

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)

РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ
МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ

(тема)

Виконав студент 2 курсу, групи КТРСм-22-2
Збітнев Михайло Іванович
(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 Цимбал О.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2023 р.

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.

22.01.2024

 Збітнєв М. І.

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 _____ Збітнєву Михайлові Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)Тема роботи: Розробка програмно-апаратних засобів сенсорної системи мобільної робототехнічної платформи

Затверджена наказом по університету від _____ №1288Ст від 03.11.2023

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 11.01.2024р _____

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Середовище розробки Arduino IDE, Visual Studio Code; 3.2 ESP32-CAM; 3.3 Ультразвуковий датчик дальності HC-SR04; 3.4 Металошукач LC Technologies

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз існуючих сенсорних систем робототехнічних платформ для розмінування; 4.3 Розробка архітектури сенсорної системи мобільної платформи для гуманітарного розмінування; 4.4 Розробка апаратно-програмного забезпечення сенсорної системи мобільного робота для завдань розмінування; 4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4-10 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 мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування	01.09.2023-13.09.2023	виконано
2	Аналіз технічного завдання	14.09.2023-16.09.2023	виконано
3	Аналіз програмного забезпечення сенсорних систем	17.09.2023-25.09.2023	виконано
4	Розробка архітектури сенсорної системи	26.09.2023-12.10.2023	виконано
5	Розробка схеми підключення сенсорної системи	13.10.2023-05.11.2023	виконано
6	Розроблення лабораторного макету	06.11.2023-20.11.2023	виконано
7	Експериментальне дослідження та аналіз отриманих результатів	21.11.2023-06.12.2023	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	07.12.2023-31.12.2023	виконано
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом	10.01.2023	виконано
10	Подання роботи на рецензію	11.01.2023	виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	12.01.2023	виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	15.01.2023	виконано

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент _____
(підпис)

Збітнєв М.І.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

проф. Цимбал О.М.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 99 с., 7 табл., 27 рис., 3 дод., 26 джерел.

СЕНСОРНІ СИСТЕМИ, МОБІЛЬНА РОБОТОТЕХНІЧНА ПЛАТФОРМА, ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ, ГУМАНІТАРНЕ РОЗМІНУВАННЯ, АВТОНОМНІСТЬ.

Мета роботи – розробка макету сенсорної системи роботизованої платформи для покращення функцій гуманітарного розмінування.

Об'єкт дослідження – процеси керування робототехнічними платформами.

Предмет дослідження – програмно-апаратні засоби робототехнічної платформи для гуманітарного розмінування.

В даній магістерській кваліфікаційна роботі приведено аналіз мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування. Проведений аналіз апаратного і програмного забезпечення сенсорних систем роботизованих платформ для розмінування. На базі проведеного аналізу було розроблено структурну схему архітектури сенсорної системи.

Було спроектовано і розроблено лабораторний макет. Також було проведено моделювання параметрів системи керування сенсорної системи. Було проведено експеримент, отримані результати симуляції були досліджені та описані.

Результати кваліфікаційної роботи описані в статті, яка знаходиться в гугл академії.

ABSTRACT

Explanatory note: 99 pages, 7 tables, 27 figures, 3 app, 26 sources.

SENSOR SYSTEMS, MOBILE ROBOTIC PLATFORM, SOFTWARE AND HARDWARE, HUMANITARIAN DEMINING, AUTONOMY.

The purpose of the research is development of a layout of a sensor system of a robotic platform to improve the functions of humanitarian demining.

The object of research is robotic platform management processes.

The subject of research is software and hardware of the robotics platform for humanitarian demining.

In this master's attestation work presents an analysis of mobile robotic platforms for humanitarian demining is given. An analysis of the hardware and software of sensor systems of robotic demining platforms was carried out. Based on the analysis, a structural diagram of the architecture of the sensor system was developed.

A laboratory layout was designed and developed. The parameters of the control system of the sensor system were also modeled. An experiment was conducted, the obtained simulation results were investigated and described.

The results of the qualification work are described in the article, which is located in Google Academy.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих сенсорних систем робототехнічних платформ для розмінування.....	12
1.1 Аналіз мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування.....	12
1.2 Апаратне забезпечення сенсорних систем	17
1.3 Програмне забезпечення сенсорних систем.....	25
1.4 Висновки до першого розділу.....	31
2 Розробка архітектури сенсорної системи мобільної платформи для гуманітарного розмінування	32
2.1 Розробка архітектури сенсорної системи	32
2.2 Вибір апаратних модулів для реалізації сенсорної системи.....	33
2.3 Моделювання параметрів системи керування сенсорної системи	42
2.4 Розробка схеми підключення сенсорної системи	47
2.5 Розроблення лабораторного макету	48
2.6 Висновки до другого розділу	49
3 Розробка апаратно-програмного забезпечення сенсорної системи мобільного робота для завдань розмінування	51
3.1 Обґрунтування та вибір середі розробки	51
3.2 Розробка загального алгоритму роботи сенсорної системи	53
3.3 Експериментальне дослідження та аналіз отриманих результатів.....	55
3.4 Реалізація функцій програмного забезпечення сенсорної системи.....	57
3.5 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.....	59
3.6 Висновки к третьому розділу.....	61
Висновки	63

Перелік джерел посилань	64
Додаток А Апробація результатів наукових досліджень.....	67
Додаток Б Основний файл прошивки	75
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

НВР – нерозірвані вибухові речовини;

GPR – підповерхневе радіолокаційне зондування (англ. Ground Penetrating Radar);

НМІ – людино-машинний інтерфейс (англ. Human-machine interface);

IoT – інтернет речей (англ. The Internet of Things);

PWM – широтно-імпульсна модуляція (англ. Pulse-width modulation).

ВСТУП

У різноманітному світі технологій та автоматизації, мобільні робототехнічні платформи набувають все більшого значення у різних галузях нашого життя. Від промислових виробництв до побутових послуг, вони визначають нові стандарти ефективності та функціональності. Однак, незважаючи на значний прогрес у цьому напрямку, існують питання, які вимагають подальшого дослідження та вдосконалення. Саме тому розробка програмно-апаратних засобів для сенсорних систем мобільних робототехнічних платформ є актуальною.

Сучасні вимоги до цих систем включають в себе не лише збільшення їхньої швидкості та точності, але й підвищення рівня їхньої адаптивності та інтерактивності з навколишнім середовищем.

З одного боку, користувачі очікують від мобільних роботів ефективної взаємодії, враховуючи різноманіття ситуацій та завдань. З іншого боку, промислові застосування вимагають високого рівня автономності та безпеки, особливо в умовах збільшеної конкуренції та необхідності оптимізації виробничих процесів.

Розробка програмно-апаратних засобів сенсорних систем мобільних робототехнічних платформ стає ключовим етапом для подолання цих викликів. Забезпечення ефективної інтеграції сучасних сенсорів, оптичних систем та систем штучного інтелекту в одну спритну платформу відкриває необмежені можливості для подальшого розвитку робототехніки.

Такий підхід до розробки дозволяє не лише покращити функціональність мобільних роботів, але й розширює їхню область застосування від промисловості до побутових та навіть медичних сфер. Таким чином, тема розробки програмно-апаратних засобів сенсорних систем мобільних робототехнічних платформ є важливою в контексті постійного стрімкого розвитку та вдосконалення сучасних технологій.

Мета роботи – розробка експериментального макета сенсорної системи роботизованої платформи для гуманітарного розмінування.

Об’єкт розробки – процеси керування робототехнічними платформами.

Предмет розробки – програмно-апаратні засоби робототехнічної платформи для гуманітарного розмінування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сенсорних систем робототехнічних платформ для розмінування;
- розробити архітектуру сенсорної системи мобільної платформи для гуманітарного розмінування;
- розробка апаратно-програмного забезпечення сенсорної системи мобільного робота для завдань розмінування;
- проведення тестування макету;
- проведення експериментальних досліджень.

Магістерська робота оформлена згідно з рекомендаціями [1], та вимогам ДСТУ 3008:2015 [2], а результати даної кваліфікаційної роботи описані в наукових статтях, та їх можна побачити в гугл академії [3].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ

1.1 Аналіз мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування

Гуманітарне розмінування – це процес видалення наземних мін із забруднених територій. Важкість цього завдання полягає у високому ризику побічної шкоди для саперів та їхнього обладнання. Внутрішні експлуатаційні витрати часто змушує саперів відмовитися від завдання до його завершення, роблячи такі області джерелом ризику, особливо для цивільного населення [3].

Розмінування являється важливою гуманітарною діяльністю, яка спрямована на виявлення, нейтралізацію та видалення нерозірваних вибухівок, таких як міни та боєприпаси, з природних або створених людиною об'єктів і територій. Важливість цієї операції важко переоцінити, і вона має декілька ключових аспектів. Ця операція сприяє відновленню безпеки та стабільності на території, де раніше були розкидані міни та боєприпаси. Це дозволяє відновити господарську діяльність і сприяє встановленню миру після війни або конфлікту. Розмінування забезпечує доступ до ресурсів та інфраструктури, які можуть бути недоступними через небезпеку вибухів. Це допомагає відновити життєдіяльність на територіях, які раніше були відокремлені від світу через небезпеку. Ця діяльність також сприяє гуманітарним операціям, де групи допомоги та гуманітарні організації намагаються надати допомогу населенню, що постраждало від конфлікту або природних катастроф. Розмінування сприяє збереженню цінної культурної спадщини, яка може бути під загрозою через нерозірвані вибухівки. Міни можуть завдати шкоди історичним пам'ятникам, археологічним розкопкам та іншим об'єктам культурної важливості.

Розмінування також сприяє відновленню соціального та економічного розвитку на післяконфліктних територіях. Це сприяє економічному відновленню, залученню інвестицій і підвищенню якості життя місцевого населення.

Усі ці аспекти підкреслюють важливість Розмінування в сучасному світі, де конфлікти та природні катастрофи можуть залишити за собою небезпечні наслідки для життя і безпеки людей. Розмінування є важливою складовою гуманітарної роботи, і воно вимагає співпраці різних галузей науки, технологій і гуманітарної допомоги для досягнення мети – безпечного та стабільного світу.

Розмінування, спрямоване на усунення небезпеки вибуху мін і інших вибухових пристроїв для забезпечення безпеки гуманітарних працівників, мирного населення та гуманітарних операцій, відрізняється від традиційного розмінування.

Мета гуманітарного розмінування полягає в забезпеченні безпеки інтересів гуманітарних дій та мирного населення, в той час як звичайне розмінування, як правило, спрямоване на виконання військових завдань.

Гуманітарне розмінування використовує різні методи та технології, такі як ручна робота, роботизовані системи та спеціалізовані сенсори для виявлення та безпечного усунення вибухонебезпечних об'єктів. У той час як звичайне розмінування може використовувати більше військових засобів та підходів, включаючи вибухові пристрої та ручне розмінування.

Мобільні робототехнічні платформи для розмінування – це спеціалізовані роботи, призначені для виявлення, нейтралізації та видалення нерозірваних вибухівок (НВР) та інших вибухових пристроїв з небезпечних об'єктів і територій. Вони використовуються в різних сферах, включаючи військовий, гуманітарний та цивільний контексти, і мають на меті забезпечити безпеку і зменшити ризики для людей, які здійснюють розмінування. Існує два основних типи таких платформ.

Телекеровані – це роботи, які оператор може керувати з використанням дистанційного керування. Вони можуть бути надійними для видалення НВР та інших вибухових пристроїв з небезпечних об'єктів.

Популярними рішенням для телекерованого робота для гуманітарного розмінування місцевості є робот TEODOR компанії Telerob [4]. Він є однією з численних телекерованих мобільних роботизованих платформ, які використовуються для гуманітарного розмінування і безпеки на небезпечних територіях. Він допомагає зменшити ризики для життя розмінувачів та забезпечує ефективне видалення вибухових пристроїв з небезпечних місць. Він оснащений рукою маніпулятором яка дозволяє виконувати різні завдання, включаючи виявлення, розмінування. Також він обладнаний різноманітними сенсорами і камерами, які допомагають оператору виявляти і аналізувати вибухові пристрої та небезпечні об'єкти. Ця інформація передається оператору в реальному часі. Робот TEODOR представлений на рисунку 1.1.

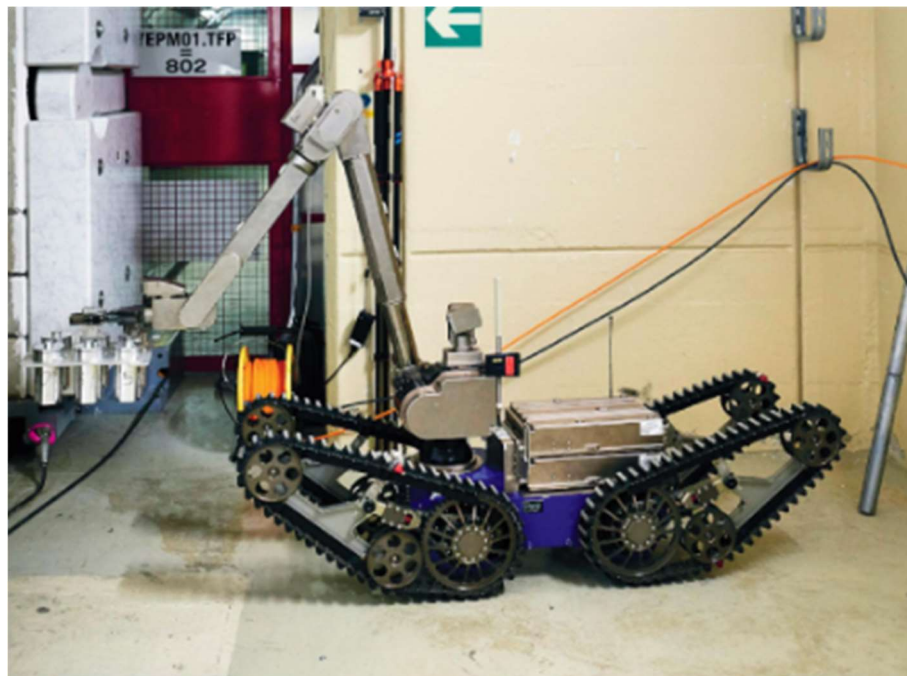


Рисунок 1.1 – Телекерована роботизована платформа TEODOR Telerob [4]

Автономні роботи здатні виконувати завдання розмінування автономно без прямого втручання оператора. Вони зазвичай обладнані різними

сенсорами та штучним інтелектом для навігації та виявлення НВР.

Прикладом такої платформи є Mine Kafon Drone це автономний безпілотник, який використовується для виявлення та картографування мін. Він оснащений набором камер і сенсорів, які дозволяють виявляти міни на великій площі. Після виявлення мін, він може надавати дані для подальшого розмінування [5]. Безпілотна бортова система розмінування використовує триетапний процес для автономного картографування, виявлення та підриву наземних мін. Він літає над потенційно небезпечними районами, створюючи 3D-карту за допомогою 3D-камери, GPS і комп'ютера. Потім він використовує металошукач, щоб точно визначити розташування мін і додати геотеги. Потім безпілотник може розмістити детонатор над мінами за допомогою маніпулятора, а потім відлетіти на безпечну відстань і підірвати міну [6]. Автономна платформа для розмінування Mine Kafon Drone представлена на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Автономна платформа для розмінування Mine Kafon Drone [5]

Робот Scoorx V60 є однією з передових технологічних розробок в області мобільних легких роботів. Цей квадрупедальний робот вирізняється

своєю здатністю до легкості руху та високої маневреності, завдяки використанню прогресивних технологій у конструкції та управлінні.

Однією з ключових характеристик Scoorex V60 є його невелика маса та компактні розміри, що роблять його ідеальним для використання в умовах обмеженого простору або в труднодоступних місцях. Застосування легких матеріалів у конструкції дозволяє роботу ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем та забезпечує йому високу портативність [7].

Рух Scoorex V60 забезпечується чотирма ногами, кожна з яких оснащена передовими електричними приводами, що забезпечують велику точність та ефективність керування. Інтегрований системами сенсорів та алгоритмами обробки даних, робот може ефективно адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, реагуючи на перешкоди та навіть непередбачувані ситуації.

Застосування технології Scoorex V60 включає, але не обмежується, робототехнічні дослідження, пошук і рятування в умовах небезпеки, та використання у важкодоступних областях, де звичайні транспортні засоби не можуть легко проникнути. Висока ступінь автономії та взаємодії із середовищем роблять Scoorex V60 перспективним рішенням для широкого спектру застосувань у сучасному робототехнічному виробництві.

Використання робота Scoorex V60 в гуманітарних операціях розмінування видається перспективним напрямком досліджень і розробок. Цей квадрупедальний робот, з високою маневреністю та здатністю пристосовуватися до різноманітних умов, може стати цінним інструментом для виявлення та усунення небезпечних вибухонебезпечних об'єктів у зоні конфлікту. Електричні приводи та вбудовані системи сенсорів робота дозволяють ефективно виявляти потенційно небезпечні об'єкти та адаптуватися до змін у середовищі. Крім того, висока ступінь автономії Scoorex V60 може зменшити ризик для людського персоналу, дозволяючи йому працювати в зоні можливого ризику без прямого втручання людини. Робот Scoorex V60 представлено на рисунку 1.3.

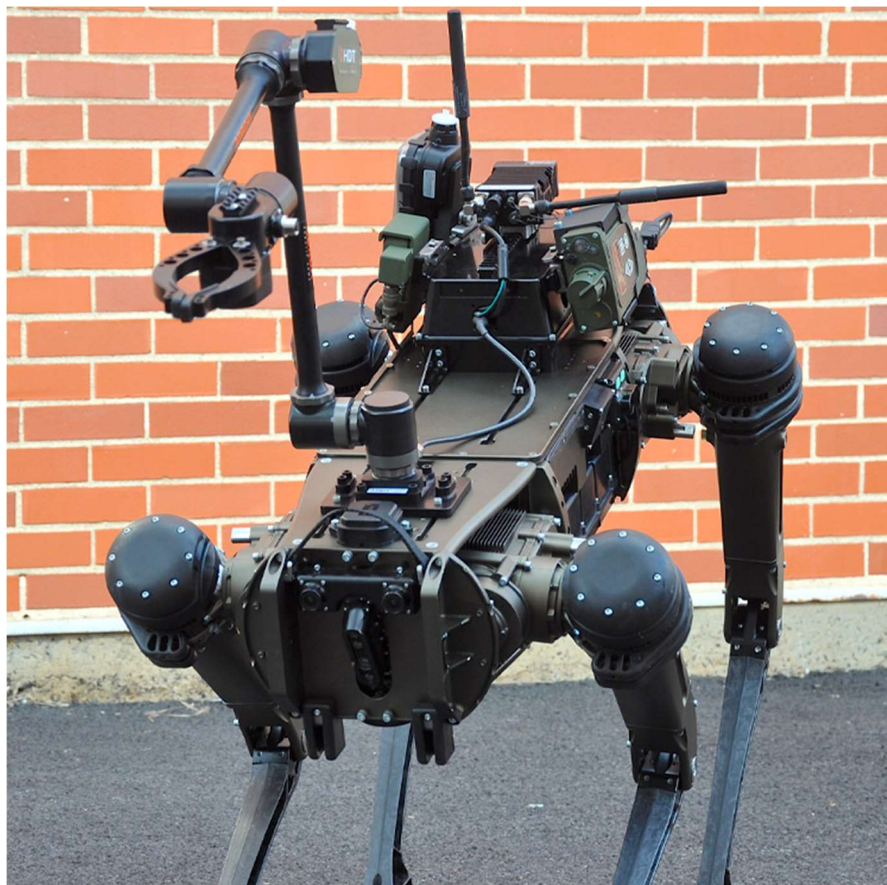


Рисунок 1.3 – Робот Scoorix V60 [7]

Основними завданнями таких платформ є виявлення, нейтралізація та видалення. Роботи для розмінування можуть використовувати різні типи сенсорів, такі як металошукачі, радіодетектори та камери, для виявлення НВР.

Деякі роботи можуть бути обладнані засобами нейтралізації, такими як знешкодження вибухів або віддалення НВР. Також вони можуть використовувати механізми для видалення НВР з небезпечних зон, забезпечуючи безпеку для операторів [8].

1.2 Апаратне забезпечення сенсорних систем

Обрання датчиків для сенсорної системи робототехнічної платформи для розмінування – це критичний аспект розробки подібних систем, оскільки від них залежить не тільки ефективність, але й безпека операцій. Для

досягнення успіху у виборі датчиків, потрібно враховувати ряд ключових факторів.

Перш за все, слід враховувати конкретні завдання і вимоги, які ставляться перед роботом для розмінування. Це може включати виявлення різних типів вибухонебезпечних предметів, включаючи міни, боєприпаси і пастки. Кожен тип предметів може вимагати використання різних датчиків або їх комбінацій. Далі слід враховувати характеристики робочого середовища. Роботи з розмінуванням можуть відбуватися в різних умовах, включаючи сухий і пиловитий ґрунт, водні ділянки, ліси тощо. Вибір датчиків повинен відповідати цим умовам і забезпечувати надійну роботу в будь-яких ситуаціях [9].

Важливо також враховувати точність та надійність датчиків. Помилка в визначенні місцезнаходження небезпечних об'єктів може призвести до трагічних наслідків. Також потрібно враховувати швидкість і здатність системи до обробки і аналізу інформації. Для досягнення найкращих результатів, може бути необхідно використовувати комбінацію різних типів датчиків, які доповнюють один одного і забезпечують більш точну та надійну інформацію. Наприклад, використання металошукачів, інфрачервоних датчиків і лідарів разом може значно підвищити здатність платформи до виявлення небезпечних об'єктів.

Загалом в робототехнічних системах розмінування використовують наступні датчики:

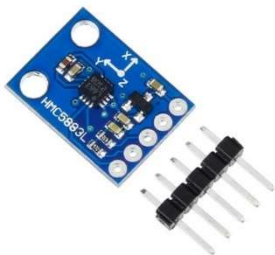
- металошукачі;
- газові детектори;
- георадари;
- ультразвукові сенсори;
- теплові камери;
- датчики дальності.

Honeywell HMC5883L є компактним магнетометром інтерфейсом I2C, який відзначається високою точністю та низькою споживаною потужністю.

Цей датчик має точність до 1,2 мілігауса та може вимірювати магнітне поле зі швидкістю до 160 Гц. Однією з його особливостей є компактний дизайн, що робить його ідеальним для малих робототехнічних платформ. Магнетометр Honeywell HMC5883L представлений на рисунку 2.3 [10].

STMicroelectronics LIS3MDL – це магнетометр з інтерфейсами I2C та SPI, який відзначається високою точністю та робочою швидкістю до 10 кГц. Він має точність до 0,5 мілігауса і включає вбудований температурний сенсор для компенсації температурних змін. Цей магнетометр дозволяє отримувати дані з високою швидкістю і використовується в застосуваннях, де швидкість важлива. Він також надійний та добре підходить для проектів, де важлива стабільність вимірювань. Магнетометр STMicroelectronics LIS3MDL представлений на рисунку 1.4 [10].

Обидва магнетометри мають високу точність, але Honeywell HMC5883L відзначається компактним дизайном та низькою споживаною потужністю, тоді як STMicroelectronics LIS3MDL надає вищу швидкість вимірювань та вбудований температурний сенсор.



а)

а) Honeywell HMC5883L [10];



б)

б) STMicroelectronics LIS3MDL [11]

Рисунок 1.4 – Магнетометри

Velodyne VLP-16 – це лазерний датчик відстані, який володіє 16 лазерними променями для вимірювання відстані до об'єктів у навколишньому

просторі. Він відомий своєю високою роздільною здатністю і великою дальністю вимірювання, а також точністю даних. Датчик здатний збирати дані на великій відстані і з високою швидкістю, що робить його ідеальним для задач обробки зображень та картографії. Velodyne VLP-16 вимірює відстань до об'єктів з точністю приблизно ± 3 сантиметри і може працювати на відстані до 100 метрів. Цей датчик також має високий ступінь надійності та стійкості до зовнішніх впливів. Лазерний датчик відстані Velodyne VLP-16 представлений на рисунку 1.5 [13].

Sick LMS291 – це інший лазерний датчик відстані, який використовується для вимірювання відстані до об'єктів в навколишньому просторі. У порівнянні з Velodyne VLP-16, він має меншу кількість лазерних променів (180° або 270°), але відзначається високою точністю вимірювань, приблизно ± 5 міліметрів. Sick LMS291 дозволяє вимірювати відстань до об'єктів на відстані до 80 метрів і має стійкість до пилу і вологи, що робить його підходящим для використання в різних погодних умовах та екологічних умовах. Він також відомий своєю високою надійністю і тривалим терміном служби. Лазерний датчик відстані Sick LMS291 представлений на рисунку 1.5 [12].

Обидва лідари відомі своєю високою точністю вимірювань і здатністю створювати точні 3D-карти навколишнього простору. Вибір між ними залежатиме від конкретних вимог до точності, дальності та обсягу вимірювань, а також від бюджету і умов експлуатації. Velodyne VLP-16 має більше лазерних променів і більшу дальність вимірювань, що робить його відмінним вибором для додатків, де потрібна велика точність та дальність. У той час як Sick LMS291 може бути більш практичним в пилових чи вологих умовах роботи.



а)



б)

а) Sick LMS291 [12];

б) Velodyne VLP-16 [13]

Рисунок 1.5 – Лазерні датчики відстані

Серед сучасних камер, використовуваних в мобільних робототехнічних платформах для розмінування, особливо важливі два приклади: FLIR Boson і Intel RealSense D435. Обидва вони відзначаються високою роздільною здатністю та інноваційними особливостями, проте вони призначені для різних завдань та мають різні переваги.

FLIR Boson – це термовізор, що працює в інфрачервоному діапазоні. Він відзначається високою роздільною здатністю зображення (640x512 пікселів) і можливістю роботи в діапазоні температур від 7,5 мікрон до 14 мікрон, що робить його ідеальним для пошуку об'єктів, які виділяють тепло. Додатково, FLIR Boson пропонує швидкість кадрів до 60 Гц, що дозволяє робити високоякісні зйомки при рухомому роботі. Іншою важливою особливістю є компактний дизайн, що спрощує інтеграцію в робототехнічну платформу. Термовізор FLIR Boson представлений на рисунку 1.6 [13].

Intel RealSense D435, з іншого боку, це камера з вбудованим датчиком глибини. Вона надає зображення в роздільній здатності (1280x720 пікселів) та може вимірювати глибину об'єктів від робота до 10 метрів. Ця функція дозволяє роботу точно визначати відстані до перешкод і об'єктів, що є важливим для уникнення столкнуг та навігації в складних умовах. Окрім

того, Intel RealSense D435 має високу швидкість кадрів – до 90 кадрів в секунду, що дозволяє реальному часу обробки і аналізу даних. Камера Intel RealSense D435 представлена на рисунку 1.6 [14].

Загалом, обираючи між FLIR Boson і Intel RealSense D435, важливо враховувати конкретні завдання та вимоги до робототехнічної системи. Якщо робот повинен виявляти теплові джерела, FLIR Boson буде найкращим вибором. З іншого боку, якщо точне вимірювання глибини і відстаней важливо, Intel RealSense D435 може бути більш підходящим варіантом.



а) FLIR Boson [13];
б) Intel RealSense D435 [14]

Рисунок 1.6 – Камери

В сучасних системах роботів для гуманітарного розмінування георадари стали важливим елементом сенсорної системи, забезпечуючи високу точність та надійність виявлення вибухонебезпечних об'єктів під поверхнею землі. Георадари використовуються для аналізу ґрунту та підґрунтових шарів, що дозволяє роботам ефективно прослідковувати та локалізувати потенційні небезпеки.

Однією з ключових переваг використання георадарів є їхня здатність проникати під поверхню ґрунту та реєструвати різні фізичні властивості, такі як щільність та електрична провідність. Це дозволяє роботам виявляти та

аналізувати об'єкти, які можуть залишитися непоміченими на поверхні, забезпечуючи більш повне виявлення вибухонебезпечних об'єктів.

Георадарні дані дозволяють отримувати інформацію про структуру та глибину підземних об'єктів, допомагаючи визначити їхню природу та розмір. Це особливо важливо в контексті розмінування, оскільки роботи повинні уникати пошкодження вибухових предметів під час їх виявлення та усунення.

Крім того, георадарні дані можуть бути інтегровані в комплексні сенсорні системи, сприяючи покращенню здатностей робота в реальному часі. Застосування георадарів у сенсорних системах роботів для гуманітарного розмінування є важливим кроком у напрямку розвитку технологій, спрямованих на підвищення безпеки та ефективності у виявленні та усуненні вибухонебезпечних об'єктів [15].

Серед розмаїття георадарів, призначених для використання в сенсорних системах роботів для гуманітарного розмінування, слід виділити декілька важливих моделей, що відзначаються високою продуктивністю та надійністю.

Один із прикладів – георадар GPR (Ground Penetrating Radar) SIR-30 від фірми GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.). Цей георадар відзначається високою чутливістю та роздільною здатністю, дозволяючи виявляти об'єкти різної природи та розміру на різних глибинах під поверхнею. Застосування такого георадару дозволяє роботам з високою точністю аналізувати підземний простір та виявляти потенційно небезпечні об'єкти. Геодар GPR GSSI представлений на рисунку 1.7 [16].



Рисунок 1.7 – Геодар GPR GSSI [16]

Іншим прикладом є Raptor 40/80 GPR від фірми IDS GeoRadar, який використовує високочастотний електромагнітний сигнал для проникнення під землю. Його висока частота сприяє отриманню детальних зображень структури ґрунту та можливих об'єктів під ним, що робить його ефективним інструментом для виявлення вибухонебезпечних предметів. Геодар Raptor 40/80 GPR представлений на рисунку 1.8 [17].



Рисунок 1.8 – Геодар Raptor 40/80 GPR [17]

Крім того, тривалий досвід використання георадарів в сенсорних системах для роботів для розмінування підтверджує ефективність моделей, таких як MALA ProEx та Leica DS2000, які володіють високою швидкістю сканування та розширеними можливостями аналізу отриманих даних. Геодар MALA ProEx представлений на рисунку 1.9 [18].



Рисунок 1.9 – Геодар MALA ProEx [18]

Ці приклади георадарів вказують на те, що висока технічна специфікація та широкий функціонал дозволяють їм ефективно використовуватися у складних умовах гуманітарних місій розмінування, забезпечуючи точне та надійне виявлення підземних загроз.

1.3 Програмне забезпечення сенсорних систем

Програмне забезпечення сенсорних систем відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного та точного функціонування сучасних роботичних систем. Сенсори взаємодіють із навколишнім середовищем, збираючи різноманітні дані, які стають основою для прийняття рішень та реагування робота на зміни у оточуючому середовищі [19].

Програмне забезпечення сенсорних систем включає в себе ряд алгоритмів обробки сигналів, машинного бачення та інтелектуального аналізу

даних. Ці алгоритми розвиваються для виявлення, класифікації та інтерпретації інформації, отриманої від сенсорів, що дозволяє роботам взаємодіяти з навколишнім середовищем і виконувати завдання з високою точністю.

Однією з основних функцій програмного забезпечення сенсорних систем є обробка інформації в реальному часі. Це важливо для швидкого та адаптивного реагування робота на зміни у середовищі, а також для забезпечення безперебійної взаємодії у реальних умовах експлуатації.

Забезпечення надійності та стійкості системи в умовах невизначеності відіграє також значущу роль. Програмне забезпечення повинно враховувати різноманітні умови та можливі помилки сенсорів, забезпечуючи стабільну та надійну роботу системи.

Нарешті, розвиток програмного забезпечення сенсорних систем є постійним процесом, оскільки нові технології та методи обробки даних постійно вдосконалюються. Це сприяє подальшій оптимізації робототехнічних систем та розширенню їхніх можливостей у різних областях застосування.

Використання мови програмування C++ в сенсорних системах роботизованих платформ визначається рядом вагомих факторів, які включають в себе ефективність, гнучкість та можливості оптимізації, що є важливими у вимогливих відносно ресурсів та реального часу додатках.

Мова програмування C++ славиться своєю високою продуктивністю та ефективністю в роботі з ресурсами комп'ютера. В сенсорних системах роботів, де обчислювальні обтяження можуть бути значними, оптимізований код на C++ може забезпечити швидку обробку сенсорних даних та ефективне використання обчислювальних ресурсів [20].

Гнучкість C++ вказує на можливість його використання для розробки різноманітних компонентів сенсорних систем, починаючи від обробки сигналів та взаємодії з апаратним забезпеченням до реалізації алгоритмів

машинного навчання. Ця гнучкість дозволяє інженерам створювати різнобічні та високопродуктивні робототехнічні рішення.

Додатковим аспектом використання C++ є його можливості оптимізації та низькорівневого програмування. Це особливо важливо для сенсорних систем роботів, де ефективне використання апаратних ресурсів та забезпечення реального часу мають велике значення. Можливості мови C++ забезпечують інженерам можливість тонкої настройки та оптимізації коду для досягнення оптимальної продуктивності в реальному часі.

Узагальнюючи, використання мови програмування C++ в сенсорних системах роботизованих платформ виправдовується її ефективністю, гнучкістю та можливостями оптимізації, що дозволяють розробникам створювати продуктивні та надійні системи для різноманітних завдань у сучасній робототехніці.

Використання мови програмування MicroPython у сенсорних системах роботизованих платформ є обґрунтованим підходом, який набуває популярності у зв'язку зі зростанням інтересу до вбудованих систем та обмежених обчислювальних ресурсів. MicroPython, основана на Python, надає високий рівень абстракції та простоти, сприяючи швидкій розробці та пристосуванню коду для сенсорних систем у робототехніці.

Однією з ключових переваг MicroPython є його легкість вивчення та зрозумілність синтаксису, що робить його привабливим вибором для інженерів, які мають обмежений досвід у вбудованому програмуванні. Це робить мову доступною для широкого кола розробників, включаючи тих, хто спеціалізується на сенсорних системах роботів, але не обов'язково має глибокі знання низькорівневого програмування [21].

Ще однією важливою перевагою MicroPython є його можливість працювати на мікроконтролерах з обмеженими обчислювальними ресурсами, що характерно для сенсорних систем роботів. Мова спеціально адаптована для вбудованих пристроїв і дозволяє ефективно використовувати обмежені ресурси, такі як пам'ять та обчислювальна потужність.

Багато сенсорних систем роботів вимагають великої гнучкості у взаємодії з різноманітними сенсорами та виконання різних завдань. MicroPython дозволяє швидко та легко інтегрувати різні сенсори та виконувати завдання з обробки даних.

Узагальнюючи, використання MicroPython в сенсорних системах роботизованих платформ є перспективним підходом, спрямованим на полегшення розробки та пристосування коду, а також оптимальне використання обмежених ресурсів у вбудованих системах.

Використання мови програмування C# (C-Sharp) у сенсорних системах роботизованих платформ є розумним вибором, оскільки ця мова пропонує високий рівень абстракції, об'єктно-орієнтований підхід та зручний синтаксис, що полегшує розробку та підтримку коду.

Відмінною рисою C# є його інтеграція з платформою .NET, що розширює можливості розробки та дозволяє створювати високоефективні програми для сенсорних систем. .NET Framework надає розгорнуті бібліотеки та інструментарій для роботи з різними аспектами робототехнічних систем, включаючи обробку сигналів, керування рухом та взаємодію з сенсорами.

Один із переваг використання C# полягає у його підтримці реалізації паралельних та асинхронних операцій. У сенсорних системах, де швидка реакція на події є ключовою, така можливість дозволяє оптимізувати використання ресурсів та забезпечує високий рівень реакції роботів на оточуюче середовище.

Іншою важливою характеристикою C# є його крос-платформеність через введення .NET Core та подальших версій. Це робить мову гнучкою для використання у різноманітних сенсорних системах, незалежно від їхньої апаратної платформи.

Крім того, C# володіє зручним інтерфейсом для роботи з різноманітними API, що може бути важливим у взаємодії з різними сенсорами та периферійними пристроями, що використовуються в робототехніці.

Отже, використання C# у сенсорних системах роботизованих платформ дозволяє розробникам швидко створювати, оптимізувати та управляти програмним забезпеченням роботів з високою ефективністю та зручністю.

OpenCV – це відкрите програмне забезпечення для комп'ютерного зору, що відкриває необмежені можливості для застосування в різних галузях технології. Ця бібліотека визначається своєю потужністю та гнучкістю, і однією з цікавих областей використання OpenCV є робототехніка, зокрема робототехнічні платформи для розмінування.

Однією з ключових функцій OpenCV є виявлення об'єктів, яке може бути використано для пошуку та ідентифікації вибухонебезпечних предметів. Завдяки алгоритмам комп'ютерного зору, роботи розмінування можуть аналізувати великі обсяги зображень та виявляти потенційно небезпечні об'єкти на них. Вони також можуть використовувати техніки машинного навчання для поліпшення точності виявлення та розпізнавання об'єктів.

OpenCV також дозволяє роботам розмінування працювати в реальному часі, що дуже важливо при виконанні місій в умовах небезпеки. Роботи можуть негайно реагувати на зміни в оточенні та реалізовувати негайні заходи для усунення загрози.

Узагальнюючи, OpenCV – це потужний інструмент для роботів розмінування, який дозволяє їм ефективно виявляти та ідентифікувати вибухонебезпечні предмети на зображеннях та працювати в реальному часі для забезпечення безпеки військовослужбовців і цивільних осіб. Ця технологія грає важливу роль у зниженні ризику та покращенні результатів роботів для розмінування.

TensorFlow – це відкрите програмне забезпечення для машинного навчання та глибокого навчання, розроблене Google. Відоме своєю потужністю, гнучкістю та високою продуктивністю, TensorFlow став необхідним інструментом для багатьох сфер технології, включаючи робототехніку та сферу розмінування.

Роботи розмінування, які використовують TensorFlow, відзначаються вражаючою здатністю до роботи в умовах, які раніше вважалися надзвичайно небезпечними для людей. Ця технологія надає роботам здатність аналізувати та обробляти великі обсяги даних з сенсорів та зображень для виявлення підозрілих об'єктів, які можуть бути вибухонебезпечними пристроями чи мінами. TensorFlow надає роботам можливість швидко та ефективно навчатися на основі цих даних, що дозволяє їм підвищити точність та надійність виявлення ризикових об'єктів.

Однією з ключових переваг TensorFlow є глибокі нейронні мережі (deep neural networks), які можна використовувати для розробки розмінувальних роботів. Глибокі нейронні мережі мають здатність автоматично визначати різні ознаки та шаблони на зображеннях, що робить їх ідеальними для завдань виявлення об'єктів та класифікації.

Крім того, TensorFlow має багато різноманітних інструментів та бібліотек, які полегшують розробку та впровадження роботів розмінування. Інтеграція TensorFlow з різними датчиками, системами відеоспостереження та обчислювальним обладнанням дозволяє створювати високоефективні та надійні роботи для роботи в умовах розмінування.

Загалом, TensorFlow відкриває перед роботами розмінування нові можливості у сфері безпеки та гуманітарної допомоги. Вона надає можливість створення інтелектуальних роботів, які можуть ефективно виявляти та нейтралізувати вибухонебезпечні об'єкти, зменшуючи ризики для людей, які працюють у небезпечних умовах. TensorFlow є потужним інструментом для забезпечення безпеки та сприяння гуманітарним завданням у всьому світі.

Поєднання цих двох інструментів дозволяє роботу не лише візуально аналізувати навколишнє середовище, але й приймати рішення на основі цієї аналізу. Наприклад, якщо система OpenCV виявить підозрілий об'єкт, TensorFlow може визначити, чи є цей об'єкт міною, і надати інформацію для взяття рішення щодо нейтралізації об'єкта. Такий підхід допомагає збільшити точність роботів розмінування та зменшити ризик для людей, які їх керують.

Усе це створює вражаючий потенціал для застосування технологій штучного інтелекту в сенсорних системах роботів розмінування. Поєднання OpenCV і TensorFlow робить ці роботи більш надійними та безпечними, допомагаючи знизити ризики для життя і здоров'я тих, хто здійснює розмінову діяльність.

1.4 Висновки до першого розділу

Після проведення аналізу можемо зробити висновок, що нині роботизовані платформи для гуманітарного розмінування є досить актуальною темою. Ця тема є актуальною та важливою в контексті сучасних воєнних конфліктів і військових операцій, а також в гуманітарних місіях. Використання роботизованих платформ для розмінування виходить за рамки традиційних методів та може ефективно вирішити ці проблеми. Були проаналізовані три роботизовані платформи для розмінування з різними принципами переміщення, виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Також були проаналізовані основні датчики які використовуються на платформах для розмінування:

- магнетометри;
- лазерні датчики відстані;
- камери;
- геодари.

2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

2.1 Розробка архітектури сенсорної системи

Розробка архітектури сенсорної системи є критичним етапом проектування, що передбачає визначення функціональних вимог, вибір оптимальних сенсорів, створення збалансованої апаратної та програмної бази, інтеграцію компонентів та тестування для забезпечення надійності та ефективності системи. Архітектурний підхід забезпечує цільову орієнтацію та оптимальну взаємодію між елементами системи, забезпечуючи її відповідність вимогам користувачів та середовища використання. Структурну схему архітектури сенсорної системи зображено на рисунку 2.1.

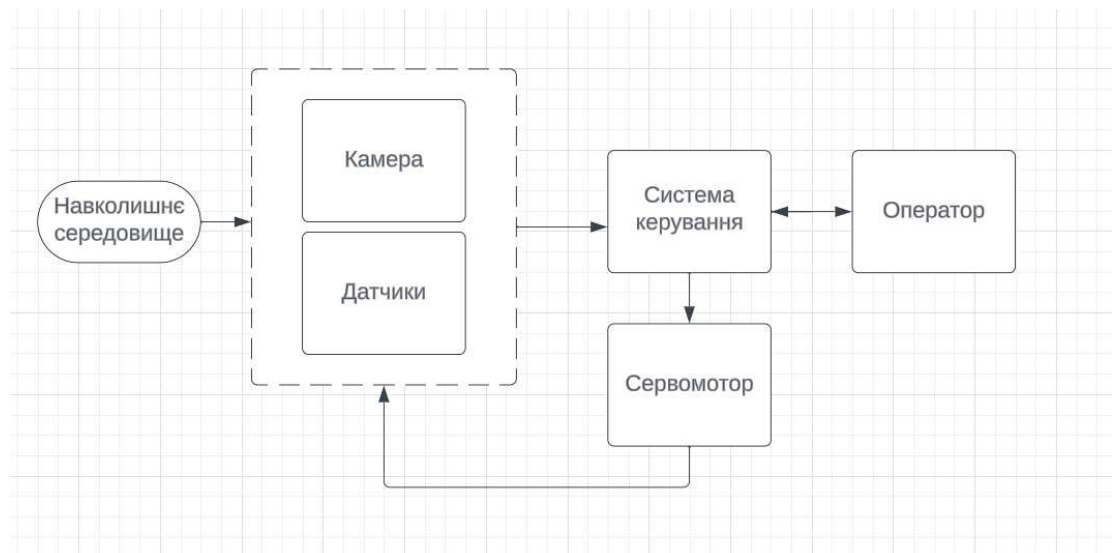


Рисунок 2.1 – Структурна схема архітектури сенсорної системи

Як можна побачити на схемі, через систему керування оператор отримує інформацію з камери і датчиків. Також оператор може керувати положенням датчиків керуючи сервомотором використовуючи систему керування.

Камери та сенсори грають важливу роль у функціонуванні мобільних роботів, надаючи їм можливість взаємодії з навколишнім середовищем та ефективної навігації. Використання цих камер та сенсорів сприяє створенню роботів, які можуть ефективно пристосовуватися до змінних умов оточення та виконувати різноманітні завдання у реальному часі.

2.2 Вибір апаратних модулів для реалізації сенсорної системи

Концепція бездротових сенсорних мереж, знайшла застосування завдяки збору первинної інформації про стан об'єктів, для подальшої її обробки. Звичайно параметри аналізованої інформації або об'єкта розподілені в просторі. Своєчасний збір такої інформації може бути орієнтований на завдання передбачення аварійних ситуацій або екстрених ситуацій, моніторингу стану, управління об'єктами, тому що дозволяє розмістити датчики в потрібному, а іноді важкодоступному місці для отримання найбільш точного інформаційного образу об'єкта, наприклад, для контролю напружено-деформованого стану та структурної цілісності будівельних споруд.

Подібні мережі складаються з безлічі маленьких вузлів, оснащених малопотужним приймачем-передавачем, мікроконтролером, що підходить для виконання завдання набором сенсорів, системою живлення, а також можуть мати пристрої інтерфейсу користувача. Зазвичай сенсорні вузли є однотипними пристроями з певним набором функцій. Усі компоненти повинні мати низьке енергоспоживання у робочому та енергозберігаючому режимах, низьку вартість, малі габарити. Незважаючи на малу потужність радіоканалу, вузли мережі можуть розташовуватися на великій відстані, оскільки передача даних через мережу може відбуватися від одного пристрою до іншого. Маршрути передачі формуються динамічно таким чином, щоб за кінцеве число ітерацій дані вимірювань були передані центральний вузол, відповідальний за прийняття рішень.

Концепція бездротових сенсорних мереж, що знайшла застосування завдання збору первинної інформації про стан об'єктів, параметри яких істотно розподілені у просторі, набувають великого поширення останнім часом. Своєчасний збір такої інформації може бути орієнтований на завдання передбачення аварійних ситуацій, моніторингу стану, управління об'єктами, тому що дозволяє розмістити датчики в необхідному та важкодоступному місці для отримання найбільш точного інформаційного образу об'єкта, наприклад, для контролю напружено-деформованого стану та структурної цілісності будівельних споруд.

Подібні мережі складаються з безлічі мініатюрних вузлів, оснащених малопотужним приймачем-передавачем, мікроконтролером, необхідним набором сенсорів, системою живлення, а також можуть включати пристрої інтерфейсу користувача. Зазвичай сенсорні вузли є однотипними пристроями з певним набором функцій. Усі компоненти повинні мати низьке енергоспоживання у робочому та енергозберігаючому режимах, низьку вартість, малі габарити. Незважаючи на малу потужність радіоканалу, вузли мережі можуть розташовуватися на відстані кількох кілометрів один від одного, оскільки передача даних через мережу може відбуватися одного пристрою до іншого. Маршрути передачі формуються динамічно таким чином, щоб за кінцеве число ітерацій дані вимірювань були передані центральний вузол, відповідальний за прийняття рішень. Системи розроблені на базі мікроконтролерів ESP відкривають безмежні можливості для реалізації різних сенсорних систем. ESP має низькі витрати, велику продуктивність та вбудовані модулі для забезпечення якісного бездротового зв'язку. Усі ці перераховані переваги роблять цей мікроконтролер найбільш оптимальним для створення різноманітних пристроїв, які реагують на навколишні зміни.

Розглянемо та проаналізуємо декілька модулів які можуть використовуватися як основа сенсорної системи. У таблиці 2.1 представлено порівняння основних параметрів мікроконтролерів.

Таблиця 2.1 – Основні параметри мікроконтролерів

Характеристика	Arduino Uno	Raspberry Pi	STM32 (STM32F4)	ESP8266/ESP32
Тип пристрою	Мікроконтролер	Одноплатний комп'ютер	Мікроконтролер	Мікроконтролер
Мови програмування	C/C++, Arduino IDE	Python, C/C++	C/C++, STM32CubeIDE	C/C++, Arduino IDE
Периферійні пристрої	Обмежені (GPIO, ADC, I2C, UART)	Різноманітні GPIO, I2C, UART, SPI, GPIO	Широкий набір (GPIO, ADC, I2C, UART, SPI)	Широкий набір (GPIO, I2C, UART, SPI, GPIO)
Спільнота та підтримка	Обширна та активна	Активна	Активна	Обширна та активна
Безпроводні можливості	Відсутні	Wi-Fi (Raspberry Pi 3 та вище), Bluetooth	Залежить від конкретної моделі	Wi-Fi, Bluetooth
Ціна	Доступна	Середня	Різноманітна	Доступні
Продуктивність	Обмежена	Середня/Висока	Висока	Середня/Висока

Сенсорні системи на базі ESP можуть містити в собі різні типи датчиків, такі як температурні, вологості, освітлення, акустичні та багато інших. Інтеграція цих сенсорів дозволяє створювати пристрої, які реагують на зміни у навколишньому середовищі.

ESP також підтримує технології зворотного зв'язку, що може дозволити створити сенсорні системи з можливістю віддаленого керування. Це є важливим критерієм для застосування у дуже нині популярній сфері "Інтернету речей" (IoT), де можливість віддаленого моніторингу та управління

є ключовою. Приклад обраного мікроконтролера, можна побачити на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32-Cam [22]

Завдяки невеликому розміру та ефективному використанню енергії ESP може бути використаний у портативних сенсорних пристроях, таких як розумні годинники, медичні пристрої або носимі пристрої для відстеження фізичної активності.

Основними перевагами апаратної реалізації сенсорних систем на базі ESP є його гнучкість, доступність та відмінна співпраця із засобами розробки програмного забезпечення. Це робить ESP ідеальним вибором для інженерів та розробників, які шукають ефективне та потужне рішення для створення сучасних сенсорних систем.

Одним з головних модулів сенсорної системи є металошукач. Сенсорні системи, обладнані металошукачами, володіють унікальною здатністю виявляти навіть ті металеві предмети, які залишилися невидимими для ока чи

інших сенсорів. Це важливо, оскільки дозволяє точно та надійно визначити місцезнаходження потенційно небезпечних об'єктів, забезпечуючи безпеку для людей, які можуть виконувати роботи розмінування. В сегменті бюджетних металошукачів виділяються чотири основні сенсори. Металошукач від LC Technology, металошукач M158.3, імпульсний металошукач M158.2v1 та металошукач Пірат. Порівняння їх характеристик наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики металошукачів

Назва металошукача	Напруга живлення	Споживаний струм	Розміри	Глибина виявлення
LC Technology	3 В – 5 В	20 мА – 40 мА	66 мм x 61 мм	50 мм – 100 мм
M158.3	3 В – 4,5 В	20 мА – 50 мА	45 мм x 43 мм	40 мм – 90 мм
M158.2v1	9 В – 14 В	60 мА – 70 мА	45 мм x 43 мм	100 мм – 150 мм
Пірат	9 В – 12 В	20 мА – 70 мА	30 мм x 70 мм	100 мм – 200 мм

Для макету був обраний металошукач від LC Technology через низький споживаний струм, свою доступність і достатню глибину виявлення металевих об'єктів. Переважна чисельність металошукачів використовують звукову чи світлову індикацію для виявлення металевих об'єктів. Але це не підходить для дистанційного виявлення мін. Необхідно отримувати інформацію на мікроконтролер. Для цього була використана можливість ESP зчитувати напругу від 0 В до 3,3 В з аналогових входів. Таким чином ми можемо отримувати інформацію про наявність і глибину знаходження металевих об'єктів в залежності напруги яку отримуємо. На рисунку 2.3 зображено металошукач від LC Technology.



Рисунок 2.3 – Металощукач LC Technology [23]

Датчиком для кращої навігації слугує ультразвуковий датчик відстані, що використовує звукові хвилі для вимірювання відстані до об'єкта. Він має короткий час відгуку, великий діапазон вимірювання та високу точність. Цей датчик легко інтегрується в різні проекти, такі як уникнення перешкод, метрологія відстані та інші, завдяки його простоті використання та надійності. Основними компонентами такого датчика слугують.

Вихідний елемент генерує ультразвукові хвилі у визначеному діапазоні частот, які випромінюються вперед від датчика.

Приймальний елемент сприймає відбиті ультразвукові хвилі від об'єкта. Мікроконтролер обробляє сигнали, що приходять від приймального елемента, визначає час їхнього переміщення, і розраховує відстань до об'єкта.

Процес вимірювання відстані відбувається за наступним алгоритмом. Датчик відправляє короткий імпульс ультразвукових хвиль. Ці хвилі рухаються вперед і відбиваються від найближчого об'єкта. Приймальний елемент реєструє відбиті хвилі.

Мікроконтролер вимірює час, що пройшов від відправлення імпульсу до отримання відбитих сигналів. Використовуючи час і швидкість звуку в повітрі, мікроконтролер розраховує відстань за допомогою формули (2.1):

$$S = \frac{t}{2} \cdot c, \quad (2.1)$$

де S – відстань до перешкоди;

t – час, що пройшов від відправлення імпульсу до отримання відбитих сигналів;

c – швидкість звуку у повітрі.

Отримана відстань доступна для подальшого використання в програмі мікроконтролера.

Серед найпопулярніших та найдоступніших моделей нині на ринку можна виділити чотири датчика HC-SR04, US-100, SRF05 та JSN-SR04T. Порівняння характеристик ультразвукових датчиків наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння характеристик ультразвукових датчиків

Назва датчику	Робочий діапазон відстаней	Кут вимірювання	Точність вимірювань	Напруга живлення
HC-SR04:	20 мм – 400 мм	20°	3 мм	5 В
US-100	20 мм – 400 мм	15°	10 мм	2,4 В – 5,5 В
SRF05	10 мм – 350 мм	15°	5 мм	5 В
JSN-SR04T	25 мм – 350 мм	30°	10 мм	3,3 В – 5 В

З наведених моделей був обраний ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 через гарний діапазон відстаней, і високу точність вимірювання. HC-SR04 легкий у використанні і дуже популярний у проектах, пов'язаних із вимірюванням відстаней, автоматизацією, робототехнікою і багатьма іншими

застосуваннями.. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 наведений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – ультразвуковий датчик відстані HC-SR04[24]

При виборі серводвигуна для реалізації сенсорної системи були проаналізовані чотири серводвигуна: SG-90, SG92R, S3003 та MG996R.

Порівняння характеристик сервомоторів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик сервомоторів

Назва сервомотору	Розмір	Зусилля на валу	Робоча напруга	Кут повороту
SG-90	33 мм x 30 мм x 13 мм	2 кг	3,5 В – 5 В	180°
SG92R	34,5 мм x 26,7 мм x 32,5 мм	2,5 кг	4,2 В – 6 В	180°
S3003	41 мм x 20 мм x 36 мм	3,2 кг	4,8 В – 6 В	60°
MG996R	40,7 мм x 19,7 мм x 42,9 мм	9,4 кг	4,8 В – 7,2 В	120°

Був обраний сервомотор SG-90, через невеликі розміри, ціну та робочу напругу в 5 В яку може забезпечити мікроконтролер ESP32-CAM. Це невеликий та легкий сервомотор, який широко використовується в робототехніці та інших проектах, де необхідне точне керування положенням. Швидкість обертання може варіюватися в залежності від напруги живлення, але, наприклад, при нарузі 4,8 В, він може рухатися за 0,1 секунди на 60 градусів. Вага: дуже легкий, 9 грам. Тип управління: керується сигналами PWM (ШІМ), що дозволяє точно визначати його положення. Робочий об'єм: має обмежений кут обертання, вказаний в специфікаціях, який може бути використаний для визначення діапазону руху. Матеріал корпусу: зазвичай корпус виготовлений із пластику, що робить його легким та зручним для використання в різних конструкціях. Сервомотор SG-90 використовується в багатьох електронних проектах, таких як робототехніка, моделювання та інші застосування, де потрібне точне керування. Порівняння сервомотору SG-90 з іншими моделями сервомоторами представлено на таблиці 3.1. Сервомотор SG-90 представлений на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Сервомотор SG-90 [25]

В порівнянні з іншими сервомоторами він не має великого зусилля на валу, але основними його перевагами є невеликий розмір і низька робоча напруга яку може забезпечити обраний мікроконтролер ESP32-CAM, і великий кут повороту.

2.3 Моделювання параметрів системи керування сенсорної системи

Структурна схема сервоприводу, а також рівняння, що описують процеси в двигуні постійного струму з незалежним збудженням та в замкнутій системі з П-регулятором. Рівняння замкнутої системи в операторній формі мають вигляд:

$$\begin{cases} \omega = \frac{rK_d^2}{T_m p} (M - M_c) \\ M = \frac{1 / K_d r}{T_{яP} + 1} \left(U - \frac{1}{k_d} \omega \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\varphi = \frac{n\omega}{p}, \quad (2.3)$$

$$U = K_p(\varphi_r - \varphi), \quad (2.4)$$

де r – повний активний опір якірного ланцюга (Ом);

ω – механічна кутова швидкість обертання ротора (рад/с);

M – момент обертання, створюваний двигуном (Н · м);

M_c – момент статичного опору навантаження, наведений до валу двигуна (Н · м);

$$K_d = K\Phi = K\Phi \text{ (рад/(В · с))}, \quad (2.5)$$

де K – безрозмірний конструктивний коефіцієнт двигуна;

Φ – магнітний потік збудження двигуна, що створюється постійним магнітом (Вб);

T_M – електромеханічна постійна часу приводу (с);

T_J – електромагнітна постійна часу якірного ланцюга (с);

U – напруга на обмотці якоря двигуна (В);

φ – кут повороту вихідного валу сервоприводу (рад);

n – передатне число редуктора;

K_p – коефіцієнт посилення регулятора (В/рад);

φ_r – бажане значення кута повороту вихідного валу (рад). Розв'язавши рівняння (2.5 – 2.7) щодо φ , отримаємо:

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_r(p) - r \frac{K_d}{K_p} (T_J p + 1) M_c}{H_1(p)}, \quad (2.5)$$

$$H_1(p) = T_J T_M T_c p^3 + T_M T_c p^2 + T_c p + 1, \quad (2.6)$$

$$T_c = \frac{1}{n K_d K_p}. \quad (2.7)$$

Напруга U на обмотці якоря двигуна не може перевищувати деякого максимального значення U_{max} , наприклад, рівного напрузі живлення зовнішнього джерела. Обмеження сигналу управління U в системі забезпечується нелінійною ланкою з одиничним коефіцієнтом посилення та обмеженням, зображено на рисунку 2.6.

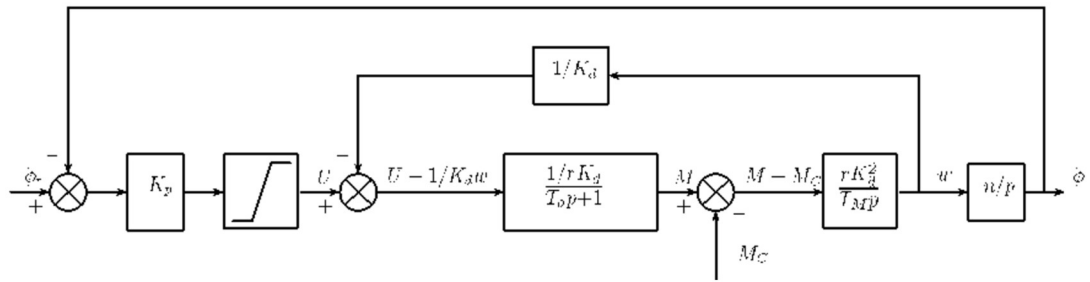


Рисунок 2.6 – Обмеження сигналу управління нелінійною ланкою з одиничним коефіцієнтом посилення та обмеженням

Що стосується $|U| < U_{max}$ поведінка системи визначається рівнянням (2.8), у разі $|U| \geq U_{max}$ керуючий сигнал, що надходить на привід, не залежить від кута φ та перехідні процеси приводи визначаються рівнянням (2.2) при $U = \pm U_{max}$. Вирішивши (2.2) щодо ω , з урахуванням (2.3),

$$\varphi(p) = \frac{\frac{U_{max}}{K_p} - r - \frac{K_d}{K_p} (T_d p + 1) M_C}{H_1(p) - 1}. \quad (2.8)$$

Характеристичний поліном системи $H_1(p)$ задає динамічні властивості системи сірки. Ідентифікація параметрів моделі, виконана за допомогою вимірювання відгуку системи на вхідний вплив у вигляді ступінчастої функції. Як поліном $H_1(p)$ використовується характеристичний поліном на базі бінома Ньютона:

$$H_1(p) = (p + \omega_0)^n, \quad (2.9)$$

де $\omega_0 > 0$ – параметр полінома.

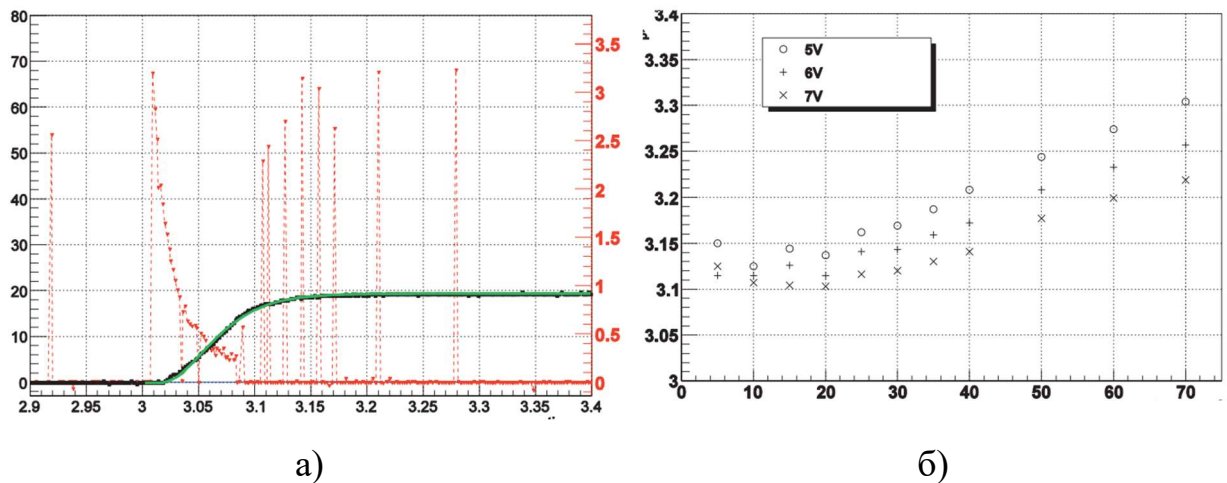
В даному випадку поліном $H_1(p)$ має кратні речові негативні корені, $p_i = -\omega_0$, що забезпечує монотонний перехідний процес без

перерегулювання. Тепер можна отримати постійні часу системи: $T_M = 1/\omega_0$, $T_C = 3/\omega_0$, $T_A = 1/3 \omega_0$.

Постійні часу T_A , T_M , T_C визначаються на випробувальному стенді.

На рисунку 2.7 (а) показані результати апроксимації (суцільна крива) експериментальної перехідної характеристики (точкова крива) і величина споживаного струму (пунктирна крива) у функції часу при подачі ступінчастої дії $\varphi_r = 20^\circ$, стрибкоподібно на момент часу $t = 3,0$ с. Величина повного запізнення при відпрацюванні вхідного впливу непостійна і становить 15-20 мс.

На рисунку 2.7 (б) показано, що у певному діапазоні зміни кута повороту вихідного вала приводу правомірним є використання лінійної моделі приводу (2.9), побудованої на базі полінома $H_1(p)$ при $n = 3$. Діапазон зміни кута φ , у цьому випадку, відповідає сталості реального часу перехідного процесу і не охоплює весь робочий діапазон приводу.



а)

б)

а) перехідна характеристика та струм;

б) час реального перехідного процесу в залежності від впливу, що задає

Рисунок 2.7 – Отримані графіки

Для оцінки величини запізнення введено додатковий параметр T_d , що відповідає простому зрушенню перехідної характеристики за часом. Параметр k описує амплітуду вхідного впливу і є масштабуючим множником перехідної характеристики. При цьому значення параметрів ω_0 , і T_d отримані з вимоги найкращого наближення до реальної перехідної характеристики, методом найменших квадратів. Значення отриманих параметрів та величина характеризує відхилення теоретичної перехідної характеристики h_{teor} від реальної h_{exp} для дискретних моментів часу t_i , зведені в таблицю 2.5 (величина G_{nonlin}^2)

$$G^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(h_{exp}(t_i) - h_{teor}(\omega_0, T_d, t_i))]^2. \quad (2.10)$$

Таблиця 2.5 – Відхилення теоретичної перехідної характеристики h_{teor} від реальної h_{exp} для дискретних моментів часу t_i

φ_r	k	$t_{пп}$	T_d	G^2_{lin}	G^2_{nonlin}
5	4,85	3,150	3,000	0,076	0,059
10	9,49	3,125	3,000	0,036	0,026
15	14,64	3,144	3,002	0,056	0,059
20	19,46	3,137	3,012	0,048	0,058
25	24,61	3,162	3,021	0,197	0,064
30	29,89	3,169	3,025	0,719	0,068
35	34,84	3,187	3,025	3,355	0,067

Для порівняння в таблиці 2.5 наведено результати апроксимації перехідної характеристики з використанням тільки лінійної моделі – величина G^2_{lin} . З отриманих результатів видно, що нелінійна модель, добре описує перехідні процеси у всьому доступному діапазоні зміни кута повороту

вихідного валу приводу. Величина середньо квадратичного відхилення між моделлю та експериментальними даними становила близько 5%.

Для дослідження отриманої нелінійної системи можуть бути використані методи аналізу релейних систем приводів.

Експериментальні результати показали, що для опису перехідних процесів у всім доступному робочому діапазоні перекладки валу сервоприводу доцільно використовувати нелінійну математичну модель.

2.4 Розробка схеми підключення сенсорної системи

Розробка схеми підключення сенсорної системи мобільного робота є ключовим аспектом сучасної робототехніки. Визначення функціональних вимог та вибір оптимальних сенсорів стають фундаментальними етапами цього процесу. Акцент на проектуванні схеми дозволяє досягти ефективності та адаптивності в різних умовах. Схему підключення сенсорної системи мобільного робота для гуманітарного розмінування зображено на рисунку 2.8.

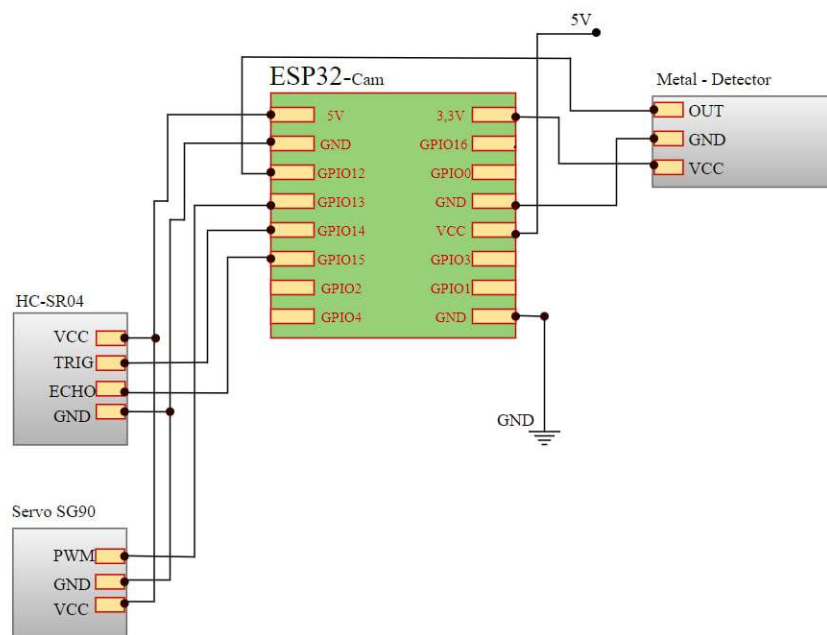


Рисунок 2.8 – Схема підключення сенсорної системи мобільного робота для гуманітарного розмінування

Як бачимо на рисунку 2.8 до GPIO14 та GPIO15 мікроконтролера ESP32-CAM під'єднаний ультразвуковий датчик дальності. Металошукач під'єднано до GPIO12. Лінія живлення металошукача під'єднана до вихода 3,3 В через те, що ESP-32-CAM може зчитувати напругу від 0 В до 3,3 В. Сервомотор під'єднаний до піна GPIO13 і також керується ШІМ сигналом. Живлення сервоприводу відбувається через лінію 5 В.

2.5 Розроблення лабораторного макету

Під час складання макету були використанні всі модулі та деталі наведенні вище. Для збірки макету спочатку треба доробити металошукач. Для цього використовуючи паяльну лампу випаюємо динамік звукової індикації та на його місце впаюємо світлодіод з резистором. До аноду світлодіода підпаюємо дріт який потім підпаяємо до GPIO12. Результат доробки можна побачити на рисунку 2.9.

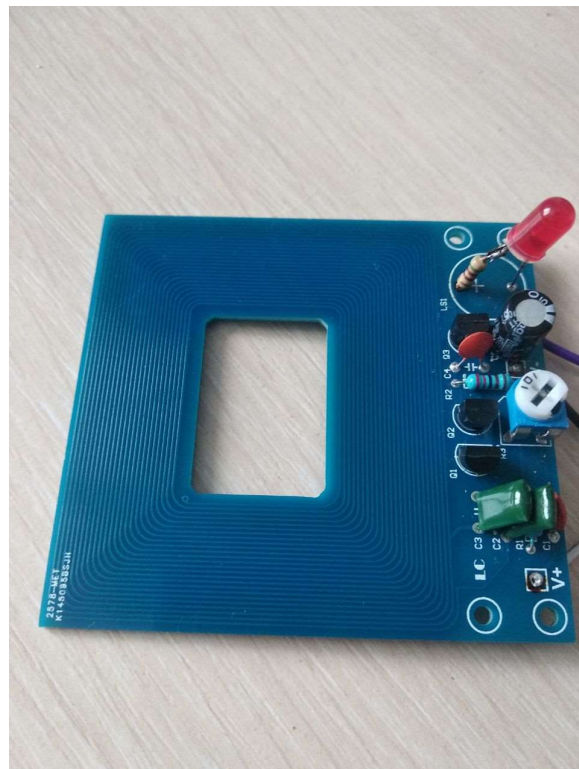


Рисунок 2.9 – Дороблений металошукач LC Technology

Після цього виходячи зі схеми підключення під'єднуємо ультразвуковий датчик дальності до пінів GPIO14 та GPIO15. А сервомотор до GPIO13. Живлення сервомотору та ультразвукового датчику дальності під'єднуємо до ну 5 В. На цьому збірка макету завершено. Зібраний лабораторний макет сенсорної системи можна побачити на рисунку 2.10.

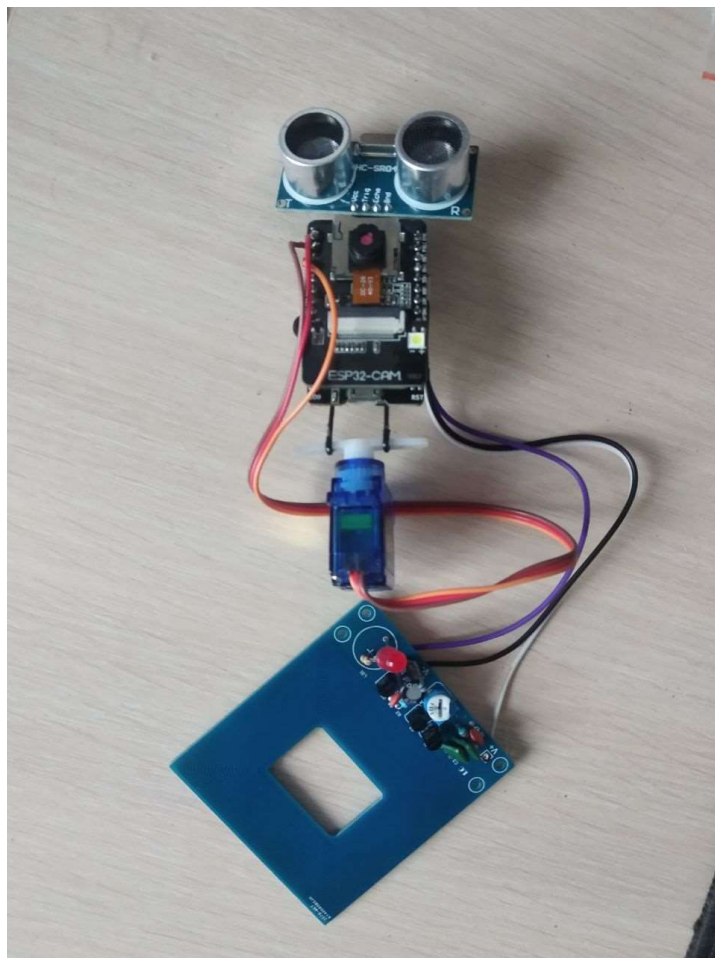


Рисунок 2.10 – Зібраний лабораторний макет сенсорної системи

2.6 Висновки до другого розділу

В цьому розділі магістерської кваліфікаційної роботи, була розроблена архітектура сенсорної системи. Було проаналізовано та обрано основні модулі та датчики для реалізації сенсорної системи. Була змодельована структурна схема керування сенсорною системою, а також побудовано графіки перехідної

характеристика та струму і реального часу перехідного процесу в залежності від задаючого впливу. Також була розроблена схема підключення за нею був зібраний макет сенсорної системи.

3 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ЗАВДАНЬ РОЗМІНУВАННЯ

3.1 Обґрунтування та вибір середі розробки

Для розробки програмного забезпечення для мікроконтролера ESP32-CAM існує кілька середовищ, які можна використовувати. Кожне з них має свої переваги та недоліки.

Arduino IDE (Integrated Development Environment) є невід'ємною частиною екосистеми Arduino, призначеною для розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів. Зручність та простота роботи з Arduino IDE роблять його відмінним вибором для широкого кола розробників.

Інтерфейс Arduino IDE спрощений і інтуїтивний. Він включає основні елементи, такі як вікно коду, консоль для перегляду виводу програми та інструментальну панель для керування проектом. Завдяки цьому, навіть початківці можуть легко створювати програми для мікроконтролерів Arduino, включаючи ESP32-CAM.

Arduino IDE має інтегровану систему компіляції та завантаження програм на мікроконтролери. Використання простих команд у меню дозволяє швидко перевірити та завантажити ваш код на плату. Важливо відзначити, що Arduino IDE автоматично керує багатьма технічними деталями, що полегшує роботу розробникам, які не хочуть глибоко поглиблюватися в технічні аспекти.

Окрім цього, Arduino IDE має широку спільноту користувачів та багато доступних бібліотек, що полегшує використання сторонніх модулів та розширень у ваших проектах.

Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) - офіційне середовище розробки для мікроконтролерів від компанії Espressif, таких як ESP32-CAM.

IDF дозволяє розробникам отримати високий рівень контролю над функціоналом мікроконтролера та забезпечує гнучкість для розробки складних проектів. IDF дозволяє розробникам максимально використовувати можливості ESP32, забезпечуючи прямий доступ до функцій мікроконтролера та його компонентів. IDF дозволяє розробникам оптимізувати код для високої продуктивності та ефективності ресурсів, що важливо для вбудованих систем.

Також ця серeda надає розробникам доступ до багатьох вбудованих модулів, таких як Wi-Fi, Bluetooth, камери, файлові системи та інші. IDF включає в себе FreeRTOS для підтримки реального часу, що робить його придатним для розробки завдань з реальними часовими вимогами. IDF має вбудовані інструменти для налагодження коду та виявлення помилок, що допомагає розробникам вести ефективну розробку та налагодження.

Використання Espressif IDF вимагає більше технічної глибини, але воно стає потужним інструментом для розробників, які шукають повний контроль над своїми проектами на платформі ESP32.

FreeRTOS – це операційна система реального часу (RTOS), яка забезпечує потужні можливості планування завдань для вбудованих систем. Основні характеристики та особливості цієї операційної системи включають реальний час, можливість створення багатозадачних програм, ефективне планування завдань, засоби для взаємодії між завданнями (такі як семафори, черги та м'ютекси), налагоджувальність та надійність.

FreeRTOS дозволяє розробникам конфігурувати систему під їхні потреби, обираючи підмножину функцій, що необхідні для конкретного додатку. Вона вже використовується в численних вбудованих системах та має репутацію стабільної та надійної операційної системи.

Також, FreeRTOS володіє активною спільнотою розробників і докладною документацією, що сприяє швидкому вивченню та впровадженню системи в проекти вбудованих систем з вимогами до реального часу.

Виходячи з нашого технічного завдання та потреб основною середою розробки обрано Arduino IDE. Arduino IDE – це інструмент, спрямований на

максимальне спрощення розробки для того, щоб навіть люди без глибоких технічних знань могли перепрограмувати змодельовану сенсорну систему або внести покращення до апаратної частини.

3.2 Розробка загального алгоритму роботи сенсорної системи

Алгоритм грає ключову роль у сенсорних системах роботів, навіть без використання списків. Сенсорні системи дозволяють роботам взаємодіяти з навколишнім середовищем, збирати інформацію та приймати рішення на основі цієї інформації. Алгоритм є набором інструкцій, які допомагають роботу опрацювати сенсорні дані, визначати оптимальні кроки та виконувати завдання.

Сенсорні системи генерують величезний потік даних, і алгоритми дозволяють роботам швидко та ефективно обробляти ці дані в реальному часі. Це дозволяє роботам приймати швидкі та точні рішення в залежності від змін у навколишньому середовищі. Алгоритми дозволяють роботам адаптуватися до змін в середовищі або умовах роботи. Вони можуть бути налаштовані для зміни стратегій, оптимізації дій або виправлення помилок без використання жорстких списків.

В силу обмежених ресурсів роботів, алгоритми грають важливу роль у використанні їх ефективно. Вони можуть допомагати в управлінні енергією, часом та іншими ресурсами, оптимізуючи роботу для досягнення максимальної продуктивності.

Сенсори забезпечують робота інформацією про навколишнє середовище, і алгоритми допомагають роботу приймати рішення на основі цієї інформації. Це може включати в себе вибір оптимального маршруту, уникаємо перешкод або взаємодії з об'єктами.

Алгоритми можуть використовуватися для реалізації систем навчання роботів, які можуть адаптувати свою поведінку на основі отриманого досвіду.

Це дозволяє роботам покращувати свою продуктивність і навчатися новим навичкам без явного програмування списками.

Узагальнюючи, алгоритми є основою для оптимальної та ефективної роботи сенсорних систем, навіть у випадках, коли не використовуються специфічні списки. Вони дозволяють роботам адаптуватися до змін, швидко приймати рішення та оптимізувати використання ресурсів. Загальний алгоритм сенсорної системи наведений на рисунку 3.1.

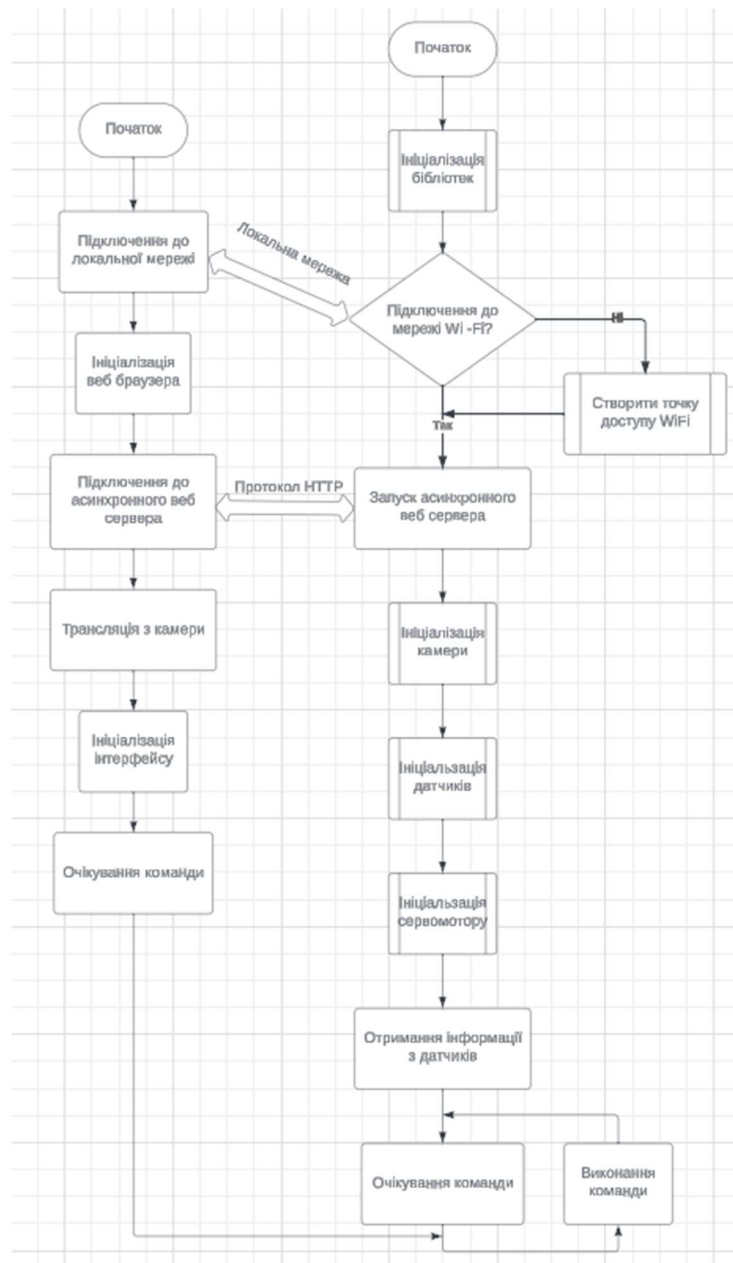


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм сенсорної системи

На зображенні 3.1 видно, що спочатку лабораторний макет проводить ініціалізацію підключених бібліотек та встановлює доступ до мережі Wi-Fi. У випадку, якщо точку доступу неможливо виявити, відбувається процес створення точки доступу або підключення до вже існуючої локальної мережі. Одночасно з цим, після встановлення з'єднання, на пристрої оператора (який може бути як комп'ютер, так і телефон) починається процес ініціалізації веб-браузера. Після успішного запуску веб-сервера та з'єднання з ним оператором, ініціалізується основні модулі, такі як камера та датчики. На наступному етапі розпочинається онлайн-трансляція з відеокамери, що відображається на інтерфейсі для оператора. Після цього, з використанням інтерфейсу, оператор може отримувати інформацію з камери та датчиків [26].

3.3 Експериментальне дослідження та аналіз отриманих результатів

Перевіримо працездатність лабораторного макета. Було проведено кілька тестів з різними матеріалами і відстанню до металевих об'єктів. Перший тест було проведено з відстанню 100 міліметрів з металевою пластиною інструментальної сталі. Металошукач виявив пластину, результат можна побачити на рисунку 3.2.

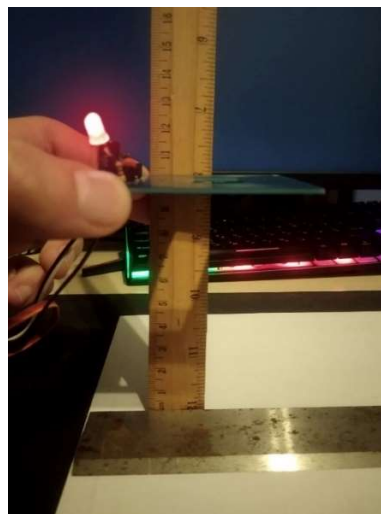


Рисунок 3.2 – Пластина інструментальної сталі на відстані 100 міліметрів

Наступний тест відстань було збільшено до 150 мм. Металошукач видав більш слабку напругу 2,2 В, але виявив наявність пластини. Результати можна побачити на рисунку 3.3.

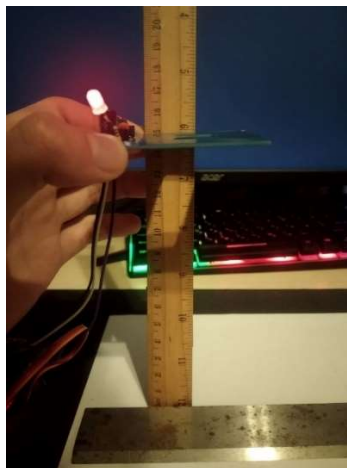


Рисунок 3.3 – Пластина інструментальної сталі на відстані 150 міліметрів

Останній тест було проведено з монетою номіналом 1 гривня з алюмінієвої бронзи вагою 7 г. яка була закопана в ґрунт на глибину 100 мм. Металодетектор виявив монету. Результати експерименту можна побачити на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Монета з алюмінієвої бронзи на глибині 100 міліметрів

3.4 Реалізація функцій програмного забезпечення сенсорної системи

Людино-машинний інтерфейс (НМІ) в HTML (HyperText Markup Language) використовується для створення веб-інтерфейсів, які сприяють взаємодії користувачів з веб-додатками та іншими онлайн-ресурсами. У своїй основі, HTML визначає структуру та зміст веб-сторінок, а разом із CSS (Cascading Style Sheets) та JavaScript, дозволяє створювати інтерактивні та привабливі НМІ.

Використовуються для збору користувацького введення, наприклад, текстові поля для введення імені чи коментарів.

Ці елементи та багато інших можуть бути використані для створення НМІ в HTML, а JavaScript може реалізувати їх інтерактивними та більш функціональними. CSS використовується для стилізації та форматування вигляду НМІ, забезпечуючи кращий дизайн та зручність взаємодії для користувачів. Приклад коду з ініціалізацією бібліотек та датчиків можна побачити на рисунку 3.5.

```
1 #include <WiFi.h>
2 #include <ESPAsyncWebServer.h>
3 #include <NewPing.h>
4 #include "esp_camera.h"
5
6 #include "soc/soc.h"
7 #include "soc/rtc_cntl_reg.h"
8 #include "esp_wifi.h"
9
10 #define CAMERA_MODEL_AI_THINKER
11
12 #define PWDN_GPIO_NUM 32
13 #define RESET_GPIO_NUM -1
14 #define XCLK_GPIO_NUM 0
15 #define SIOD_GPIO_NUM 26
16 #define SIOC_GPIO_NUM 27
17 #define Y9_GPIO_NUM 35
18 #define Y8_GPIO_NUM 34
19 #define Y7_GPIO_NUM 39
20 #define Y6_GPIO_NUM 36
21 #define Y5_GPIO_NUM 21
22 #define Y4_GPIO_NUM 19
23 #define Y3_GPIO_NUM 18
24 #define Y2_GPIO_NUM 5
25 #define VSYNC_GPIO_NUM 25
26 #define HREF_GPIO_NUM 23
27 #define PCLK_GPIO_NUM 22
28
29 const char *ssid = "*****";
30 const char *password = "*****";
31
32 const int trigPin = 14;
33 const int echoPin = 15;
34 NewPing sonar(trigPin, echoPin, 200);
35
36 #define SERVO_PIN 13
37 #define SERVO_FREQ 50
38
39 framesize_t framesizeValue = FRAMESIZE_QVGA;
40 int qualityValue = 10;
41 int servoPosition = 90;
```

Рисунок 3.5 – Ініціалізація бібліотек та датчиків

Приклад фрагмента коду для виведення прямої трансляції з відеокамери можна побачити на рис. 3.6.

```
void setup() {
  // Ініціалізація камери
  camera_config_t config;
  config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
  config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
  config.pin_d0 = V2_GPIO_NUM;
  config.pin_d1 = V3_GPIO_NUM;
  config.pin_d2 = V4_GPIO_NUM;
  config.pin_d3 = V5_GPIO_NUM;
  config.pin_d4 = V6_GPIO_NUM;
  config.pin_d5 = V7_GPIO_NUM;
  config.pin_d6 = V8_GPIO_NUM;
  config.pin_d7 = V9_GPIO_NUM;
  config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
  config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
  config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
  config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
  config.pin_sscb_sda = S10D_GPIO_NUM;
  config.pin_sscb_scl = S10C_GPIO_NUM;
  config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
  config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
  config.xclk_freq_hz = 20000000;
  config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;

  if(psramFound()){
    config.frame_size = FRAMESIZE_UXGA;
    config.jpeg_quality = 10;
    config.fb_count = 2;
  } else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_SVGA;
    config.jpeg_quality = 12;
    config.fb_count = 1;
  }

  // Ініціалізація камери
  esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
  if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("ESP32 Camera init failed with error 0x%x", err);
    return;
  }
}
```

Рисунок 3.6 – Виведення прямої трансляції з відеокамери

Фрагмент коду для керування сервомотором можна побачити на рисунку 3.7.

```
// Setup servo control using LEDC
ledcSetup(LEDC_CHANNEL_1, SERVO_FREQ, 16);
ledcAttachPin(SERVO_PIN, LEDC_CHANNEL_1);
moveServo(servoPosition); // Initialize servo position
```

Рисунок 3.7 – Керування сервомотором

Фрагмент коду людино-машинного інтерфейсу зображено на рисунку 3.8.

```

class="main">
class="row">
<div class="column">
<table>
<div class="input-group" id="range_sensor_group">
<label for="range_sensor">Range sensor</label>
<div class="switch">
<input id="range_sensor" type="checkbox" class="default-action" checked="checked">
<label class="slider" for="range_sensor"></label>
</div>
</div>
<tr>
<p>Distance: <span id="distance"></span> CM</p>
</tr>
</table>
v>
class="column">
<table>
<tr>
<td align="center"><button id="get-still">Photo</button></td>
</tr>
<tr>
<td align="center"><button id="restart" onclick="fetch(document.location.origin+'/control?var=car&val=6');">Restart</button></td>
<td align="center"><button id="toggle-stream">Start Stream</button></td>
</tr>
<tr>
<td>Flash</td>
<td align="center" colspan="2"><input type="range" id="flash" min="0" max="255" value="0" onchange="try{fetch(document.location.origin+'/control?var=flash&val='+this.value);}catch(e){"></td>
</tr>
<tr>
<td>Quality</td>
<td align="center" colspan="2"><input type="range" id="quality" min="10" max="63" value="10" onchange="try{fetch(document.location.origin+'/control?var=quality&val='+this.value);}catch(e){"></td>
</tr>
<tr>
<td>Resolution</td>
<td align="center" colspan="2"><input type="range" id="framesize" min="0" max="6" value="5" onchange="try{fetch(document.location.origin+'/control?var=framesize&val='+this.value);}catch(e){"></td>
</tr>
<tr>
<td>Rotation</td>
<td align="center" colspan="2"><input type="range" id="servo" min="0" max="180" value="" + String(servoPosition) + "" oninput="updateServo(this.value)"> Servo Position<br></td>
</tr>
</table>
</div>

```

Рисунок 3.8 – Код людино-машинного інтерфейсу

3.5 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності

Приміщення для роботи з персональними комп'ютерами та апаратним модулями мають бути обладнані системами опалення, кондиціонування повітря, або припливно-витяжною вентиляцією. У приміщеннях на робочих місцях мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату, у відповідності до ГОСТ 12.1.005-88 такі як:

- температура,
- відносна вологість
- рухливість повітря

Розглянемо норми вологості повітря на таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Норми вологості повітря

Пора року	Категорія робіт	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху повітря
		оптимальна	оптимальна	оптимальна
Холодна	Легка – 1а	22 – 24 С	40 – 60 %	0,1 м/с
	Легка – 1б	21 – 23 С	40 – 60 %	0,1 м/с
Тепла	Легка – 1а	23 – 25 С	40 – 60 %	0,1 м/с
	Легка – 1б	22 – 24 С	40 – 60 %	0,2 м/с

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам № 2152-80. Норми рівнів позитивних і негативних іонів у повітрі наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.2– Норми рівнів позитивних і негативних іонів у повітрі

Рівні	Кількість іонів в 1 см куб. повітря	
	n ⁺	n ⁻
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500 – 3000	3000 – 5000
Максимально допустимі	50000	50000

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження та/або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

За допомогою показників психрометра вирахуємо вологість робочого приміщення. Показники сухого термометра становлять:

$$t_c = 18^\circ \text{C}. \quad (3.1)$$

Показники вологого термометра становлять:

$$t_B = 15^\circ\text{C}. \quad (3.2)$$

За допомогою психометричної таблиці знаходимо різницю цих двох показників:

$$t_C - t_y = 18 - 15 = 3^\circ\text{C}. \quad (3.3)$$

Різниця показань відповідно до таблиці складає $\varphi = 73\%$.

Знаючи температуру повітря за показаннями сухого термометра, визначимо щільність насиченої водяної пари за даної температури з допомогою таблиці:

$$\rho_0 = 15^{14} \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}. \quad (3.4)$$

За формулою розрахуємо відносну вологість повітря:

$$\rho = \frac{\varphi \cdot \rho_0}{100\%}, \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{15,4 \cdot 10^{-3} \cdot 73\%}{100\%} = 11,242 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}. \quad (3.6)$$

Виходячи з отриманих результатів, можемо зробити висновок, що вологість повітря в робочій зоні є задовільною.

3.6 Висновки к третьому розділу

В цьому розділі були проаналізовані різні середовища розробки такі як Arduino IDE, ESP-IDF і FreeRTOS. Було обрано середовище Arduino IDE.

Також було розроблено загальний алгоритм роботи сенсорної системи і керуючись розробленим алгоритмом був написаний код програми сенсорної системи. Була перевірена працездатність лабораторного макета. Було проведено експеримент з різними матеріалами і відстанню до металевих об'єктів. Виявилось що з налаштуванням конденсатора змінної ємності обраний датчик металошукача може розрізняти великі металеві об'єкти з вдвічі більшої дистанції ніж заявлено виробником. Також був проведений експеримент з матеріалом металевого об'єкту. Металошукач виявив монету номіналом одна гривня виконаної з алюмінієвої бронзи на глибині сто міліметрів під ґрунтом.

ВИСНОВКИ

Мета наукової роботи полягала в розробці експериментального макета сенсорної системи роботизованої платформи для гуманітарного розмінування, а об'єктом розробки визначено процеси керування робототехнічними платформами, а предметом – програмно-апаратні засоби робототехнічної платформи для гуманітарного розмінування.

У першому розділі було виявлено актуальність використання роботизованих платформ для гуманітарного розмінування в сучасних воєнних конфліктах та гуманітарних місіях. Проведений аналіз трьох роботизованих платформ дозволив визначити різні принципи їх переміщення, виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Також були розглянуті основні датчики, такі як магнетометри, лазерні датчики відстані, камери та геодари.

У другому розділі розроблено архітектуру сенсорної системи, обрано необхідні модулі та датчики. Змодельовано структурну схему керування, побудовано графіки перехідної характеристики та струму в залежності від задаючого впливу. Розроблена схема підключення дозволила створити макет сенсорної системи. Детально проаналізовані середовища розробки, обрано Arduino IDE. Розроблено алгоритм роботи сенсорної системи та написаний відповідний програмний код. Експерименти підтвердили ефективність системи, зокрема виявлено, що налаштування конденсатора змінної ємності може суттєво покращити визначення металевих об'єктів.

Отже, отримані результати свідчать про успішну розробку та вдосконалення сенсорної системи, що має потенціал застосування у сферах гуманітарного розмінування та інших важливих завдань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. 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. Безкорвайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
3. Збітнєв М. І. Аналіз мобільних робототехнічних платформ для гуманітарного розмінування / М. І. Збітнєв // «Analysis of mobile robotic platforms for humanitarian demining» ADED-2023: Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – Part 2. – P. 329-333.
4. Телекерована роботизована платформа TEODOR Telerob // F Features and benefits of TEODOR EVO. URL: <https://www.telerob.com/en/products/teodor-evo/> (дата звернення: 26.10.2023).
5. Автономна платформа для розмінування Mine Kafon Drone // MineKafon. URL: <https://minekafon.org> (дата звернення: 26.10.2023). Samila, Andrii, Oleksandra Hotra, Oleksandr Moisiuk, Mykola Khobzei, and Taras
6. Kazemirskiy. 2022. "Modified Transceiver Antenna for NQR Detection of Explosive Objects in Demining Conditions" Energies 15, no. 19: 7348. <https://doi.org/10.3390/en15197348>.

7. Робот Scoopex V60 // Scopex.fr, 2023. URL: <https://www2.scoopex.fr/en/products/vision-60-legged-robot-q-ugv-2/> (дані звернення 13.01.2023).
8. Silviu Mihai Petrișor, Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling / Silviu Mihai Petrișor, Mihaela Simion, Ghiță Bârsan, Ghiță Bârsan // Machines – 2023. –Vol. 1. – P. 155-160.
9. Ivan Kraljevic, Mobile demining machine based on the Arduino Platform / Ivan Kraljevic, Jurica Trstenjak //Green Economy & Sustainable Development" – 2023 . –Vol. 1. – P. 10-11.
10. Модуль Honeywell HMC5883L, // Octopart, 2023. URL: <https://octopart.com/hmc5883l-honeywell-55698150> (дані звернення : 13.01.2023).
11. Модуль STMicroelectronics LIS3MDL , // Digipart, 2023. URL: <https://www.digipart.com/part/lis3mdl> (дані звернення : 14.09.2023).
12. Модуль Velodyne VLP-16, // Velodynelidar, 2023. URL: <https://velodynelidar.com/products/puck/> (дані звернення : 15.09.2023).
13. Модуль FLIR Boson , // Hzsoar, 2022. URL: <https://www.hzsoar.com/> (дані звернення : 15.09.2023).
14. Модуль Intel RealSense D435, // Intelrealsense, 2023. URL: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/> (дані звернення : 15.09.2023).
15. I. V. Bryakin, I. V. Bochkarev and V. R. Khramshin, "Development of New Antenna Assembly for Georadar," 2023 International Automation Conference (AutoCon), 2023, pp. 1104-1108, doi: 10.1109/AutoCon58002.2023.10272897.
16. Модуль GPR GSSI, // Geophysical, 2023. URL: <https://www.geophysical.com/> (дані звернення : 30.10.2023).
17. Модуль Raptor 40/80 GPR, // Geomatrix, 2022. URL: <https://www.geomatrix.co.uk/land-products/ground-penetrating-radar/raptor/mini-raptor/> (дані звернення : 30.10.2023).

18. Модуль MALA ProEx, // Metroglobaldevice, 2023. URL: <https://www.metroglobaldevice.com/product/leica-ds2000-utility-detection-radar/> (дані звернення : 30.10.2023).
19. Yuhao Wang. Dielectric elastomer actuators for artificial muscles: A comprehensive review of soft robot explorations / Yuhao Wang, Xuzhi Ma, Yingjie Jiang та ін. // Resources Chemicals and Materials. – 2022. –Vol. 1. – P. 308-324.
20. Jianshu Zhou. A Robotic Enhanced ObjectAdaptation and Grasping Reliability / Jianshu Zhou, Student Member, Shu Chen та ін. // IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS. –2017. –VOL. 2. – P. 2287-2293.
21. Невлюдов І.Ш. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi та мови Python 3.6) / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, В.В. Євсєєв. Харків: ФОП Панов А.М., 2020. 264 с. ISBN 978-617-7859-56-6.
22. Модуль ESP32-CAM з камерою OV2640, WiFi і Bluetooth // RoboStore, 2022. URL: <https://www.robostore.com.ua/modul-esp32-cam-bluetoothwi-fi-esp32-s-kameroyu-ov2640/> (дані звернення : 13.01.2023).
23. Модуль Metal Locator 5V LC Technology // Kosmodrom, 2023. URL: <https://kosmodrom.ua/metaloshukach/metal-locator-5v.html> (дані звернення : 13.01.2023).
24. Модуль HC-SR04 // Kosmodrom, 2023. URL: <https://kosmodrom.ua/datchik-ultrazvukoviy/hc-sr04.html> (дані звернення : 13.01.2023).
25. Модуль Сервопривод SG90 2кг// Arduino.ua, 2023. URL: <https://arduino.ua/ru/prod416-servoprivod-sg90-2kg> (дані звернення : 13.01.2023).
26. Khalid, M. S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I. S., Lyashenko, V., & Wahid, R. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. International Journal of Engineering Trends and Technology, 70.1, 139-145. Загол. з екрана..