає можливість роботам працювати в різних умовах та ефективно виявляти потенційно небезпечні об'єкти. Такий підхід допомагає забезпечити безпеку в областях, де існує ризик вибухів або інших загроз [20].

Ще одним із методів виявлення вибухонебезпечних об'єктів є магнітна чутливість, що є одним із методів виявлення вибухонебезпечних матеріалів та об'єктів за допомогою робототехнічних систем. Цей метод базується на використанні магнітних властивостей матеріалів, зокрема металів, які часто використовуються в конструкції вибухових пристроїв. Принцип роботи полягає в тому, що робот оснащується магнітними сенсорами, які реагують на зміни магнітного поля в навколишній області. Виявлення металевих предметів, таких як обшивка або компоненти вибухових пристроїв, здійснюється через зміни у магнітному полі, які вони викликають.

Магнітна чутливість може бути особливо корисною у випадках, коли інші методи, такі як візуальна інспекція чи рентгенівське випромінювання, можуть бути непридатними або обмеженими. Виявлення металевих частин внутрішньої структури об'єктів або на їхній поверхні може свідчити про можливу наявність вибухонебезпечних елементів.

Важливою перевагою магнітного методу є те, що він може бути ефективним навіть у випадках, коли вибухонебезпечні матеріали чи пристрої ретельно приховані чи вбудовані у інші предмети. Робототехнічні системи, обладнані магнітними сенсорами, можуть надійно виявляти металеві компоненти та попереджати про можливі небезпеки, забезпечуючи ефективний рівень безпеки в різних умовах та середовищах.

Акустичний аналіз – це метод виявлення вибухонебезпечних предметів, який використовує звукові характеристики для ідентифікації можливих загроз. У робототехнічних системах, оснащених акустичними сенсорами, цей метод стає ефективним інструментом для виявлення

незвичайних аудіосигналів, що можуть виникати під час активації вибухових пристроїв чи інших небезпечних подій. Принцип роботи полягає в аналізі звукових хвиль, які генеруються навколишніми об'єктами. Робот отримує інформацію від акустичних сенсорів, які реєструють звукові коливання у середовищі. Важливим елементом акустичного аналізу є визначення аномальних або незвичайних звукових шаблонів, які можуть вказувати на наявність вибухонебезпечних подій або матеріалів.

Акустичний аналіз може виявляти різні аспекти, такі як характерні шуми, вибухові характеристики, чи інші аудіосигнали, що можуть бути пов'язані із загрозами безпеці. Також, враховуючи особливості звукових хвиль у різних середовищах, акустичний аналіз може виявляти аномалії, які свідчать про наявність прихованих об'єктів. Цей метод виявляється корисним в умовах обмеженої видимості, туману, диму чи темряви, оскільки звук може проникати через різноманітні перешкоди. Окрім того, акустичний аналіз може допомагати виявляти небезпеку на великій відстані, забезпечуючи раннє попередження перед можливими загрозами.

Враховуючи те, що вибухові пристрої можуть генерувати характерні звукові сигнали, акустичний аналіз визначається як ефективний метод для пошуку та реагування на вибухонебезпечні об'єкти в різних областях застосування, включаючи безпеку на транспорті, в аеропортах чи інших об'єктах з підвищеним рівнем безпеки.

Лазерні технології представляють собою ефективний метод для виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою робототехнічних систем. Цей підхід базується на використанні лазерних променів для сканування поверхні об'єктів та виявлення потенційно небезпечних аномалій або прихованих елементів. Принцип роботи лазерного аналізу полягає в тому, що лазерні промені направляються на поверхню об'єкта, і відбитий від неї світловий сигнал аналізується для визначення характеристик об'єкта. Цей

процес може включати в себе вимірювання відстаней, створення 3D-моделей поверхні та виявлення аномалій у структурі об'єкта.

Лазерні технології можуть бути особливо ефективними для виявлення невидимих загроз або об'єктів, які можуть бути добре приховані. Із високою точністю та можливістю роботи на великій відстані лазерні пристрої можуть надавати роботам можливість проводити детальний аналіз та інспекцію об'єктів, що знаходяться на відстані від них.

Використання лазерних технологій дозволяє роботам виявляти навіть найдрібніші аномалії чи неправильності у структурі об'єкта. Це може включати виявлення прихованих вибухонебезпечних пристроїв, різних видів обшивки або змін у поверхневій структурі, які можуть вказувати на потенційну небезпеку. Лазерні технології також можуть бути використані для відділення деяких матеріалів або для створення віртуальних бар'єрів, які можуть запобігати наближенню робота до певних об'єктів чи зон. Цей метод дозволяє вдосконалити системи безпеки та забезпечити надійний захист у різноманітних сценаріях [21].

Після проведеного аналізу, було виявлено переваги та недоліки кожного з методів, представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз методів

Метод	Переваги	Недоліки
1	2	3
Рентгенівське випромінювання	<ul style="list-style-type: none"> <li>– висока проникливість через різні матеріали;</li> <li>– здатність виявляти приховані об'єкти.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– потребує обладнання рентгенівської трубки та детектора;</li> <li>– вимагає обережного використання через радіаційний ризик.</li> </ul>
Теплове зображення	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ефективно виявляє зміни температури;</li> <li>– діє в темряві та при обмеженій видимості.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обмежена роздільна здатність;</li> <li>– зовнішні фактори, такі як спека чи інші джерела тепла, можуть впливати на точність.</li> </ul>

## Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Магнітна чутливість	– ефективний для виявлення металевих об'єктів; – Здатність працювати в широкому спектрі умов.	– не виявляє не-металеві загрози; – Залежність від магнітних властивостей об'єктів.
Акустичний аналіз	– дозволяє реагувати на аномальні звуки; – Можливість роботи в темряві.	– обмежений радіус виявлення; – звуки можуть бути приглушеними чи прихованими.
Лазерні технології	– висока точність та можливість роботи на великій відстані; – ефективний для виявлення невидимих загроз.	– потребує відносно прямої видимості до об'єкта; – обмежена дія в тумані чи пилу.

## 1.5 Постановка задач дослідження

В ході проведеного аналізу було виявлено, що тема даного дослідження є актуальною.

Метою дослідження є розробка програмного забезпечення системи управління мобільного робота для підвищення мобільності управління. Об'єктом дослідження є процес керування мобільним роботом. Предметом дослідження є методи, алгоритмічне та програмне забезпечення віддаленого управління мобільним роботом. Методами дослідження є алгоритмізація та структурний аналіз даних.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити загальну структурну схему роботизованої платформи для розмінування;
- провести обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування;
- розробити структурну схему підключення;

- провести розрахунки продуктивності плати;
- описати принцип методу пошуку та управління;
- розробити алгоритм управління/алгоритм роботи з оператором;
- розробити узагальнений алгоритм;
- розробити функції передачі команд від оператора;
- розробити інтерфейс керування мобільною платформою;
- провести експериментальні дослідження та проаналізувати отримані результати.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ

### 2.1 Розробка загальної структурної схеми роботизованої платформи для розмінування

Сучасні міни представляють з себе велику загрозу для післявоєнних регіонів, оскільки міни та інші боєприпаси, зазвичай не мають механізму самознищення, і їх життєдіяльність може тривати годами, тому дуже важливо їх знайти і ліквідувати. На сьогодні нараховується близько 2000 видів мін, а також понад 650 моделей протитанкових засобів. Ці засоби поділяються на кілька категорій, зокрема осколкові, вибухові, спрямовані та обмежувальні пристрої [23].

При розробці мобільної муніпуляційної платформи для розмінування слід враховувати такі критичні аспекти [4]:

- розгляд гнучкої механіки та модульної структури;
- використання архітектури керування, побудованої на мобільності;
- інтеграція різноманітних датчиків, включаючи однорідні та гетерогенні, та об'єднання отриманих даних;
- розробка ефективної автономної чи напівавтономної навігації для роботи в динамічних та неструктурованих середовищах;
- планування, координація та співпраця між різними роботами;
- використання бездротових технологій передачі даних та розробка інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу;
- використання віртуальної реальності та реального часу для підтримки планування та логістики;

– імплементація штучного інтелекту та систем прийняття рішень на основі зібраних даних [24].

На основі вказаних вимог вище та з урахуванням проведених досліджень розроблено наступну структурну схему, яка зображена на рисунку 2.1.

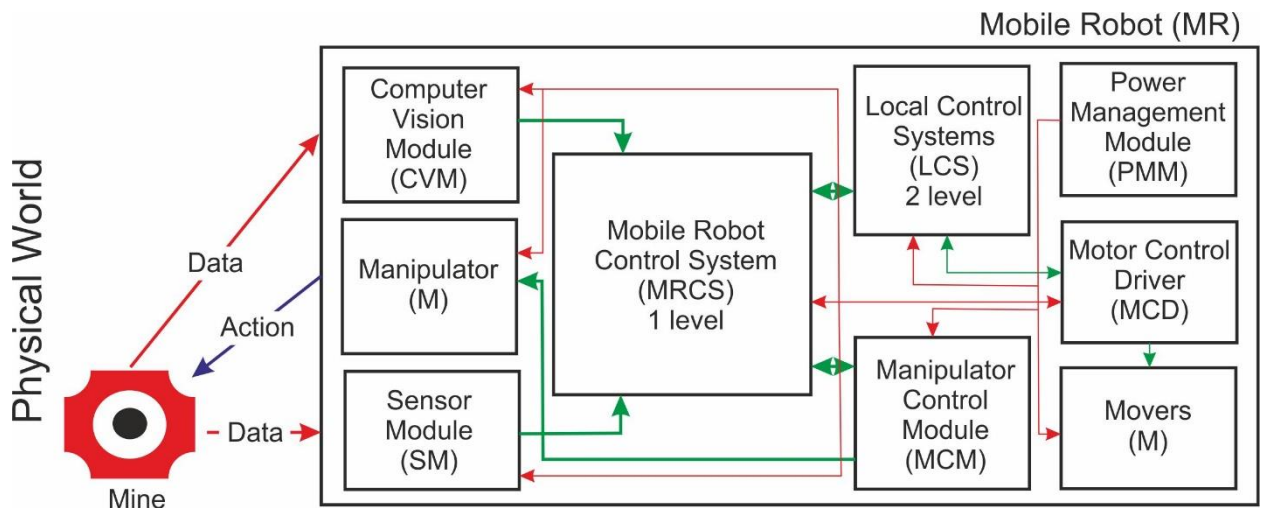


Рисунок 2.1 – Структурна схема мобільної маніпуляційної платформи для розмінування [4]

Розроблена структурна схема мобільної маніпуляційної платформи призначеної для розмінування складається з наступних блоків [4]:

- модуль Mine представляє з себе міну чи інші боєприпаси, які попали в поле зору системи розмінування;
- модуль Computer Vision Module (CVM) – це система комп’ютерного зору, яка відображає навколишнє середовище, для передачі інформації оператору;
- модуль Manipulator (M) – даний модуль має захватний механізм, який взаємодіє з мінно-вибуховими об’єктами;
- модуль Sensor Module (SM) – цей блок встановлених датчиків на платформі розмінування, сюди входить ультразвукові та лазерний далекомір;

- модуль Mobile Robot Control System (MRCS) – це система управління мобільним роботом, яка знаходиться на першому рівні та включає в себе одноплатний комп'ютер з операційною системою. Цей комп'ютер відповідає за обробку та генерацію сигналів керування, а також аналіз відеосигналів з камери та прийняття рішень в разі втрати зв'язку з оператором;
- модуль Local Control System (LCS) – це система управління другого рівня призначена для керування Motor Control Driver (MCD), яка спрямована на зменшення навантаження на MRCS та створення можливості для розробки децентралізованої системи управління;
- модуль Manipulator Control Module (MCM) – це модуль управління маніпулятором, яка знаходиться на другому рівні, та відповідає за управління переміщення ланків;
- модуль Power Management Module (PMM) цей блок складається з модуля управління живленням та акумулятора;
- модуль Motor Control Driver (MCD) – це модуль управління двигуном, з підтримкою PWM сигналів;
- модуль Movers (M) – модуль, який відповідає за двигуни.

## 2.2 Обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування

Наступним кроком при створенні платформи для розмінування є вибір апаратних модулів. Для того щоб дана конструкція відповідала всім необхідним умовам, які дозволять їй працювати максимально ефективно [25].

Відштовхуючись від структурної схеми необхідно обрати наступні компоненти:

- серводвигуни;
- модуль комп'ютерного зору;
- датчики відстані;
- одноплатні комп'ютери для управління всією системою;

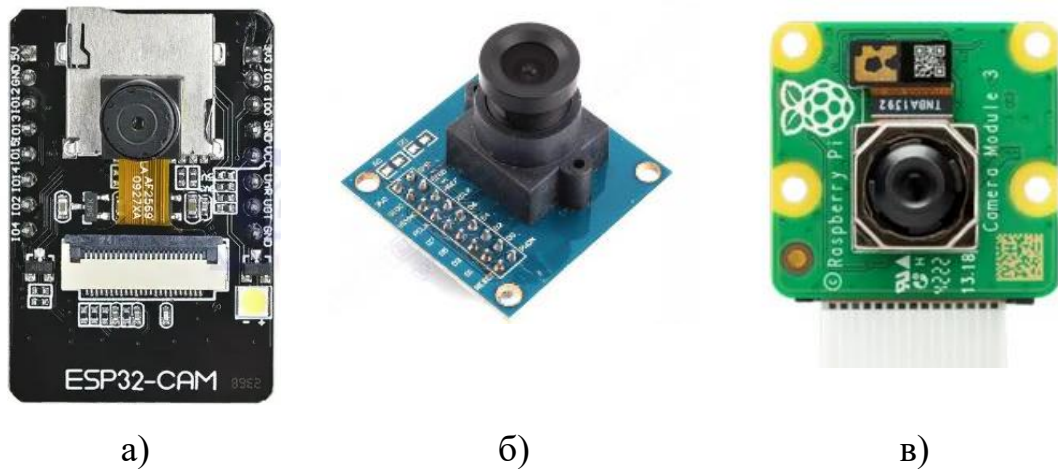
– двигуни.

Розмінування вибухонебезпечних об'єктів є небезпечним для життя людей, які цим займаються, тому розроблювана платформа повинна працювати на відстані. Щоб оператор мав змогу спостерігати за навколишньою середовищем, яке оточує платформу та маніпулювати ним на відстані, необхідно чітко визначитися з СУМ, який буде за це відповідати. В робототехніці застосовують різні системи, які мають, або сам по собі модуль камери, або в поєднанні з мікроконтролером чи одноплатним комп'ютером. В більшості випадків для даних задач використовують: мікроконтролер ESP32-Cam, Raspberry Pi Camera Module, модулі від ArduCam, такі як OV2640, OV9281 чи OV7670, та інші USB-камери [26]. Для вибору модуля комп'ютерного зору був здійснений порівняльний аналіз основних характеристик наступних камер: ESP32-Cam, ArduCam OV7670, камера Raspberry Pi Camera Module 3. Результати аналізу зображені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики камер

Параметр	ESP32-Cam [27]	ArduCam OV7670 [28]	Raspberry Pi Camera Module 3 [29]
Робоче напруження	5 В	3 В – 5 В	3,3 В – 5 В
Роздільна здатність	2 Мп	0,3 Мп	11,9 Мп
Максимальна кількість кадрів	від 5 до 30 fps	до 30 fps	до 90 fps
Кут огляду	120°	24°	75°
Інтерфейс підключення	UART, I2C, SPI, PWM	SCCB	I2C, FFC
Підтримка Wi-Fi/Bluetooth	Є	Ні	Ні
Робоча температура	-40 °С – 50 °С	-40 °С – 70 °С	0 °С – 50 °С
Розмір	40,5 мм x 27 мм x 4,5 мм	35 мм x 35 мм x 31 мм	25 мм x 24 мм x 11,5 мм
Вага	10 г	13 г	5 г
Ціна	330 грн	107 грн	1372 грн

Загальний вигляд камер зображено на рисунку 2.2.



- а) загальний вигляд ESP32-Cam;  
 б) загальний вигляд ArduCam OV7670;  
 в) загальний вигляд Raspberry Pi Camera Module 3

Рисунок 2.2 – Камери ESP32-Cam, ArduCam OV7670, Raspberry Pi Camera Module 3 [27-29]

З отриманих результатів для розроблюваної платформи розмінування було обрано ESP32-Cam через свою доступність, легкість програмування, бездротовий зв'язок та компактний модуль, який об'єднує в собі не лише камеру, а й мікроконтролер ESP32, що забезпечує високу інтегрованість та зменшує кількість компонентів [30].

Платформа для розмінування повинна мати змогу маніпулювати небезпечними об'єктами підіймати їх чи їх певні частини, для цього використовується маніпулятивний захват, який приводиться в дію за допомогою 4 серводвигуна. Перший серводвигун відповідає за роботу кінцевого ефектору, а три інші за основу маніпулятора. Зараз є багато видів серводвигунів, тому для вибору був проведений аналіз серед таких моделей: TowerPro SG90, TowerPro MG90S та PZ-15320.

З результатами аналізу можна ознайомитися в таблиці 2.2, а на рисунку 2.3 зображено загальний вигляд серводвигунів.

Таблиця 2.2 – Аналіз серводвигунів

Параметр	TowerPro SG90 [31]	TowerPro MG90S [32]	PZ-15320 [33]
Модуляція	аналоговий	цифровий	цифровий
Робоча напруга	3,5 В – 5 В	4,8 В – 6 В	2,8 В – 4,2 В
Швидкість	0,12 с/60° (4,8 В)	0,10 с/60° (4,8 В) 0,08 с/60° (6 В)	0,06 с/60° (2,8 В) 0,05 с/60° (3,7 В)
Кут повороту	180°	180°	180°
Обертаючий момент	1,8 кг/см	1,8 кг/см – 2,2 кг/см (4,8 В)	0,06 кг/см (2,8 В) 0,07 кг/см (3,7 В)
Тип передачі	пластик	метал	пластик
Розміри	23 мм x 29 мм x 12 мм	32 мм x 32 мм x 12 мм	14 мм x 6,2 мм x 17,9 мм
Вага	9 г	14 г	4 г



а)



б)



в)

а) серводвигун TowerPro SG90S;

б) серводвигун TowerPro MG90S;

в) серводвигун PZ-15320

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд серводвигун TowerPro SG90, TowerPro MG90S, PZ-15320 [31-33]

Для роботи маніпулятора було вирішено обрати серводвигун TowerPro MG90S. Цей серводвигун має прийнятні силові характеристики для багатьох застосувань, де потрібна невелика сила та точність управління, він компактний, економічний при використанні енергії та доступний в цій категорії.

Для SM необхідно обрати ультразвукові датчики. Ультразвукові датчики використовуються для вимірювання відстані до об'єкта та униканні перешкод під час руху, оскільки більшість вибухонебезпечних об'єктів розташовані в полях чи лісах. Прикріплення датчиків допоможуть мобільній платформі визначати точне положення захоплюючого механізму маніпулятора, який дозволяє точно захоплювати та переміщувати об'єкти.

Ультразвуковий датчик використовує принцип ультразвукової ехолокації для вимірювання відстані. Цей принцип ґрунтується на вимірюванні часу, що пройшов між моментом відправлення ультразвукового сигналу та отриманням його відлуння. Найпопулярнішими ультразвуковими датчиками є: HC-SR04 та US-100, їх порівняльна характеристика представлена у таблиці 2.3.

В розроблюваній платформі необхідно використати чотири ультразвукові датчики, з кожного боку мобільної платформи, для додаткового спостереження за перешкодами.

Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики ультразвукових датчиків

Параметр	HC-SR04 [34]	US-100 [35]
Напруга живлення	5 В	3-5 В
Статичний струм	до 2 мА	до 2 мА
Робочий струм	15 мА	15 мА
Ефективний кут	15°	15°
Діапазон виміру відстані	2 см – 450 см	2 см – 500 см
Максимальна точність датчика	0,3 см	0,3 см
Ціна	40 грн	105 грн

Загальний вигляд ультразвукових датчиків представлених в аналізі зображено на рисунку 2.4.



- а) датчик ультразвуку HC-SR04;  
 б) датчик ультразвуку US-100

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд датчиків HC-SR04 та US-100 [34-35]

Вибір датчика ультразвуку зупинився на HC-SR04 з кількох причин. По-перше, вартість даного датчика є більш доступною порівняно з US-100. Враховуючи простоту використання HC-SR04, він може бути легко інтегрований в проект, і також він є надійним. Їх можна використовувати в різну погоду, на відміну від лазерних далекомірів. Датчик зручний в використанні в Arduino проектах та підтримка у інших системах роблять його вигідним вибором.

Для керування всією мобільною маніпуляційною платформою для розмінування було вирішено обрати одноплатний комп'ютер Arduino UNO R3. Використовувана плата зображена на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд плати Arduino UNO R3 [36]

### Основні параметри Arduino UNO R3:

- зарядна напруга: 7 В – 12 В;
- флеш-пам'ять: 32 кБ;
- оперативна пам'ять: 2 кБ;
- мікроконтролер: ATmega328P;
- порти введення/виведення: 14 цифрових входів/виходів, 6 з яких можуть бути використані як аналогові входи;
- швидкість процесора: 16 МГц [36].

Пересування робота було вирішено обрати гусеничні шасі щоб робот міг пересуватися на складних поверхнях в таких місцях, як поле або ліс. Переміщення гусеничних шасі було обрано двигуни з редуктором 1:48 DC 3V-6V (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд двигун з редуктором 1:48 DC 3V-6V [37]

### Характеристики двигуна-редуктори постійного струму 33GB-520:

- робоча напруга: 3 В – 6 В;
- робочий струм: 35 мА;
- передавальне співвідношення: 1:48;
- швидкість холостого ходу: 170 об/хв [37].

Для керування двигунам було обрано драйвер двигуна з інтегральною мікросхемою мосту H-bridge L298N. Цей двигун дозволяє здійснювати повороти, рух вперед і назад. Загальний вигляд L298N зображено на рисунку 2.7.

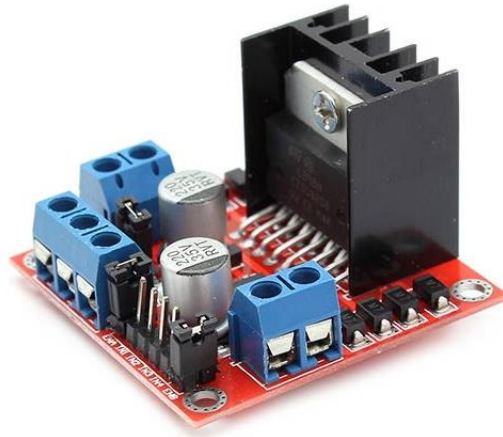


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд драйвера двигуна L298N [38]

Основні параметри L298N:

- напруга живлення вбудованої логіки: 5 В;
- споживчий струм вбудованої логіки: 0 мА – 36мА;
- напруга живлення драйвера: 5 В – 35 В;
- робочий струм драйверів: 2 А;
- кількість двигунів: 2;
- робоча температура: -20 °С – +135 °С;
- розмір: 43,5 мм x 43,2 мм x 29,4 мм [38].

Електроживлення мобільної платформи для розмінування здійснюється на базі трьох акумуляторів 18650 серії Li-Mh 3000 мАг, з номінальною напругою 3,7 В [39]. На рисунку 2.8 зображено загальний вигляд акумулятора.



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд акумулятора 18650 серії Li-Mh [39]

Зарядка всієї системи здійснюється за допомогою плати BMS18650 Туре-С версії 3S для зарядки Li-Ion акумуляторів. На рисунку 2.9 зображено загальний вигляд плати BMS18650.

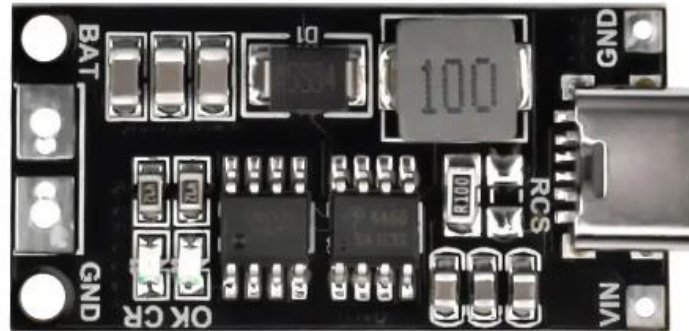


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд плати BMS18650 [40]

Основні характеристики плати BMS18650 Туре-С версії 3S:

- вхідне напруження: 3 В – 6 В постійного струму;
- вхідний струм: 1 А;
- напруга живлення: 12,6 В;
- струм живлення: 0,37 А [40].

Для регулювання та забезпечення стабільної напруги було вибрано лінійний стабілізатор напруги AMS1117 3,3 В 1 А, загальний вигляд зображено на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд стабілізатора напруги AMS1117 3.3 В [41]

Основні параметри стабілізатора напруги AMS1117 3,3 В:

- вхідне напруга: 4,5 В – 15 В;
- вихідне напруга: 3,3 В;
- максимальний струм: 800 мА [41].

### 2.3 Розробка структурної схеми підключення

Розроблювана роботизована платформа для розмінування включає в себе компоненти, які були обрані в минулому пункті, в таблиці 2.4 представлена кількість кожної деталі платформи.

Таблиця 2.4 – Кількість кожної обраної деталі

Компонент	Кількість, шт.
Arduino UNO R3	1
ESP32-Cam	1
TowerPro SG90S	4
HC-SR04	4
Драйвер двигуна L298N	1
Двигун з редуктором 1:48 DC 3 В-6 В	2
Плата BMS18650 Type-C версії 3S	1
Акумулятор 18650 серії Li-Mh	3
AMS1117 3,3 В 1 А	1

Після вибору всіх компонентів та визначення їх кількості для проекту мобільної платформи для розмінування була розроблена електрична схема підключень. Дана схема відображає взаємозв'язок між всіма компонентами та модулями, показуючи, як вони пов'язані в одну систему за допомогою дротів. На рисунку 2.11 зображена створена схема підключення всіх компонентів в одну систему в програмі draw.io Diagrams.

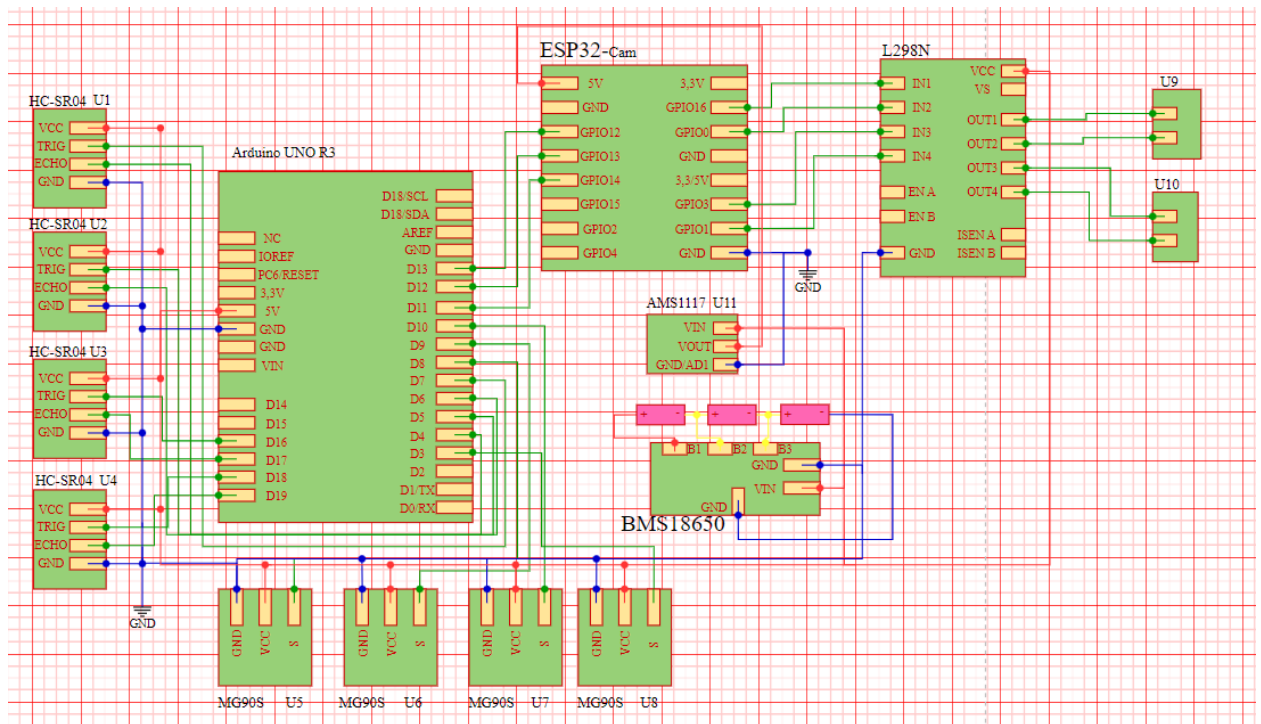


Рисунок 2.11 – Схема підключення компонентів мобільної платформи по розмінуванню

U1-U4 – це ультразвукові датчики HC-SR04, які мають чотири дроти: GND – це земля, VCC – живлення 5 В, TRIG – дріт, який використовується для запуску вимірювання відстані та ECHO – це дріт, який призначений для прийому сигналу ехо.

U5-U8 – це серводвигуни TowerPro SG90S, які підключаються до Arduino UNO R3 через три дроти, це: GND, VCC та S – це командний дріт для передачі інформації.

U9-U10 – це двигуни з редуктором 1:48 DC 3V-6V, вони мають два дроти керування двома напрямками. Підключені до драйверу двигуна L298N.

Драйвер двигуна L298N підключений до мікроконтролера ESP32-Cam через чотири дроти передачі інформації використовуючи інтерфейс GPIO. Живлення йде через дріт VCC та GND.

Мікроконтролер ESP32-Cam підключений до Arduino UNO R3 через три дроти передачі інформації, які підключені до цифрових входів одноплатного комп'ютера використовуючи при цьому інтерфейс GPIO на

ESP32-Cam. Дріт живлення 5 В підключений до стабілізатора напруги, як і дріт GND.

Стабілізатор напруги U11 підключений до ESP32-Cam через два дроти та один дріт йде до плати BMS18650.

Всі датчики, серводвигуни, драйвер L298N та Arduino UNO R3 підключені до плати живлення BMS18650 який на виході подає 12 В.

## 2.4 Розрахунки часу роботи роботизованої платформи

Мобільна платформа для розмінування живиться на базі акумуляторів, тому розрахунок часу роботи роботизованої платформи є важливим етапом при розробці даної системи. Він дозволить зрозуміти, як довго платформа зможе працювати на відстані без перерви чи до наступного заряджання акумуляторів.

Розрахунок часу мобільної платформи на основі акумулятору виконується за наступною формулою:

$$t = \frac{C_{заг} \cdot U}{P_{np}}, \quad (2.1)$$

де  $C_{заг}$  – загальна ємність усіх акумуляторів;

$U$  – напруга акумулятора;

$P_{np}$  – споживча потужність пристрою.

Споживча потужність пристрою знаходиться за наступною формулою:

$$P_{np} = P_1 + P_2 + \dots + P_n, \quad (2.2)$$

де  $P_1 + P_2 + \dots + P_n$  – споживані потужності окремих компонентів чи модулів пристрою.

Кожен компонент має свою споживчу енергію, певні компоненти, такі як ESP32-Cam мають декілька режимів енергозбереження, це: «Deep-sleep», «Modem-sleep» та «Light-sleep» для мінімізації споживаної енергії в період не активності, на мікроконтролері крім камери, також є світлодіодний сплах, який так само впливає на споживчу потужність компоненту.

Споживана потужність розраховується за допомогою закону Пуоера:

$$P = V \cdot I, \quad (2.3)$$

де  $V$  – робоча напруга;

$I$  – робочий струм.

Використовуючи формулу (2.3) було визначено споживчу потужність кожного компоненту. У таблиці 2.5 зібрані всі отримані дані, для одного компоненту, які потім помножуються на кількість кожного елемента, щоб розрахувати потужність всієї системи.

Таблиця 2.5 – Споживча потужність кожного елемента

Компонент	Споживча потужність
Arduino UNO R3	4 Вт
ESP32-Cam	0,9 Вт
TowerPro SG90S	0,72 Вт
HC-SR04	0,075 Вт
Драйвер двигуна L298N	10 Вт
Двигун з редуктором 1:48 DC 3V-6V	2,1 Вт

За формулою (2.2) можна розрахувати споживчу потужність всього пристрою, і тоді виходить:

$$P_{np} = 4 + 0,9 + 0,72 \cdot 4 + 0,075 \cdot 4 + 10 + 2,1 \cdot 2 = 22,28 \text{ Вт.}$$

Платформа живиться за допомогою трьох акумуляторів серії 18650 Li-Mh з ємністю 3000 мАг та номінальною напругою 3,7 В. Тоді  $C_{заг} = 9000$  мА, а  $U = 3,7$  В.

Виходить, що час роботи роботизованої платформи на основ акумуляторів становить:

$$t = \frac{9 \cdot 3,7}{22,28} = 1,5.$$

Отже, при такій кількості акумуляторів мобільна роботизована платформа по розмінуванню може працювати в автономному режимі 1,5 години.

## 2.5 Висновки до 2 розділу

При виконанні другого розділу було розроблено структурну схему мобільної маніпуляційної платформи для розмінування, в якій було визначено наступні модулі: модуль Mine, модуль Computer Vision Module, модуль Manipulator, модуль Sensor Module, модуль Mobile Robot Control System, модуль Local Control System, модуль Manipulator Control Module, модуль Power Management Module, модуль Motor Control Driver та модуль Movers.

Базуючись на структурну схему було обрано наступні апаратні рішення: Arduino UNO R3, який відповідає за чотири ультразвукові датчики HC-SR04 та 4 серводвигуни TowerPro SG90S, які керують маніпулятором. Arduino UNO R3 надсилає отриману інформацію з датчиків до мікроконтролера ESP32-Cam, який має бездротовий зв'язок та камеру, яка в майбутньому буде транслювати відео потік на веб-сторінку. До мікроконтролера через дроти підключений драйвер двигуна L298N, який керує двома двигунами з редуктором 1:48 DC 3 В-6 В, для пересування

гусеничних шасі по важкодоступних місцях. ESP32-Cam підключена до стабілізатора напруги AMS1117 3,3 В 1 А. Живлення всієї платформи здійснюється за допомогою плати BMS18650 Type-C версії 3S, до якої підключено 3 акумулятори 18650 серії Li-Mh.

## **3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ УПРАВЛІННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ**

### **3.1 Принцип методу пошуку та управління**

Вибухонебезпечні об'єкти поділяються на різні категорії в залежності від їхнього походження, характеристик та функцій. І методи пошуку їх, як було зазначено в аналізі також різняться. На даний момент в Україні, особливо в деокупованих містах вибухонебезпечними об'єктами є саме боеприпаси та боезапаси. Це збройні засоби, такі як снаряди, міни, бомби та інші вибухонебезпечні об'єкти, створені для військового використання.

Найкращим методом для пошуку таких об'єктів, зокрема в полях є візуалізаційний метод, особливо при управлінні платформи оператором. Снаряди, міни та бомби варіюються від 5 см до 40 см. Платформа має висоту 7 см та складається з компонентів, які представлені в другому розділі. Чіткість видимості з камери OV2640 становить приблизно 2 м – 3 м, але враховуючи людський фактор і камуфляжність вибухонебезпечних об'єктів то назавжди вдається навіть на такій відстані виявити об'єкт. Тому для покращення пошуку небезпечних об'єктів для платформи було додано ще чотири ультразвукові датчики HC-SR04, які розташовані на кожній стороні роботизованої платформи, що дозволить забезпечити максимальне покриття зони розмінування.

Дані ультразвукові датчики дозволяють знаходити перешкоди на відстані до 4 м затративши при цьому приблизно 2 с. В такому випадку платформа може одразу шукати небезпечні об'єкти на площі 25,1 м завдяки ультразвуковим датчикам. Якщо в цьому діапазоні буде виявлена перешкода, оператор керуючи рухом об'єкту може наблизитись до неї, враховуючи технічні параметри обраних двигунів дану відстань платформа подолає за 2

години. Так як датчик HC-SR04 знаходить всі перешкоди, які виникнуть в даній зоні розмінування, то камера дозволить відсіяти всі інші об'єкти. Враховуючи всі ці фактори то виявити об'єкт в зоні виявлення платформи можна приблизно за 10 хв, враховуючи рух обертання платформи. Завдяки маніпулятору розташованому на платформі захопити вибухонебезпечний об'єкт можна за 8 хв.

Отже запропонований метод покращує точність та швидкість пошуку вибухонебезпечних об'єктів.

### 3.2 Алгоритм управління/алгоритм роботи з оператором

Алгоритм управління мобільною маніпуляційною платформою для розмінування складається з чотирьох рівнів. На кожному рівні здійснюється передача, обробка інформації та виконання поставлених команд від оператора. На рисунку 3.1 зображена розроблена граф схема керування платформою для розмінування.

На третьому рівні знаходяться наступні модулі: CVM, M, SM, MCD та Movers. Цей рівень поєднує всі датчики, серводвигуни та двигуни для керування розробленою платформою. І на цьому рівні роботизована платформа безпосередньо взаємодіє з навколишнім середовищем.

Другий рівень складається з модулів MCM та LCS. Даний рівень призначений для управління третім рівнем, тобто він відповідає за надсилання запитів до всіх датчиків та серводвигуни.

На першому рівні знаходиться модуль MRCS, який представляє собою мікроконтролер ESP32-Cam, який отримує всю інформацію з другого та третього рівня, через дроти і надсилає зібрані дані оператору чи транслює їх у реальному часі. Також він передає команди від оператора мобільній платформі.

Сам оператор знаходиться на нульовому рівні, він отримує інформацію через бездротову мережу, приймає рішення за отриманими даними та надсилає команди мобільній платформі для розмінування.

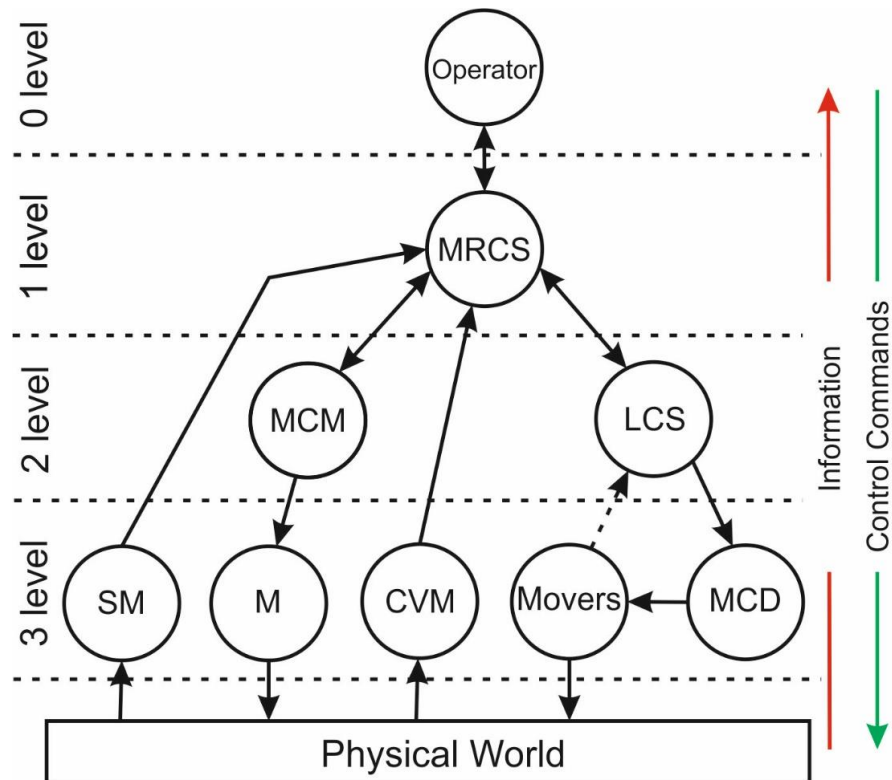


Рисунок 3.1 – Граф схема керування мобільною маніпуляційною платформою для розмінування [4]

### 3.3 Розробка узагальненого алгоритму

Розробка узагальненого алгоритму для мобільної роботизованої платформи для розмінування є ключовим етапом у створенні ефективної та гнучкої системи. Використання узагальненого алгоритму дозволить визначити чіткі задачі, такі як програмні та фізичні, які повинна виконувати дана платформа для якісної роботи. На рисунку 3.2 зображений розроблений узагальнений алгоритм керування платформою для розмінування, який включає всі необхідні етапи для чіткої роботи мобільної платформи, яка керується оператором.

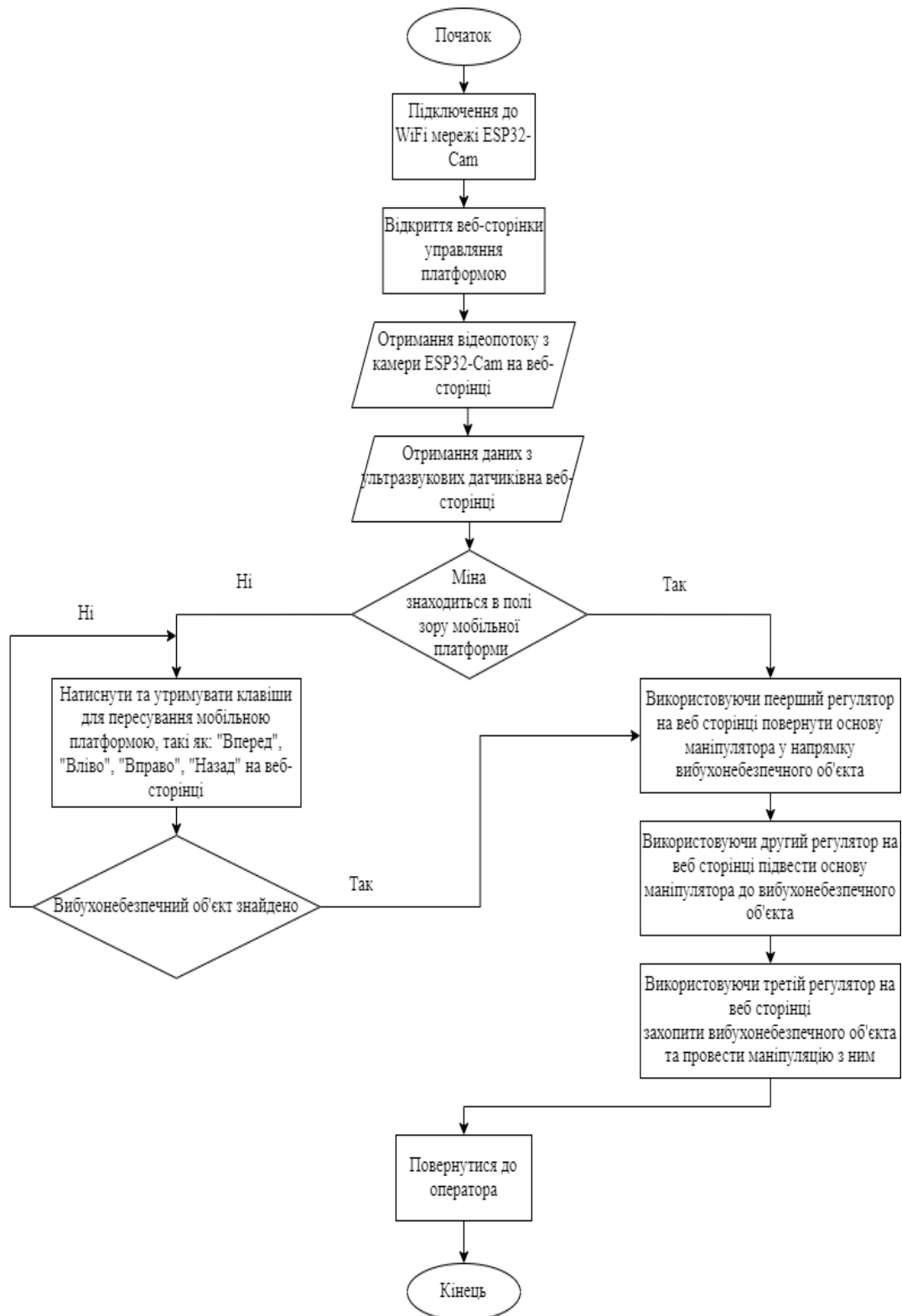


Рисунок 3.2 – Узагальнений алгоритм керування мобільної платформи для розмінування

З узагальненого алгоритму зрозуміло, що платформою керує оператор через бездротовий зв'язок, можливість якого надає ESP32-Cam. Для

програмування роботизованої платформи було обрано мову програмування C++. Код програми розроблювався в середовищі розробки Arduino IDE, який є простим у використанні, дозволяє програмувати мікроконтролери різних пристроїв та який має багато різноманітних бібліотек, які дозволяють легко керувати платформою. Щоб мати змогу керувати мобільною платформою на відстані необхідно, щоб ESP32-Cam виступала як точка доступу та надавала можливість заходити на веб-сторінку керування.

На веб-сторінці керування необхідно отримувати інформацію з ультразвукових датчиків та відео потік з камери для взаємодії з навколишнім середовищем. Окрім цього на веб-сторінці повинні бути клавіші для управління двигунами в усі чотири сторони та управління серводвигунами для керування маніпулятивною частиною. Реалізувати керування з веб-сторінки було вирішено використовуючи запити. Коли оператор натискає на клавіші чи встановлює значення регулятором для пересування маніпулятором, запити відправляються на мікроконтролер ESP32-Cam де вони реалізуються. Для того щоб програмно реалізувати роботу апаратних частин при запиті, в коді C++ встановлюється та налаштовуються GPIO-піни відповідно до схеми підключення.

Для реалізації роботи мобільної платформи був розроблений алгоритм роботи програми в Arduino IDE. На рисунку 3.3 представлений розроблений алгоритм. Цей алгоритм дозволяє ESP32-Cam працювати як точка доступу, надавати відеопотік та обробляти команди віддаленого управління для мобільної роботизованої платформи для розмінювання.

Розроблений узагальнений алгоритм роботи програми має лінійну структуру та є нескінченним завдяки функції `void loop()`, який викликається автоматично після виконання функції `void setup()`. До функції `void setup()` входить обробка HTTP-запитів, функції для обробки руху та серводвигунів, функція для вимірювання відстаней.

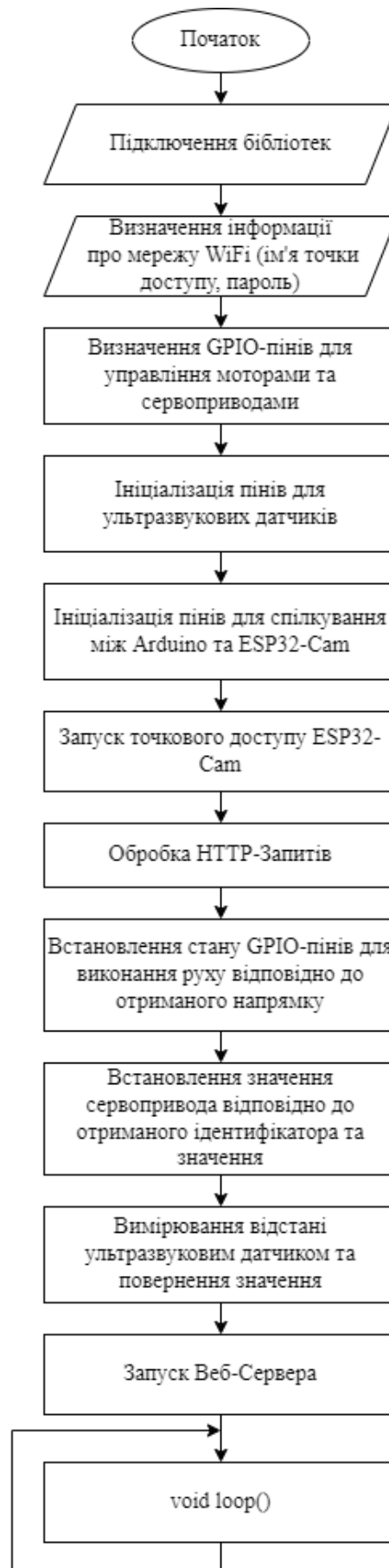


Рисунок 3.3 – Узагальнений алгоритм роботи програми

### 3.4 Розробка функцій передачі команд від оператора

Програмне рішення реалізується в Arduino IDE для прошивки апаратної частини платформи на мові програмування C++ та в Visual Studio Code в якому розроблено інтерфейс керування мобільною платформою.

Visual Studio Code – це середовище розробки та текстовий редактор компанії Microsoft. Він підтримує багато мов програмування та надає широкий спектр функцій для розробки програмного забезпечення. Текстовий редактор є популярним завдяки своєму зручному інтерфейсу, підтримці багатьох мов програмування, таких як: HTML, CSS, JavaScript, Python, Java, C++, і багато інших, та можливості розширення та налаштування, що дозволяє легко розгорнути та розміщувати сайти [16].

Інтерфейс керування розроблено за допомогою HTML, з використанням CSS та JavaScript. Комунікація між веб-сторінкою керування платформою та сервером ESP32-Cam відбувається за допомогою HTTP-запитів, які надсилаються через JavaScript-код сторінки і обробляються на Arduino-сервері ESP32-Cam. Для керування використовуються запити HTTP POST-запити для керування пересуванням платформою та серводвигунами, а для отримання відстані з ультразвукових датчиків використовується HTTP GET-запити.

Для роботи з ESP32-Cam в Arduino IDE було завантажено прошивка для роботи з мікроконтролером та в вкладці «Інструменти» було налаштовано менеджер плат, всі налаштування зображені на рисунку 3.4. Без цього налаштування створений код не буде завантажений на плату. Особливо важливо обрати плату «ESP32 Wrover Module». Бо Arduino IDE отримує необхідні інструменти від менеджера плат, які дозволяють програмувати ESP32 та взаємодіяти з його функціями. Це включає в себе вбудовані бібліотеки та конфігурації, які дозволяють коректно використовувати функціональні можливості мікроконтролера.

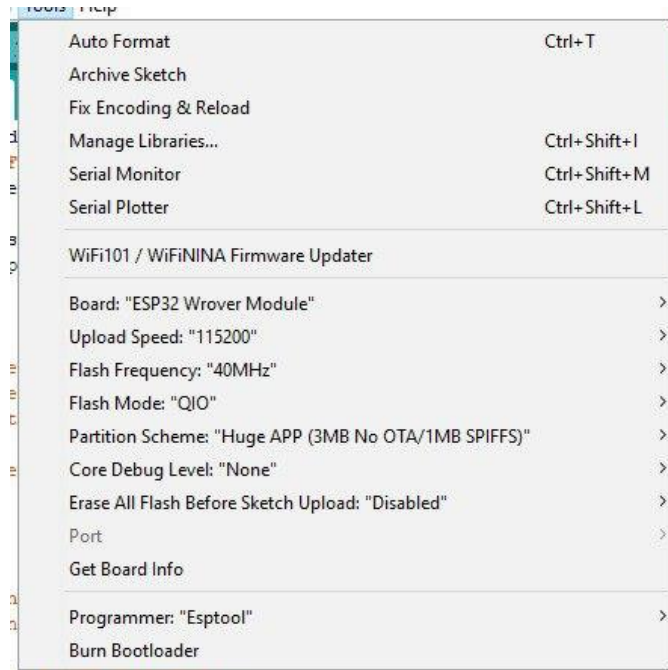


Рисунок 3.4 – Налаштування менеджер плат

Першим кроком при створенні програми для керування мобільною платформою було підключено всі необхідні бібліотеки, для реалізації програми використовуються дані бібліотеки:

```
#include <WiFi.h>
```

```
#include <ESPAsyncWebServer.h> // ця бібліотека забезпечує  
можливість створення асинхронного веб-сервера на ESP32.
```

```
#include <ESPAsyncTCP.h>
```

```
#include "camera_pins.h" // параметри камери ESP32-Cam
```

Бібліотека <WiFi.h> відповідає за роботу з Wi-Fi на ESP32. Він підключає пристрій до мережі Wi-Fi або діє як точка доступу.

Бібліотека <ESPAsyncWebServer.h> використовується для асинхронного мережевого введення/виведення на ESP32. Вона є частиною архітектури асинхронного веб-сервера і забезпечує асинхронні можливості для обробки мережевих подій.

Щоб створити власну точку доступу на мікроконтролері ESP32 були створені константи для зберігання даних ім'я та пароля, для захисту веб-сторінки керування:

```
const char *ssid = "ESP32-Cam-Access-Point";
```

```
const char *password = "12345678";
```

За налаштування обробки асинхронних HTTP-запитів відповідає наступна частина коду:

```
AsyncWebServer server(80);
```

Ця частина коду відповідає за створення об'єкта `AsyncWebServer`, який являє собою клас, який забезпечує функціональність веб-сервера ESP32, що дозволяє асинхронно обробляти HTTP-запити та надсилати відповіді, на порті 80.

За налаштування мікроконтролера ESP32-Cam у функції `void setup()` використовується команда:

```
Serial.begin(115200); // швидкість роботи порту
```

За реалізацію ESP32-Cam, як точку доступу відповідає наступна частина коду:

```
WiFi.softAP(ssid, password); // встановлює ESP32-Cam в режим точки доступу
```

```
Serial.println("ESP32-Cam встановлено в режим точкового доступу"); // вивід інформації про доступ у монітор порта
```

```
Serial.print("IP-адреса точкового доступу: ");
```

```
Serial.println(WiFi.softAPIP()); // повертає IP-адресу точкового доступу ESP32-Cam
```

```
server.onNotFound([](AsyncWebServerRequest *request){ // визначає обробник для запитів, які не знайдені, помилка 404
```

```
request->redirect("/");
```

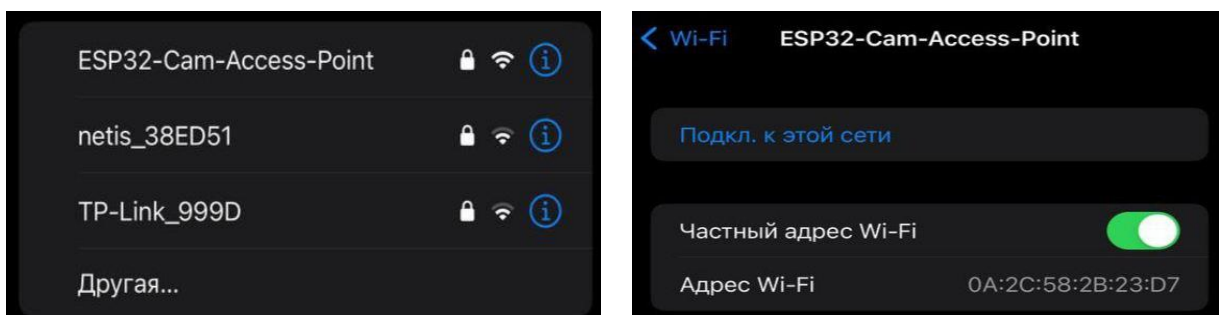
В результаті в моніторі порту буде з'являтися повідомлення, зображене на рисунку 3.4 після того, як на ESP32-Cam натиснути Reset.

Зазвичай дана IP-адреса відповідає за сервер ESP32-Cam, тому на всіх мікроконтролерах ця точка доступу є однаковою.



Рисунок 3.4 – Монітор порту

А на телефоні з'явиться точка доступу з назвою «ESP32-Cam-Access-Point», що зображено на рисунку 3.5.



а)

б)

а) знайдена точка доступу;

б) підключення до створеної точки доступу

Рисунок 3.5 – Створена точка доступу з мікроконтролеру ESP32-Cam у телефоні

За автоматичне відкриття сторінки після підключення до створеної точки доступу ESP32-Cam відповідає наступний код в html-документі з використанням JavaScript:

```
window.addEventListener('load', function() { // Автоматично відкрити сторінку при завантаженні
```

```
var esp32CamIp = '192.168.4.1'; // Встановлення IP-адреси ESP32-Cam,
отриману в Serial Monitor
```

```
window.location.href = 'http://' + esp32CamIp; // Відкриття сторінки в
браузері });
```

Коли веб-сторінка повністю завантажена, щоб включити всі ресурси: відео з камери, дані з ультразвукових датчиків використовується функція обробки подій:

```
window.addEventListener('load', function () { // Виклик оновлених
функцій при завантаженні сторінки
```

```
  fetchData();
```

```
  updateSensorValues(); });
```

Наступним кроком після створення точки доступу та налаштування відкриття сторінки йде налаштування всіх частин управління: відео потоком з камери, ультразвуковими датчика, серводвигунами та двигунами.

Наступна частина коду в C++ відповідає за отримання відео з камери ESP32-Cam:

```
server.on("/video", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){ //
```

Отримання відеоданих з камери

```
  fb = esp_camera_fb_get();
```

```
  if (!fb) {
```

```
    Serial.println("Не вдалося отримати дані камери");
```

```
    return; }
```

```
  request->send_P(200, "image/jpeg", fb->buf, fb->len); // Надсилання
```

відеоданих клієнту

```
  esp_camera_fb_return(fb); });
```

В html-документі за отримання даних з камери та транслювання відео потоку на веб-сторінці відповідає наступна частина коду написана на JavaScript:

```
const videoElement = document.getElementById('videoStream'); //
```

Отримуємо посилання на відео-елемент

```
const videoStreamUrl = 'http://192.168.4.1/video'; // Адреса, за якою
ESP32-CAM надає MJPEG-стрім
```

```
videoElement.src = videoStreamUrl; // Налаштування відео як MJPEG-
стрім
```

Щоб керувати двигунами з веб-сторінки, спочатку в Arduino IDE вони ініціалізуються:

```
pinMode(IN1, OUTPUT);
```

```
pinMode(IN2, OUTPUT);
```

```
pinMode(IN3, OUTPUT);
```

```
pinMode(IN4, OUTPUT);
```

Потім прописується сама функція для обробки запиту для напрямку руху двигунів, і код має такий вигляд:

```
void handleDirection(String direction) {
```

```
  if (direction == "forward") { // Вперед: установка відповідних GPIO
пінів в HIGH або LOW
```

```
    digitalWrite(IN1, HIGH);
```

```
    digitalWrite(IN2, LOW);
```

```
    digitalWrite(IN3, HIGH);
```

```
    digitalWrite(IN4, LOW);
```

```
  } else if (direction == "backward") { // Назад: установка відповідних
GPIO пінів в HIGH або LOW
```

```
    digitalWrite(IN1, LOW);
```

```
    digitalWrite(IN2, HIGH);
```

```
    digitalWrite(IN3, LOW);
```

```
    digitalWrite(IN4, HIGH);
```

```
  } else if (direction == "left") { // Вліво: установка відповідних GPIO пінів
в HIGH або LOW
```

```

digitalWrite(IN1, LOW);
digitalWrite(IN2, HIGH);
digitalWrite(IN3, HIGH);
digitalWrite(IN4, LOW);
} else if (direction == "right") { // Вправо: установка відповідних GPIO
пінів в HIGH або LOW
digitalWrite(IN1, HIGH);
digitalWrite(IN2, LOW);
digitalWrite(IN3, LOW);
digitalWrite(IN4, HIGH);
} else { // Зупинка: установка всіх GPIO пінів в HIGH або LOW
digitalWrite(IN1, HIGH);
digitalWrite(IN2, HIGH);
digitalWrite(IN3, HIGH);
digitalWrite(IN4, HIGH);} }

```

Надсилання запитів відбувається завдяки використанню функції `keyDownHandler`, яка викликається при натисканні клавіш, а функція `keyUpHandler` викликається при відпусканні клавіш керування платформою. Управління пересуванням роботизованою зроблена схожим чином з джойстиком, коли при натисканні та утриманні платформа пересувається і при відпусканні припиняє рух.

```

function keyDownHandler(event) {
switch (event.key) {
case 'ArrowUp':
sendCommand('forward');
break;
case 'ArrowDown':
sendCommand('backward');
break;

```

```

case 'ArrowLeft':
sendCommand('left');
break;
case 'ArrowRight':
sendCommand('right');
break;} }
function keyUpHandler(event) {
sendCommand('stop'); } // Зупинити платформу при відпусканні клавіш
document.addEventListener('keydown', keyDownHandler);
document.addEventListener('keyup', keyUpHandler);

```

Ініціалізація серводвигунів згідно схемі підключення, зображену на рисунку 2.11 має наступні строчки:

```

servo1.attach(8); // Пін D8 для першого серводвигуна
servo2.attach(9); // Пін D9 для другого серводвигуна
servo3.attach(10); // Пін D10 для третього серводвигуна
servo4.attach(11); // Пін D11 для четвертого серводвигуна

```

Обрані серводвигуни мають значення куту оберту від 0° до 180° відповідно від обраного значення на веб-сторінці, вони змінюють своє положення. Для обробки команд з веб-сторінки для керування рухом положенням серводвигунів, які надходять через POST-запити була написана наступна частина коду:

```

server.on("/move", HTTP_POST, [(AsyncWebServerRequest *request){
String body = request->getBody(); // Отримання тіла запиту
DynamicJsonDocument doc(1024);
deserializeJson(doc, body);
String direction = doc["direction"]; // Отримання напрямку
String servoId = doc["servoId"];
int servoValue = doc["servoValue"];

```

handleDirection(direction); // Виклик функції для виконання дій відповідно до отриманого напрямку

```
handleServo(servoId, servoValue); });
```

Управління серводвигунами відбувається завдяки функції handleServo:

```
void handleServo(String servoId, int servoValue) { // Функція для обробки серводвигуна та його значення
```

```
if (servoId == "servo1") {
servo1.write(servoValue);
} else if (servoId == "servo23") {
servo2.write(servoValue);
servo3.write(servoValue);
} else if (servoId == "servo4") {
servo4.write(servoValue); } }
```

Для відправки значення куту на платформу спочатку необхідно його отримати з регулятора, для цього використовується код JavaScript:

```
document.getElementById('servoSlider1').addEventListener('input', function
() { // Обробник події зміни значення регулятора серводвигуна 1
var servoValue = this.value;
sendCommand('servo1', servoValue); });
```

Для інших серводвигунів використовується такий самий код тільки змінюється номер серводвигунів.

Отримані результати відправляються на сервер ESP32-Cam використовуючи наступну функцію:

```
function sendCommand(servoId, servoValue) { // Функція для відправлення команди на сервер
```

```
var xhr = new XMLHttpRequest();
xhr.open('POST', url, true);
xhr.setRequestHeader('Content-Type','application/x-www-form-urlencoded');
```

```

var data = 'servoId=' + encodeURIComponent(servoId) + '&servoValue=' +
encodeURIComponent(servoValue); // Дані для відправлення на сервер
xhr.onload = function () { // Обробник події завершення запиту
if (xhr.status === 200) {
console.log('Запит відправлено успішно');
} else {
console.error('Помилка відправлення запиту'); } };
xhr.send(data); // Відправка запиту }

```

ESP32-Cam відправляє та отримує запити з веб-сторінки керування. Ультразвукові датчики підключені до Arduino UNO R3, тому ультразвукові датчики повинні відправляти отримані дані з одноплатного комп'ютера до ESP32-Cam а потім вже через бездротовий зв'язок на веб-сторінку через запити для цього є наступні створені константи для відправки даних через дротовий зв'язок:

```

const int triggerPin = 13; // GPIO12 на ESP32-Cam
const int echoPin = 14; // GPIO13 на ESP32-Cam

```

Принцип зчитування інформації ультразвукових датчиків був описаний в другому розділі, щоб реалізувати це на практиці використовуються наступна частина коду:

```

int getDistance(int trigPin, int echoPin) { // Функція для вимірювання
відстані ультразвуковим датчиком
digitalWrite(trigPin, LOW); // Генеруємо ультразвуковий імпульс
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
long duration = pulseIn(echoPin, HIGH); // Зчитуємо час ехо-імпульсу
int distance = duration * 0.034 / 2; // Перетворюємо час відповідно до
формули (відстань = час * швидкість звуку) / 2

```

```
return distance; }
```

Спочатку перед цим кодом всі змінні ініціалізуються. За відправку отриманих даних у форматі JSON у відповідь на запит відповідає наступна функція:

```
server.on("/getDistances", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest
*request){ // Обробник для шляху /getDistances
    int distance1 = getDistance(trigPin1, echoPin1);
    int distance2 = getDistance(trigPin2, echoPin2);
    int distance3 = getDistance(trigPin3, echoPin3);
    int distance4 = getDistance(trigPin4, echoPin4);
    String jsonResponse = "{\"distance1\": " + String(distance1) +
    ", \"distance2\": " + String(distance2) + ", \"distance3\": " + String(distance3) +
    ", \"distance4\": " + String(distance4) + "}";
    request->send(200, "application/json", jsonResponse); });
```

Отримання даних на веб-сторінку здійснюється завдяки наступному коду:

```
function updateSensorValues() { // Функція для оновлення значень з
ультразвукових датчиків
    fetch('/getDistances')
    .then(response => response.json())
    .then(data => {
        if (data.distance1 !== undefined) {
            document.getElementById('distance1').innerHTML = 'Датчик 1: ' +
            data.distance1 + ' cm';
        } else {
            document.getElementById('distance1').innerHTML = 'Датчик 1: Датчик не
            знайдено'; }
        if (data.distance2 !== undefined) {
```

```

document.getElementById('distance2').innerHTML = 'Датчик 2: ' +
data.distance2 + ' cm';
} else {
document.getElementById('distance2').innerHTML = 'Датчик 2: Датчик не
знайдено'; // так самий код для інших двох датчиків } })
.catch(error => console.error('Помилка при отриманні даних:', error)); }

```

За постійне оновлення даних відповідає наступна строчка коду:

```

setInterval(fetchData, 30000); // Оновлюємо дані кожні 30 секунд

```

### 3.5 Висновки до 3 розділу

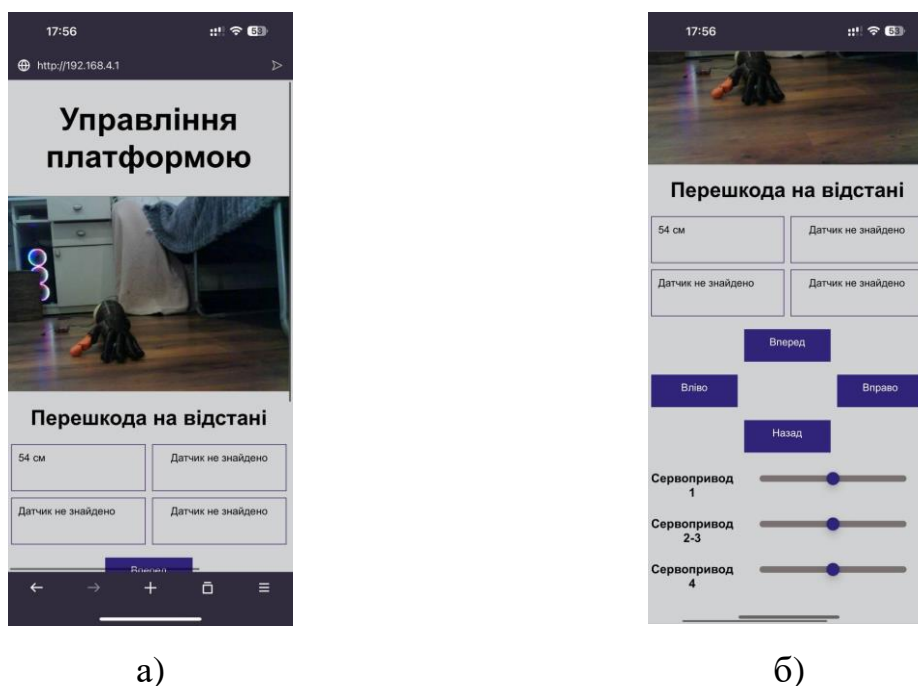
В другому розділі було запропоновано принцип методу пошуку та управління роботизованою платформою. Розроблено алгоритм управління роботи з оператором, де була запропонована граф схема керування маніпуляційною платформою, яка складається з чотирьох рівнів. Далі було розроблено загальний алгоритм роботи мобільної платформи та узагальнений алгоритм роботи програми в цілому.

Реалізована програма керування роботизованою платформою для розмінування була на мові C++ в Arduino IDE для прошивки апаратної частини та веб-сторінка створена завдяки HTML, CSS та JavaScript, для керування самою платформою з використанням HTTP-запитів. Оператор підключається до точки доступу створеним мікроконтролером ESP32-Cam та заходить на створений сервер, який має IP-адресу: 192.168.4.1, де знаходиться веб-сторінка «Керування платформою», де є управління рухом мобільної платформи, управління рухом серводвигунів для роботи маніпулятора, відображення відеопотоку з камери OV2640 розташованій на мікроконтролері та отримання і постійне оновлення даних з ультразвукових датчиків HC-SR04.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 4.1 Розробка інтерфейсу керування мобільною платформою

Розроблений інтерфейс оператора для управління маніпуляційною платформою зображено на рисунку 4.1.



а) відкрита сторінка на початку;

б) сторінка знизу

Рисунок 4.1 – Інтерфейс сторінки керування

Даний інтерфейс розбитий на чотири частини, це зроблено завдяки створеній сітці. Для налаштування веб-сторінки в одному стилі використовувався CSS. Сторінка виконана в сіро-синіх кольорах, щоб не відволікати оператора від роботи.

Перша частина зображена у вигляді поля для відображення камери і в html-документі воно виглядає наступним чином:

```

<div class="video-container">
  <video width="640" height="480" controls>
    <source src="/video" type="multipart/x-mixed-replace;
boundary=frame"> Не вдається отримати відео з камери.
  </video>
</div>

```

Ця частина коду встановлює параметри зображення відео та відображення його в цьому полі.

Друга частина представляє з себе чотири прямокутні поля, в яких відображається отримана інформація з ультразвукових датчиків. Створені поля мають наступні строчки:

```

<div class="row">
  <div class="double-column" id="distance1">---</div>
  <div class="double-column" id="distance2">---</div>
</div>
<div class="row">
  <div class="double-column" id="distance3">---</div>
  <div class="double-column" id="distance4">---</div>
</div>

```

Третя частина відповідає за клавіши керування пересуванням роботизованої платформи. Клавіши розташовані в спочатку по середині та по боках, для зручного натискання. Розроблений код даної частини представлено нижче:

```

<div class="row">
  <div class="column"></div>
  <div class="column">
    <a class="button" onclick="sendCommand('forward')">Вперед</a>
  </div>
  <div class="column"></div>

```

```

</div>
<div class="row">
  <div class="column">
    <a class="button" onclick="sendCommand('left')">Вліво</a>
  </div>
  <div class="column"></div>
  <div class="column">
    <a class="button" onclick="sendCommand('right')">Вправо</a>
  </div>
</div>
<div class="row">
  <div class="column"></div>
  <div class="column">
    <a class="button" onclick="sendCommand('backward')">Назад</a>
  </div>
  <div class="column"></div>
</div>

```

В даних рядках знаходиться посилання на код JavaScript для активації даних клавiш. В строчках можна побачити, що використання класiв «column» i створюється сiтка.

Четверта частина представляє з себе поле з трьома регуляторами. Строчки для реалiзацiї одного з регулятор є наступними:

```

<div class="row">
  <div class="empty-column">
    <h3>Сервопривод 1</h3>
  </div>
  <div class="column">
    <div class="slider-container">

```

```
<input type="range" id="servoSlider1" class="slider" name="serv1"
min="0" max="180" step="1" value="90"> </div> </div>
</div>
```

Тут встановлюється клас регулятора та значення від 0 до 180, що вказує на кут обертання серводвигуна. Регулятори є з кроком зміни значення 1 та початкове положення всіх регуляторів стоїть на 90°.

#### 4.2 Проведення експериментального дослідження

Задача експериментального дослідження має на меті визначити взаємозв'язок між рівнем освітленості та якістю відео потоку, що транслюється з камери мікроконтролера ESP32-Cam, який знаходиться на мобільній роботизованій платформі для розмінування. Основна мета цього дослідження – визначити, як зміни в умовах освітлення впливають на функціональність та ефективність системи, що використовується для розмінування.

Проведений експеримент визначить при якому освітленні та в який час, розроблена роботизована платформа буде працювати ефективно та головне безпечно для оператора, оскільки незамічена міна може мати небезпечні наслідки.

Експеримент проводився при використанні трьох видів освітленості:

- при найкращому освітленні;
- при середньому світлі;
- при поганому освітленні.

Необхідно зазначити, що експеримент проводився в приміщенні, тому середнє освітлення мається на увазі ранкове освітлення, найкраще освітлення це – денне освітлення, коли сонце знаходиться в найвищій точці та погане освітлення свідчить про частину дня сутінки.

Експеримент проводився при різній відстані від камери з мікроконтролера до об'єкта «Міна», а саме: 50 см, 100 см, 150 см та 200 см. Об'єкт «Міна» зображена на папері розміру А4, тому експеримент проводився для великого вибухонебезпечного об'єкту.

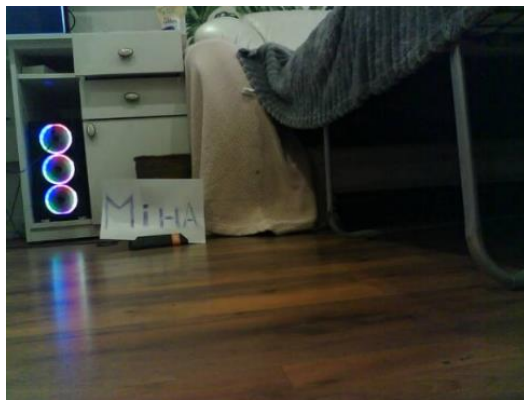
На рисунку 4.2 зображено отримані дані з камери ESP32-Cam при денному освітленні.



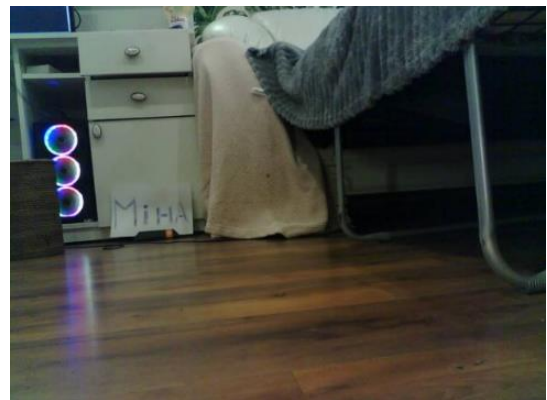
а)



б)



в)



г)

- а) міна розташовано на відстані 50 см від камери;
- б) міна розташовано на відстані 100 см від камери;
- в) міна розташовано на відстані 150 см від камери;
- г) міна розташовано на відстані 200 см від камери

Рисунок 4.2 – Результати експерименту при найкращому освітленні

Результати показали, що від 50 см до 200 см видимість об'єкта є чіткою і вибухонебезпечний об'єкт знайти на цих відстанях буде легкою задачею. Гарне освітлення, це приблизний час: 14:00 – 16:00 год літнього часу, 12:00 – 15:00 год зимнього часу.

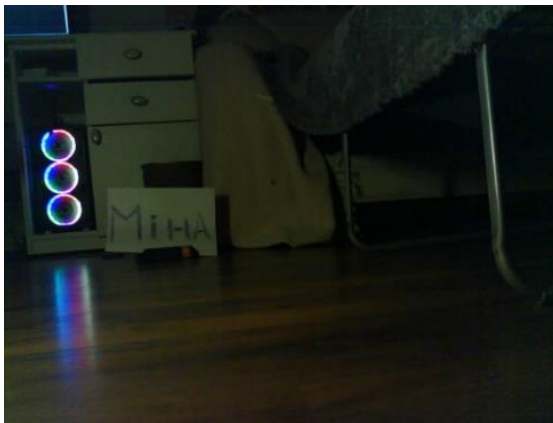
Другий експеримент, який проводився при денному освітленні зображено на рисунку 4.3.



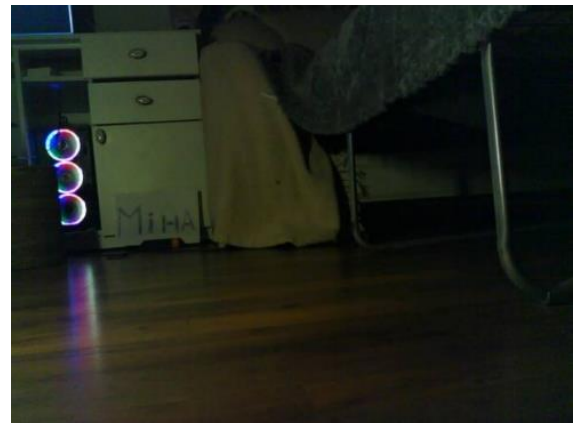
а)



б)



в)



г)

- а) міна розташовано на відстані 50 см від камери;
- б) міна розташовано на відстані 100 см від камери;
- в) міна розташовано на відстані 150 см від камери;
- г) міна розташовано на відстані 200 см від камери

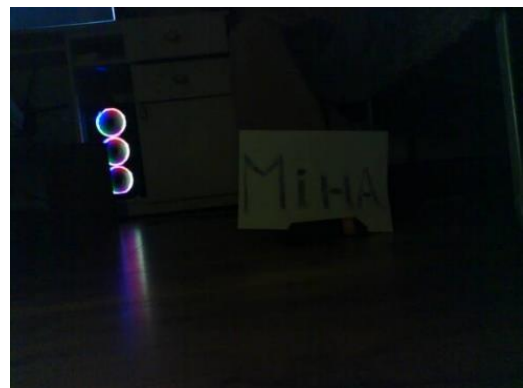
Рисунок 4.3 – Результати експерименту при середньому освітленні

В будинку в якому проводився експеримент вікон з гарним світлом немає, тому на рисунку 4.3 видно, що середнє освітлення дорівнює приблизній годині ранку: 6:00 – 8:00 год. При такому освітлені об'єкт «Міна» також чітко видно, але при відстані 200 см об'єкт починає зливатися з фоном, а враховуючи той фактор, що зазвичай вибухонебезпечні об'єкти роблять в камуфляжному забарвленні то при такій відстані знайти міну вже буде складною задачею.

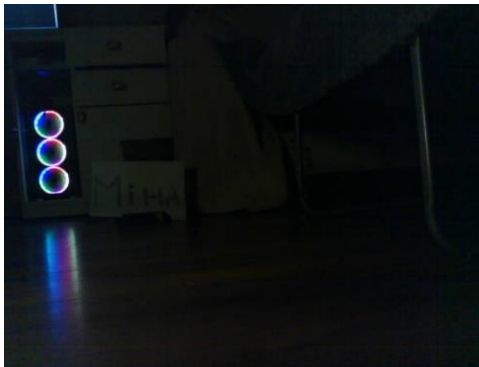
Третє дослідження при поганому освітлені зображено на рисунку 4.4.



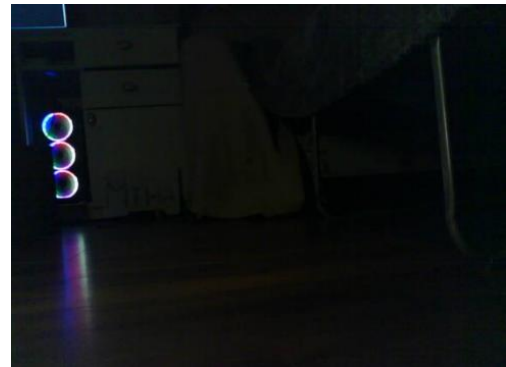
а)



б)



в)



г)

- а) міна розташовано на відстані 50 см від камери;
- б) міна розташовано на відстані 100 см від камери;
- в) міна розташовано на відстані 150 см від камери;
- г) міна розташовано на відстані 200 см від камери

Рисунок 4.3 – Результати експерименту при поганому освітлені

При поганому освітленні працювати ефективно вже не має змоги. Дане освітлення спостерігається в приблизні години 19:00 – 21:00 год в літній сезон і 16:00 – 18:00 год. На відстані 50 см та 100 см помітити об'єкт ще можливо, але на відстані 150 см та 200 см, це вже майже неможливо. А враховуючи, що непомітний об'єкт становить загрозу для оператора. То в таку годину і при такому світлі працювати вже не рекомендується.

Проводити додаткові експерименти з більш темним освітленням немає сенсу, так як при поганому освітленні показники вже не влаштовує завдання, які поставлені для даної мобільної роботизованої платформи. На мікроконтролері ESP32-Cam є вбудований спалах, але при виконанні пошуку вибухонебезпечних об'єктів в темряві він має обмежену продуктивність при виконанні роботи.

Раніше було зазначено, що запропонований об'єкт має достатньо великі габарити, як для деяких вибухонебезпечних об'єктів, наприклад: гранат та артилерійських снарядів, тому було проведено додаткове випробування на відстані 100 см від камери до об'єкта, але тепер в 4 рази менше за перший представлений варіант, і при такому ж світлі: найкраще, середнє та погане освітлення.

На рисунку 4.4 зображено отримані результати проведення додаткового експериментального дослідження.



а)



б)



в)

- а) знаходження об'єкта при гарному освітлені;
- б) знаходження об'єкта при середньому освітлені;
- в) знаходження об'єкта при поганому освітлені

Рисунок 4.4 – Знаходження зменшеного об'єкта на відстані 100 см від камери

Експеримент показав, що об'єкти невеликих розмірів на відстані 100 см чітко видні, при найкращому, середньому та поганому освітлені, але слід зазначити, що якщо об'єкт буде одного кольору з навколишнім середовищем яке його оточує то знайти його буде важко.

В результаті отриманого експериментального дослідження можна зробити наступні висновки, що час проведення пошукових робіт краще всього робити в день, в приблизні годин 11:00 і до 16:00 в літні години, в

зимню пори року з 11:00 до 15:00. В ранці ефективність платформи буде на 30% гірше, через середню освітленість, а ефективність платформи вже при поганому освітлені вже на 70% буде гірше, як можна проаналізувати з отриманих результатів зображень. Камера від полу знаходиться на відстані 6 см, і знаходження вибухонебезпечних об'єктів великих та малих розмірів є нескладною задачею для оператора, який керує платформою.

### 4.3 Охорона праці

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії. При проведенні дослідження необхідно запобігти впливу на оператора шкідливих виробничих факторів, для цього використовують державні санітарні норми. Державні санітарні норми, правила та гігієнічні нормативи є обов'язковими документами, які встановлюють стандарти безпеки та відсутності шкідливих впливів на здоров'я людини у навколишньому середовищі. Ці нормативи визначають критерії прийнятності для різних факторів та встановлюють вимоги щодо забезпечення оптимальних умов для життєдіяльності людини.

В лабораторії повинні бути оснащені системами опалення, кондиціонування повітря або системами припливно-витяжної вентиляції. У цих приміщеннях важливо забезпечити оптимальні параметри мікроклімату, такі як температура, відносна вологість та рух повітря, відповідно до встановлених норм та правил, включаючи вимоги, визначені в ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування", затверджених Мінрегіоном наказом від 25.01.2013 № 24. Згідно державним стандартом в лабораторіях де розташовані робочі місця, необхідно забезпечувати оптимальні параметри мікроклімату: температура повітря повинна знаходитися в межах 22–25 °С, відносна вологість повітря повинна коливатися від 40 % до 60 %, а швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с [18].

Відповідно до пункту 4.3 Державних санітарних норм і правил 3.3.2.007-98, робочі місця слід розташовувати так, щоб природне світло переважно надходило з лівого боку, і необхідно уникати прямого потрапляння світла в очі. Розміщення штучного освітлення у лабораторії повинно виконуватись за допомогою системи загального рівномірного освітлення, як визначено в пункті 3.2.2 Державних санітарних норм і правил 3.3.2.007-98 [18].

Дослідження проводилось в лабораторії загальною площею 24 м<sup>2</sup>, в якій ввімкнено 6 люмінесцентних лампи. Визначення штучного освітлення відбувається за формулою (4.1) питомої потужності:

$$P = \frac{E}{A}, \quad (4.1)$$

де  $E$  – загальна світлова потужність, в лм;

$A$  – площа, яка освітлюється, в м<sup>2</sup>.

Підставивши дані лабораторії отримаємо:

$$P = \frac{360}{24} = 15 \frac{Вт}{м^2}. \quad (4.2)$$

З отриманих результатів робимо висновок, що рівень штучного освітлення задовольняє вимоги державного стандарту санітарних норм.

#### 4.4 Висновки до 4 розділу

В даній кваліфікаційній роботі було розроблено інтерфейс оператора для керування платформою для розмінування. Даний інтерфейс представляє собою веб-сторінку, яка має поле з трансляцією з відеокамери ESP32-Cam, за ним йдуть чотири поля з отриманими даними ультразвукових датчиків. Далі

йде чотири клавiші для керування перемiщенням роботизованою платформою. I в кiнцi сторiнки розташованi три регулятори, якi змiнюють значення вiд 0 до 180° та керують манiпулятивною частиною роботизованої платформи.

В даному роздiлi було проведено експериментальне дослiдження на взаємозв'язок освiтленостi вiд якостi отриманої картинки, для знаходження вибухонебезпечних об'єктiв. Дослiдження проводилась при рiзному освiтленi: найкращому освiтленi, середньому та поганому освiтленi i на рiзній вiдстанi камери ESP32-Cam вiд вибухонебезпечного об'єкта, на вiдстанi 50 см, 100 см, 150 см та 200 см. Експеримент виявив, що знаходження об'єктiв рiзного розмiру на вiдстанi 50 см, можна при всiх трьох освiтленнях, так само як i при 100 см, а вже при 150 см для оператора при поганому освiтленi це буде складною задачею, бо видимiсть об'єктiв, особливо якщо данi вибуховi пристрої поєднується з навколишнiм середовищем їх помiтити майже не можливо. На вiдстанi 200 см погана видимiсть не тiльки при поганому освiтленi, а й при середньому. Тому найкраще всього мобiльна роботизована платформа працюватиме в години коли є гарне освiтлення територiї.

I в кiнцi було проведено охорону працi в лабораторiї, так як сам експеримент було проведено в лабораторiї.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз сучасних технологічних рішень для роботизованих платформ розмінування, проаналізовано технічні особливості роботизованих платформ для розмінування та існуючі рішення, проведено їх порівняння. Проведено аналіз існуючих методів пошуку вибухонебезпечних об'єктів для роботизованих платформ. Після проведеного аналізу було розроблено загальну структурну схему роботизованої платформи, проведено обґрунтування та вибір апаратних модулів для системи керування. Розроблено структурну схему підключення та розраховано продуктивність плати. Наступним етапом було розроблено алгоритм управління, алгоритм роботи з оператором та узагальнений алгоритм. Розроблено функції передачі команд від оператора. Далі було розроблено інтерфейс керування мобільною платформою та проведено експериментальні дослідження, проаналізовано отримані результати.

Експеримент проводився при використанні трьох видів освітленості, при найкращому, середньому та поганому освітлені. В результаті отриманого експериментального дослідження можна зробити висновки, що час проведення пошукових робіт краще всього робити в день, приблизно з 11:00 до 16:00 в літні години, в зимню пору року з 11:00 до 15:00. Вранці, ефективність платформи буде на 30% гірше, через середню освітленість, а ефективність платформи вже при поганому освітлені вже на 70% буде гірше. Експеримент показав, що об'єкти невеликих розмірів на відстані 100 см чітко видні, при найкращому, середньому та поганому освітлені, але слід зазначити, що якщо об'єкт буде одного кольору з навколишнім середовищем яке його оточує то знайти його буде важко.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320с.

3. 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.

4. Коноваленко К. Розробка структурної схеми мобільної маніпуляційної платформи для розмінування / Коноваленко К. // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023: Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – Part 1. –336р. Р. 95-99.

5. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.

6. Кравчук, А. Р. (2023). Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. *Технічна інженерія*, (1 (91)), 50-56.
7. Kazerouni, I. A., Fitzgerald, L., Dooly, G., & Toal, D. (2022). A survey of state-of-the-art on visual SLAM. *Expert Systems with Applications*, 205, 117734.
8. Федоров, Д. (2022). Робототехнічні засоби пересування. In *Актуальні питання сучасної інформатики: матеріали доп. VI Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю*, 18-19 листоп. 2021 р. (No. 9, pp. 177-180).
9. Труш, О. О. Перспективи використання інтернету нового покоління (5G) в робототехніці. Редакційна колегія: Литовченко ОВ (відповідальний редактор); Шеїн ТВ (заступник відповідального редактора), 176.
10. Кирилович, В. А., Мельничук, П. П., Кравчук, А. Р., & Яновський, В. А. (2022). Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації.
11. Ruban, V., Ogurtsova, T., Pochanin, G., Capineri, L., Bossi, L., Bechtel, T., & Crawford, F. (2022, October). Object coordinate determination by the impulse GPR with a Tx+ 4Rx antenna system. In *19th International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. 155-158). Society of Exploration Geophysicists.
12. Chakraborty, S., Elangovan, D., Govindarajan, P. L., ELnaggar, M. F., Alrashed, M. M., & Kamel, S. (2022). A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots. *Sustainability*, 14(15), 9156.
13. de Cubber, G.; Balta, H.; Lietart, C. Teodor: A Semi-Autonomous Search and Rescue and Demining Robot. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 658, 599–605.
14. Hemapala, M.; Belotti, V.; Michelini, R.; Razzoli, R. Humanitarian demining: Path planning and remote robotic sweeping. *Ind. Robot. Int. J. Robot. Res. Appl.* 2009, 36, 146–156.
15. JP 3-42 Joint Explosive Ordnance Disposal. Available online: <http://www.jcs.mil> (accessed on 16 January 2022).

16. Tojo, Y.; Debenest, P.; Fukushima, E.F.; Hirose, S. Robotic System for Humanitarian Demining Development of Weight-Compensated Pantograph Manipulator. In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, 26 April–1 May 2004; pp. 2025–2030.

17. Petrișor, S.M.; Simion, M. Example of good practices regarding the organological construction of a robotized technological product for humanitarian engineering operations. *Acta Tech. Napoc. Ser. Appl. Math. Mech. Eng.* 2021, 64, 395–402.

18. Emanuela Elisa Cepolina , Alberto Parmiggiani , Carlo Canali, Ferdinando Cannella. Disarmadillo: an open source, sustainable, robotic platform for humanitarian demining. *ACTA IMEKO ISSN: 2221-870X* September 2022, Volume 11, Number 3, 1 – 9.

19. H. Garbino, The impact of landmines and explosive remnants of war on food security: the Lebanese case, *The Journal of Conventional Weapons Destruction* 23(2) (2019). Online [Accessed 28 August 2022].

20. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.

21. Viktoriia Bortnikova, Vladyslav Yevsieiev, Iryna Botsman, Igor Nevliudov, Kostiantyn Kolesnyk, Nazariy Jaworski. Queries classification using machine learning for implementation in intelligent manufacturing // Chapter 6 in Monograph «Methods and tools in CAD – selected issues». – Białystok (Poland): Publishing House of Białystok University of Technology. – 2021. – PP. 63-74.

22. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.

23. Igor Nevliudov; Vladyslav Yevsieiev; Svitlana Maksymova; Natalia Demska; Kostyantyn Kolesnyk; Olha Miliutina. (2022). Object Recognition for a

Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 07-11 September. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906.

24. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2022). A ROBOTIC PROSTHETIC A CONTROL SYSTEM AND A STRUCTURAL DIAGRAM DEVELOPMENT. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113–114. <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.33>.

25. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків: 2020. С. 257.

26. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Diversity and Inclusion in Scientific Area», Value 140, P.648-651.

27. Модуль ESP32-CAM з камерою OV2640, WiFi и Bluetooth // RoboStore, 2023. URL: <https://www.robostore.com.ua/modul-esp32-cam-bluetooth-wi-fi-esp32-s-kameroj-ov2640/> (дата звернення : 5.10.2023).

28. Модуль камери Arducam OV7670 0,3 мегапікселя для плат Arduino // ArduCam, 2023. URL: <https://www.arducam.com/product/arducam-ov7670-0-3-megapixel-camera-module-for-arduino-boards/> (дата звернення : 5.10.2023).

29. Raspberry Pi Camera Module 3 // Raspberry Pi, 2023. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-3/> (дата звернення : 5.10.2023).

30. Hegedűs, É. 2022. Geopolitics and geoeconomics in funding humanitarian mine action – the case of Angola. Insights into Regional Development, 4(4), 166-183. [http://doi.org/10.9770/IRD.2022.4.4\(10\)](http://doi.org/10.9770/IRD.2022.4.4(10)).

31. Сервопривід SG90 2кг // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod416-servoprivod-sg90-2kg> (дата звернення : 8.10.2023).

32. Сервопривід Tower Pro MG90S micro servo 14g // Mini-Tech, 2023. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/servomotor-mg90> (дата звернення : 8.10.2023).
33. Серводвигун PZ-15320 // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/cat21-servoprivodi> (дата звернення : 8.10.2023).
34. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod182-ultrazvukovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04> (дата звернення : 10.10.2023).
35. Датчик відстані ультразвуковий US-100 // Mini-Tech, 2023. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-us-100> (дата звернення : 10.10.2023).
36. Arduino UNO R3 (CH340) // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod2610-arduino-uno-r3-ch340> (дата звернення : 15.10.2023).
37. Мотор з редуктором 1:48 // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod3195-motor-s-reduktorom-148-odno-osevoi> (дата звернення : 18.10.2023).
38. Драйвер двох двигунів на L298N // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod406-draiver-dvyh-dvigateli-na-l298n> (дата звернення : 23.10.2023).
39. Акумулятор LP Li-ion 18650 36V - 20.4 Ah // Lop, 2023. URL: <https://logicpower.ua/tovary-kotorye-snyali-s-proizvodstva/akkumulyator-lp-li-ion-18650-36v-20-4-ah-bms-30a-20a> (дата звернення : 5.10.2023).
40. Плати BMS // LiitoKala, 2023. URL: <https://liitokala.com.ua/product-category/accessories/bms/> (дата звернення : 5.10.2023).
41. Лінійний стабілізатор напруги AMS1117 3.3V 1A // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod740-Stabilizator-napryajeniya-3-3V-1A> (дата звернення : 5.10.2023).