

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розроблення роботизованого розмінувальника
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-24-1

Олександр СИРИЦЯ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
роботехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та
роботехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Віктор КОСЕНКО
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Сириця Олександр Олександрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«15» грудня 2025 року

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Сир' (Syrytsya) with a stylized flourish at the end.

Сириця О.О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра КІТАР

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та роботехнічні системи

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Сириці Олександр Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення роботизованого розмінувальника

Затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1018 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Мікроконтролер ESP32, середовище розробки Arduino IDE, мова програмування C++.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ;

Аналіз технічного завдання;

Розробка макету роботизованого розмінувальника;

Розрахунки;

Охорона праці;

Висновки;

Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускної кафедри) Демонстрацію та матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) = 11с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Аналіз технічного завдання	05.09.25	виконано
2	Аналіз існуючих рішень та концепцій	14.09.25	виконано
3	Вибір методу виявлення та знешкодження	21.09.25	виконано
4	Розробка макету	20.10.25	виконано
5	Розробка коду для мікроконтролера ESP-32	14.11.25	виконано
6	Розрахунки	25.11.25	виконано
7	Охорона праці	30.11.25	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	10.12.25	виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2025 р.

Здобувач Олександр СИРИЦЯ
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Віктор КОСЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 с., 10 табл., 50 рис., 3 дод., 12 джерел.

РОБОТ-САПЕР, СФЕРИЧНИЙ РОБОТ, РОЗМІНУВАННЯ,
РОЗМІНУВАННЯ РОБОТОМ, БЕЗПЕЧНЕ РОЗМІНУВАННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності гуманітарного розмінування шляхом розробки дешевого, автономного та стійкого до багаторазових підривів робота для очищення мінних полів.

Об'єктом дослідження є процес автономного розмінування полів.

Предмет дослідження є методи гуманітарного розмінування.

Оглянуто існуючі рішення розмінування та типи мін. Обрано сферичну форму корпусу як оптимальної за критерієм живучості, завдяки рівномірному розподілу вибухової хвилі та відсутності слабких зон.

Запропоновано концепцію з маятниковим приводом для переміщення. Створено макет сферичного роботизованого розмінувальника з мікроконтролером ESP32 та двома мотор-редукторами для підняття маятника. Створено простий метод керування макетом через сайт, який доступний у локальній мережі. Зроблено розрахунки динаміки, математичну модель керування зі зворотним зв'язком та охорону праці.

Запропоноване рішення відкриває перспективи для масового гуманітарного розмінування.

ABSTRACT

Explanatory note: 68 p., 10 tabl., 50 fig., 3 adj., 12 sources.

AVALONIA, ESP32, WIFI, AUTOMATION SYSTEM, AIR QUALITY, WEB SERVER, AIR QUALITY STANDARDS, MICROCONTROLLER, AIR QUALITY SENSORS, FILTERS.

The purpose of this qualification thesis is to enhance the efficiency of humanitarian demining by developing a low-cost, autonomous robot that is resilient to multiple detonations for minefield clearance.

The object of the research is the process of autonomous minefield demining.

The subject of the research is the methods of humanitarian demining.

Existing demining solutions and types of mines have been reviewed. The spherical shape of the body was selected as optimal in terms of survivability due to the uniform distribution of the blast wave and the absence of weak zones.

A concept utilizing a pendulum drive for locomotion has been proposed. A prototype of a spherical robotic deminer was built, incorporating an ESP32 microcontroller and two geared motors for raising the pendulum. A simple control method for the prototype was implemented via a web interface accessible on a local network.

Calculations of the dynamics were performed, a mathematical control model with feedback was developed, and occupational safety considerations were addressed.

The proposed solution opens prospects for large-scale humanitarian demining.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих рішень та вибір концепції	11
1.1 Аналіз сучасних систем розмінування	11
1.2 Особливості мін та вимоги до розмінувальних роботів.....	17
1.3 Оцінка ефективності різних конструктивних форм	21
1.4 Перспективи застосування округлих форм	22
2 Методи виявлення та знешкодження мін.....	24
2.1 Огляд технологій виявлення мін.....	24
2.2 Методи механічного знешкодження.....	28
2.3 Обґрунтування вибору методу знешкодження міни	31
3 Розробка макету робота розмінувальника	33
3.1 Компоненти макету та їх опис.....	34
3.2 Збір макету робота.....	43
3.3 Розробка коду для мікроконтролера ESP-32.....	55
4 Розрахунки динаміки та експерименти	60
4.1 Розрахунок динаміки.....	60
4.2 Експеримент переміщення по нахилу	62
4.3 Математична модель керування зі зворотним зв'язком	63
4.4 Охорона праці	64
Висновки	66
Перелік джерел посилання.....	67
Додаток А Код програми ESP32	69
Додаток Б Висвітлення результатів у статті	72

Додаток В Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	80
--	----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПОМ – протипіхотна осколкова міна;

ПТМ – протитранспортна міна;

ПФМ – протипіхотні фугасні міна;

GPR (англ. Ground Penetrating Radar) – земле-проникаючий радар;

ISS (англ. Integrated Sensor Suite) – інтегрований комплект датчиків.

ВСТУП

Актуальність обраної теми обґрунтована мінним забрудненням яке створює серйозну загрозу для життя цивільних у постконфліктних регіонах. Традиційні методи розмінування є дорогими, повільними та небезпечними для саперів. У той час як сучасні роботи залишаються складними й вразливими до підривів.

Мета роботи – підвищення ефективності гуманітарного розмінування шляхом розробки дешевого, автономного та стійкого до багаторазових підривів робота для очищення мінних полів.

Об'єкт дослідження – процес автономного розмінування полів.

Предмет дослідження – методи гуманітарного розмінування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючі системи розмінування;
- проаналізувати типи мін і вимоги до роботів для їх знешкодження;
- дослідити та обрати метод знешкодження мін;
- розробити макет роботизованого розмінувальника;
- розробити код для мікроконтролера;
- зробити розрахунки динаміки;
- написати підрозділ про охорону праці;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також

з методичними вказівками з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [2].

Було опубліковано статтю пов'язану із роботою [3] (Додаток Б). Результати роботи можна віднести до цілей сталого розвитку: ціль 9. Індустріалізація, інновації та інфраструктура. 9.5 посилення наукових досліджень і впровадження інноваційних технологій для вирішення глобальних викликів [4].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ВИБІР КОНЦЕПЦІЇ

1.1 Аналіз сучасних систем розмінування

Система розмінування – це комплекс методів і технічних засобів, призначений для виявлення, знешкодження або знищення вибухонебезпечних предметів.

У світі існує декілька типів розмінувальних систем, а саме: великі гусеничні машини, дистанційні керовані роботи, системи з металодетекторами та сенсорами. Розглядатимуться будуть тільки ті системи які не потребують перебування людини у комплексі.

Найвідомішими представниками таких систем є великі гусеничні машини для розмінування, це дистанційно керована важка техніка, яка фрезами або катками підриває міни, але частіше вони мають пілота у кабіні. Такі машини очищають великі площі за короткий час, але їх вартість дуже велика. Наприклад DOK-ING MV-4 (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Гусенична машини для розмінування DOK-ING MV-4 [5]

Ця машина може виконувати багато задач залежно від навісного інструменту. Параметри MV-4 наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики DOK-ING MV-4 [5]

Параметр	Значення
Довжина (без кріплення)	3100 мм
Ширина (без кріплення)	1530 мм
Висота	1490 мм
Вага (без навісного обладнання)	5025 кг
Тип двигуна	Перкінс (Perkins)
Потужність двигуна	186 кВт / 250 к.с
Крутний момент двигуна	1050 Нм при 1400 об/хв
Витрата палива	від 15 до 20 л/год
Робоча температура	від -21 °С до +54 °С
Потенціал розмінування	до 2184 м ² /год
Транспортна швидкість	5 км/год
Оперативна швидкість	від 0,5 до 1,26 км/год
Поздовжній підйом	35°
Поперечний підйом	30°
Глибина броду	450 мм
Глибина зазору	300 мм
Ширина провіту	1800 мм
Відстань дистанційного керування	1500 м
Стійкість до тротилу	6,5 кг
Видалення рослинності	100 мм

До переваг таких машин можна віднести:

- важку броню, яка витримує вибухи мін без втрати працездатності;
- здатність очищати велику територію за годину;

– універсальність, ці системи можуть працювати з різними типами мін (протипіхотні, протитанкові), а також з іншими вибухонебезпечними предметами;

– модульність, що дає змогу оснащуватись різними робочими органами.

До недоліків відносяться:

– вартість;

– високі витрати пального під час роботи;

– метод виявлення мін, так як машина не шукає міни з допомогою сенсорів, а знешкоджує все механічно, що не завжди підходить для гуманітарного розмінування (коли треба ідентифікувати і задокументувати знайдені міни);

– гучність, машина створює сильний шум і вібрацію, що робить її помітною та неефективною для прихованих операцій.

Дистанційно керовані роботи. Це мобільні платформи на колесах чи гусеницях, які під'їжджають до мін і знешкоднують їх. Вони працюють у важкодоступних місцях, де великі машини не проїдуть. Наприклад MED-ENG Avenger LT (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Легкий робот MED-ENG Avenger LT [6]

Цей легкий робот призначений для знешкодження мін і саморобних вибухових пристроїв та перевірки підозрілих об'єктів у міських і польових умовах. Його використовують як військові, так і спеціалізовані гуманітарні групи з розмінування. Робот керується оператором на безпечній відстані що дозволяє мінімізувати ризик для персоналу. Параметри Avenger LT наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики MED-ENG Avenger LT

Параметр	Значення
Довжина (складений)	1000 мм
Ширина (складений)	450 мм
Висота (складений)	550 мм
Вага	близько 140 кг
Дальність керування	до 1 км
Живлення	акумулятори
Шасі	гусеничне
Кількість маніпуляторів	1
Вантажопідйомність маніпулятора	до 20 кг
Додаткові модулі	камери, освітлення, датчики, інструменти для знешкодження
Система огляду	HD-камери, нічне бачення

Преваги таких роботів:

- невеликий розмір і гусенична база дозволяють працювати у вузьких просторах та пересіченій місцевості;
- підходить для роботи як на полі, так і у міських умовах;
- маніпулятор дозволяє акуратно працювати з вибухонебезпечними предметами;
- можна встановлювати додаткові сенсори та обладнання.

Недоліки:

- обмежений час роботи від акумулятора;
- тільки для точкової роботи, а не для очищення великих площ;
- Вартість.

Системи виявлення мін з металодетекторами та сенсорами. Хоч вони і не знешкоджують міни, а виконують розвідку і виявлення, але вони також відносяться до систем розмінування. Наприклад MED-ENG ROV з комплектуючими ISS (інтегрований комплект датчиків) (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – MED-ENG ROV Integrated Sensor Suite [7]

Це сенсорна система, яка встановлюється на дистанційно керовані роботи і призначена для виявлення мін та вибухонебезпечних предметів. Сама система ISS інтегрується з роботами і дозволяє їм не тільки маніпулювати об'єктами, а й активно шукати загрози за допомогою сенсорів.

Ця система є типовою представницею саме розвідувальних засобів, а не систем знешкодження. Її часто застосовують у парі з іншими роботами або важкими машинами, які потім знешкоджують знайдені міни. Її параметри наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики MED-ENG ISS

Параметр	Значення
Основні сенсори	металодетектор, земле проникаючий радар (GPR), відеокамери
Сумісність	Avenger, Defender та інші MED-ENG ROV
Живлення	від живлення робота
Дальність виявлення	залежить від типу міни
Інтерфейс управління	інтегрований у пульт оператора робота
Маса	від 20 до 30 кг

Переваги таких систем:

- дозволяє шукати міни без фізичного контакту;
- можна використовувати з різними моделями роботів;
- комбінує металодетектор і GPR, що підвищує точність;
- оператор одразу бачить підозрілі об'єкти на екрані.

Недоліки:

- не знешкоджує міни, лише виявляє;
- ефективність GPR і металодетектора знижується на кам'янистих чи сильно мінералізованих ґрунтах;
- високотехнологічне обладнання коштує дорого;
- не для глибоко закопаних вибухових пристроїв;
- налаштування вимагає кваліфікованих операторів.

Як можна побачити кожна система розмінування призначена під конкретні задачі та типи мін, і деякі є багаторазовими, а деякі вийдуть з ладу після першої детонації.

1.2 Особливості мін та вимоги до розмінувальних робіт

Сучасні міни мають велику різноманітність за конструкцією, принципом дії та методом маскування. Вони поділяються на протипіхотні та протитанкові, причому протипіхотні можуть бути як фугасними, так і осколковими. Особливістю фугасних мін є мінімальний вміст металу, що ускладнює їх виявлення традиційними засобами, тоді як осколкові та протитанкові мають більше металевих елементів і легше ідентифікуються детекторами.

Ці особливості визначають і технічні вимоги до розмінувальних робіт. Вони повинні бути здатні ефективно виявляти як малометалеві фугасні пристрої, так і масивні металеві протитанкові міни. Окрім того, роботи мають витримувати можливі підриви, бути маневреними на складній місцевості та працювати на безпечній дистанції від оператора.

Перший тип мін це протипіхотні фугасні міни (ПФМ) (рис 1.4). Ці міни призначені для ураження солдатів вибуховою хвилею і осколками при спрацюванні натиску на корпус. Їх характеристики наведено у табл. 1.4.



Рисунок 1.4 – Протипіхотні фугасні міни

Таблиця 1.4 – Протипіхотні фугасні міни

Назва	Тип активації	Матеріал корпусу	Особливості виявлення
ПМН-1	Натиск	Пластик + металеві елементи	Частково виявляється металодетектором
ПМН-2	Натиск (50 кг)	Пластик	Важко виявляється металодетектором, GPR
ПМН-4	Натиск	Пластик	Важко виявляється металодетектором, GPR
ПФМ-1	Натиск (0.5-1 кг)	Пластик	Дуже важко виявляється, потребує високочутливого GPR

Особливістю фугасних протипіхотних мін є:

- низький металовміст;
- активація натиском.

Тож, такі міни буде швидше всього підірвати на місці, якщо вони встановлені у полях.

Протипіхотні осколкові міни (ПОМ) (рис. 1.5) призначені для ураження живої сили противника за рахунок великої кількості уламків, які розлітаються при вибуху. Вони можуть спрацьовувати як під час натискання на розтяжку, так і дистанційно за допомогою дротового або радіокерованого підриву. Часто до запалу такої міни прикріплюють нитку або дріт, інший кінець якого фіксується до нерухомих об'єктів, таких як дерева чи стовпи, утворюючи пастку для піхоти. Зазвичай ці міни мають металевий корпус або наповнені металевими елементами, тому добре виявляються металодетекторами та радарми. Для їх розмінування застосовуються роботи, оснащені маніпуляторами та сенсорами, або робота який потрапить у пастку, щоб безпечно знешкодити міну з безпечної відстані для оператора. Характеристики протипіхотних осколкових мін наведено у табл. 1.5.



Рисунок 1.5 – Протипіхотні осколкові міни

Таблиця 1.5 – Протипіхотні осколкові міни

Назва	Тип активації	Матеріал корпусу	Особливості виявлення
МОН-50	Дистанційне керування або натиск на трос	Метал	Помітна на радарі і металодетектором
МОН-100 та МОН-200	Дистанційне або дротове управління	Метал	Виявляється металодетектором
ПОМЗ-2М	Натиск на трос	Метал	Виявляється металодетекторами
ПОМ-2	Дотик до одного з тросів	Метал + пластик	Виявляється металодетектором
ОЗМ-72	Натиск на трос	Метал	Виявляється металодетектором

Особливістю осколкових протипіхотних мін є:

- високий металовміст;
- можуть підірватись дистанційно, не від контакту або натиску.

Тож з таким типом мін є проблеми з розмінуванням, із-за використання дротового методу підриву.

Протитранспортні (протитанкові) міни (ПТМ) (рис. 1.6) призначені для ураження техніки (бронетехніки, вантажівок). Вони активуються під час наїзду важкої техніки або при спрацюванні магнітних чи датчиків руху. За конструкцією ці міни значно більші за протипіхотні й містять потужніший заряд вибухівки, здатний пробити днище броньованих машин. Корпуси таких мін зазвичай виготовляють із металу, що полегшує їх виявлення металодетекторами та радарми. Однак деякі моделі можуть бути оснащені мініметалевими корпусами або датчиками, які ускладнюють їх пошук. Для знешкодження протитанкових мін використовують важкі розмінувальні системи та роботи, які здатні витримати вибух. Характеристики цих мін наведено у табл. 1.6.



Рисунок 1.6 – Протитранспортні (протитанкові) міни

Таблиця 1.6 – Протипіхотні фугасні міни

Назва	Тип активації	Матеріал корпусу	Особливості виявлення
ПТМ-1	Натиск (вага 1\4 машини)	Метал	Легко виявляється металодетекторами
ПТМ-3	Магнітний датчик, дистанційне	Метал + пластик	Виявляється металодетекторами і GPR

Особливістю протитранспортних мін є:

- високий металовміст;
- мають великий розмір, тому добре виявляються і візуально, і сенсорами;
- можуть підриватись від магнітного поля техніки.

Тож більшість мін підірветься через контакт з металевим тяжким роботом який має своє магнітне поле від внутрішньої електроніки.

1.3 Оцінка ефективності різних конструктивних форм

У сучасних системах роботизованого розмінування найчастіше застосовуються гусеничні та колісні платформи. Гусеничні роботи зарекомендували себе як найнадійніші при виконанні завдань на складних і небезпечних ділянках. Їх головна перевага полягає у високій прохідності: гусеничний рушій дозволяє легко долати м'який ґрунт, пісок, болота і нерівні поверхні. Крім того, велика площа опори сприяє рівномірному розподілу ваги машини, знижуючи ризик спрацьовування мін із чутливими детекторами тиску. Особливою перевагою гусеничних систем є їхня стійкість до вибухів, масивні металеві корпуси й важкі катки здатні витримати підрив, зберігаючи роботу машини.

Проте недоліком гусеничних платформ є їхня велика вага та складність у обслуговуванні. Виробництво та ремонт таких машин потребують значних ресурсів, а пересування по твердих дорогах супроводжується підвищеним зношуванням гусениць. Крім того, великі розміри гусеничних роботів обмежують їхню маневреність у тісних умовах.

Колісні платформи мають інші сильні сторони. Вони легші, швидші й енергоефективніші, особливо на твердих і рівних поверхнях. Колісні роботи простіші в обслуговуванні, дешевші у виробництві та забезпечують високу мобільність при переміщенні на далекі відстані. Вони ідеально підходять для розвідки та швидкого реагування.

Втім, головною слабкістю колісних систем є їхня вразливість до вибухів. При підриві міни ударна хвиля може легко пошкодити підвіску або перевернути машину. Крім того, колеса мають меншу площу дотику, що підвищує ризик детонації мін із тисковими датчиками, так як тиск площу більший.

З огляду на ці особливості, доцільно розглянути використання альтернативної форми для мобільного розмінувальника, а саме округлої або сферичної. Округла форма має ряд переваг у контексті живучості та стійкості до вибухів. Завдяки своїй геометрії вибухова хвиля рівномірно розсіюється по поверхні сфери, мінімізуючи локальні навантаження і знижуючи ризик критичних пошкоджень. На відміну від платформ з вираженими слабкими точками як: кути, осі, підвіски. Округлий корпус позбавлений подібних вразливостей.

Таким чином, аналізуючи переваги і недоліки гусеничних та колісних систем, можна дійти висновку, що округла форма є цікавою альтернативою, здатною поєднувати високу живучість з достатньою мобільністю. Вона має потенціал для використання у компактних роботах розмінування нового покоління.

1.4 Перспективи застосування округлих форм

Останнім часом все більше уваги приділяється розробці роботизованих систем з округлими або сферичними корпусами. Такий підхід має потенціал значно підвищити живучість машин у надскладних умовах розмінування. Головною перевагою округлої форми є її здатність рівномірно розсіювати енергію вибухової хвилі по всій поверхні корпусу. Завдяки цьому мінімізуються локальні навантаження, які зазвичай стають причиною руйнування елементів конструкції в роботах традиційної форми.

Ще однією важливою перевагою є здатність такого робота зберігати працездатність навіть після підриву. Навіть якщо вибух призведе до зміщення

корпусу, округла форма дозволяє роботу рухатися далі за інерцією або за допомогою власних рушіїв, продовжуючи виконання завдання. Це робить сферичні платформи перспективними для застосування в умовах інтенсивного мінного забруднення, де кожен підрив несе загрозу виходу машини з ладу.

Окрім того, сферичні роботи демонструють добрі показники мобільності на різних типах ґрунту. Їхня здатність рухатися в будь-якому напрямку без складних механізмів повороту робить їх зручними для роботи на обмежених або сильно засмічених ділянках. А при правильному підборі матеріалів корпусу округла форма дозволяє знизити вагу машини, що позитивно впливає на її маневреність і енергоспоживання.

Таким чином, концепція округлого розмінувальника об'єднує одразу кілька важливих якостей: стійкість до вибухів, мобільність і здатність до самостійного продовження руху після підриву. Це відкриває нові перспективи для розробки ефективних і витривалих роботизованих систем для очищення територій від мін.

2 МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗНЕШКОДЖЕННЯ МІН

2.1 Огляд технологій виявлення мін

Роботизовані платформи дозволяють мінімізувати ризик для людини, забезпечуючи безпечний пошук і нейтралізацію вибухонебезпечних предметів. Такі платформи можуть бути оснащені різноманітними сенсорами та системами, які забезпечують високу ефективність у різних умовах. Нижче наведено детальний огляд технологій, придатних для інтеграції на роботизовані платформи, їх особливості, переваги, недоліки та перспективи використання.

Металодетектори, встановлені на роботизованих платформах, використовують електромагнітні поля для виявлення металевих компонентів мін або інших вибухонебезпечних предметів. Вони, зазвичай, монтуються на маніпулятори або спеціальні підвіси робота, є компактні та легкі, адаптовані для портативних роботів, а також можуть бути поєднані з програмним забезпеченням для автоматичного аналізу сигналів.

Переваги:

- висока чутливість до металевих об'єктів, може ефективно виявляти міни із металевими детонаторами або корпусами;
- простота інтеграції на платформи;
- може у парі з роботом автоматизовано сканувати великі ділянки.

Недоліки:

- може давати хибні сигнали на металеве сміття;
- не здатні виявляти міни із мінімальним вмістом металу;
- втрачає ефективність у мінералізованих ґрунтах.

Наприклад роботи TALON (рис 2.1) часто оснащуються металодетекторами для розмінування в зонах конфліктів. Такі роботи можуть

сканувати поверхню, передаючи дані оператору або автономно позначати підозрілі місця.



Рисунок 2.1 – TALON [8]

GPR-системи використовують радіохвилі для створення зображень підземних об'єктів, але зазвичай потребують стабільної платформи для точного сканування. Цей радар здатний виявляти як металеві, так і неметалеві міни, аналізуючи відбиті сигнали.

Переваги:

- виявляє як металеві так і не металеві міни;
- можливість роботи в різних типах ґрунту;
- здатність створювати детальні карти мінних полів.

Недоліки:

- висока вартість;
- чутливість до вологості, рослинності та неоднорідності ґрунту;
- потреба в потужних обчислювальних ресурсах для обробки даних у реальному часі;

– обмежена швидкість сканування.

Хімічні сенсори, інтегровані на роботизовані платформи, призначені для виявлення парів або мікрочастинок вибухових речовин, таких як тротил, гексоген та інші види вибухівки. Ці сенсори працюють за принципом аналізу складу повітря чи осаду на поверхні, виявляючи навіть мінімальні концентрації небезпечних речовин. Вони компактні за розміром, але потребують періодичного калібрування для підтримки точності вимірювань. Часто хімічні сенсори комбінують з іншими системами, такими як металодетектори або радары, щоб підвищити ймовірність успішного виявлення мін і саморобних вибухових пристроїв. Технологічно такі сенсори можуть бути виконані у вигляді лазерних спектрометрів, іонно-мобільних спектрометрів або мас-спектрометрів малої маси, які легко інтегруються на мобільні платформи.

Переваги:

- висока специфічність до вибухових речовин, що зменшує кількість хибних спрацювань;
- можливість роботи в складних умовах, якщо сенсори захищені від зовнішніх впливів.

Недоліки:

- висока вартість;
- обмежена ефективність у вологих, вітряних або сильно забруднених умовах, де пари вибухівки розсіюються;
- потреба в регулярному технічному обслуговуванні та заміні компонентів;
- вимагає близького контакту з поверхнею.

На практиці роботи, iRobot 510 PackBot, можуть бути оснащені подібними хімічними сенсорами, що дозволяє їм здійснювати точне виявлення вибухівки не лише на відкритій території, а й у міських або промислових умовах. Такий робот зображено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – iRobot 510 PackBot з детектором Fido X4 [9]

Оптичні камери високої роздільної здатності, встановлені на роботі, використовуються для виявлення мін за візуальними ознаками. Часто комбінуються з алгоритмами комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання об'єктів. Можуть бути встановлені як на дрони, так і на наземні роботи.

Переваги:

- відносно низька вартість;
- оператор може бачити те що перед роботом.

Недоліки:

- не знайде закопані міни;
- залежність від освітлення;
- потреба в додаткових сенсорах для підтвердження виявлених об'єктів.

Наземні роботи, оснащені камерами, застосовуються для детального огляду підозрілих ділянок.

Також до методу виявлення мін можна віднести механічне спрацьовування, наприклад, шляхом наїзду важкою технікою або катком, що передбачає використання важкої роботизованої платформи, це може бути броньований гусеничний або колісний робот, який переміщується по потенційно замінованій території, створюючи достатній тиск на ґрунт, щоб

активувати міни, чутливі до навантаження, наприклад, протипіхотні або протитанкові міни. Детонація міни виявляє її місце розташування, а міцна конструкція платформи захищає її від пошкоджень. У деяких випадках платформа може бути оснащена додатковими сенсорами для фіксації вибухів або аналізу ґрунту перед наїздом.

Переваги:

- швидко;
- одночасне виявлення та знешкодження мін;
- підходить для протипіхотних і протитанкових мін, які спрацьовують під вагою;
- технологія не вимагає складних сенсорів або алгоритмів обробки даних;
- можливість роботи в складних умовах.

Недоліки:

- ризик пошкодження платформи. Незважаючи на бронювання, потужні вибухи можуть пошкодити або знищити робота;
- обмежена ефективність проти певних мін;
- неконтрольовані детонації.

Технологія механічного спрацьовування шляхом наїзду важкою роботизованою платформою є простим, але ефективним методом для виявлення та знешкодження чутливих до тиску мін. Її головна перевага: одночасне виявлення та нейтралізація, що прискорює процес розмінування.

2.2 Методи механічного знешкодження

Методи механічного знешкодження мін, такі як наїзд катком, фрезерування румпелем та ланцюгове або молотове биття, є інструментами для розмінування, особливо в контексті гуманітарних і військових операцій. Ці методи мають спільні принципи дії, оскільки всі вони спрямовані на фізичний вплив на міни для їхньої детонації, і, відповідно, мають схожі

переваги та недоліки. Однак кожен метод має свої особливості, які визначають їхнє застосування.

Наприклад, метод ланцюгового або молотового биття використовує обертові ланцюги чи молоти, які б'ють по поверхні, викликаючи детонацію мін через локалізований тиск. Цей метод є дешевшим за фрезерування і ефективним для поверхневих мін, але його глибина дії обмежена до 30 см, а ланцюги швидко зношуються через постійний контакт із ґрунтом і вибухи. Також обертові ланцюги чи молоти можна поєднати з фрезами, як це зроблена на DOK-ING MV-10, що зображено на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – DOK-ING MV-10 [10]

А каток може детонувати наземні та підземні міни, створюючи достатній тиск для їхньої активації або зачіпаючи троси, прив'язані до запалу, що спрацьовують при механічному впливі. Цей метод є простим і ефективним для поверхневих мін, таких як протипіхотні ПМН-2, оскільки каток імітує вагу людини чи техніки, викликаючи вибух. Однак катки зазвичай потребують міцної конструкції, щоб витримувати детонації, і можуть бути менш ефективними на нерівній місцевості.

На відміну від них, ротаційні фрези не такі стійкі до сильних вибухів, але здатні не лише детонувати, а й фізично знищувати вибухонебезпечні предмети, подрібнюючи їх разом із ґрунтом. Цей метод дозволяє працювати на глибині до 35 см, що робить його придатним для зарослих або піщаних районів, хоча він значно пошкоджує ґрунт, ускладнюючи його подальше використання для сільського господарства.

Кожен із цих методів найкраще підходить для різних ділянок. Наприклад, каток ідеально підходить для відкритих площ із мінімальною рослинністю, де потрібне швидке очищення від поверхневих мін. Ротаційні фрези, своєю чергою, краще справляються зі складними ґрунтами, включаючи глинисті або зарослі території, але потребують потужних платформ і регулярного обслуговування. Ланцюгове биття є компромісним варіантом, який балансує між вартістю та ефективністю, але не підходить для глибоко закопаних мін. Усі ці методи можуть бути інтегровані з роботизованими платформами, такими як DOK-ING MV-4 або Vozena-5 (рис. 2.4), що забезпечують дистанційне керування та захист оператора. Для підвищення точності їх часто комбінують із сенсорами, такими як металодетектори чи тепловізори, які дозволяють попередньо картографувати мінне поле.



Рисунок 2.4 – Vozena-5 [11]

Метод маніпуляторного вилучення, наприклад, на платформі MED-ENG Avenger LT, оснащений маніпулятором із камерами та сенсорами для точного позиціонування, дозволяє фізично витягувати виявлені міни з ґрунту для подальшого знешкодження або переміщення в безпечне місце для контрольованого підриву. Цей метод зазвичай застосовується після попереднього виявлення мін сенсорами, такими як металодетектори чи GPR, що забезпечують точне визначення їхнього розташування. Маніпулятор, керований дистанційно, обережно захоплює міну, мінімізуючи ризик випадкової детонації, і переміщує її в ізолювану зону, де може бути проведений контрольований підрив. Метод контрольованого підриву, своєю чергою, часто є наступним етапом, де складають декілька мін та вибуховий заряд, щоб знищити їх безпечно і з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Ці методи тісно пов'язані, оскільки маніпуляторне вилучення нерідко завершується контрольованим підривом.

2.3 Обґрунтування вибору методу знешкодження міни

У процесі розробки концепції роботизованого розмінувального було обрано саме метод спрацьовування мін під вагою робота як основний спосіб нейтралізації. Такий вибір зумовлений кількома важливими факторами, які роблять підрив найбільш придатним для застосування на простих роботах.

По-перше, метод підриву не потребує складної системи ідентифікації мін. Сучасні детектори мін включають в себе металодетектори, GPR, датчики хімічного аналізу та камери. Однак такі системи вимагають значних енергетичних ресурсів, точного налаштування і складних обчислень для обробки отриманих даних. Для невеликого мобільного робота встановлення подібного обладнання є технічно складним та економічно недоцільним. Натомість підрив міни наїздом на неї дозволяє уникнути потреби в точному виявленні і класифікації об'єктів. Міна знешкоджується безпосередньо під час

контакту з роботом або шляхом провокування її детонації вагою чи рухом робота.

По-друге, підрив є надійним і перевіреним методом, який вже багато років використовується у важких інженерних машинах для розмінування. Перенесення цієї концепції на компактного робота дозволяє зберегти високу ефективність, при цьому спростивши конструкцію. Відсутність складних датчиків і електроніки знижує вартість пристрою, робить його менш вразливим до пошкоджень та полегшує обслуговування у польових умовах.

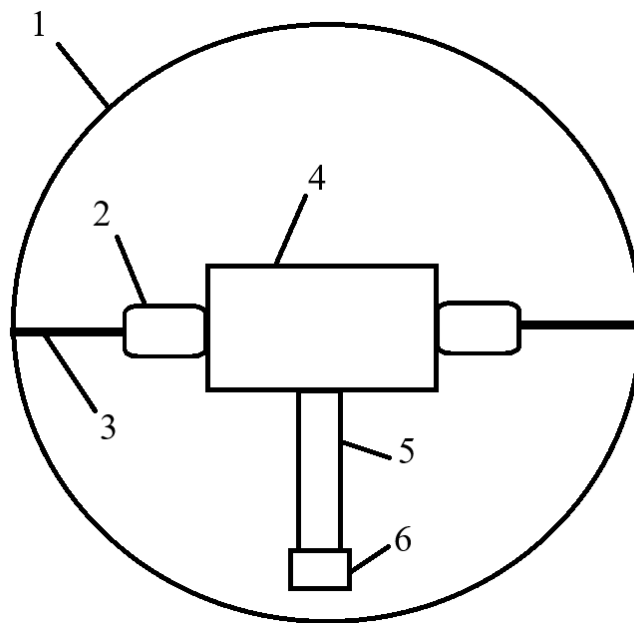
Ще одним важливим аргументом на користь підриву є вибрана форма робота. Округла конструкція має право на існування як ефективний варіант для таких завдань. Однак особливістю сферичної форми є складність у розміщенні та стабільному функціонуванні сенсорів. Для роботи GPR або металодетектора необхідна точна орієнтація та стабільна платформа, чого складно досягти у сферичній моделі, що постійно обертається. Таким чином, у випадку з округлим роботом залишається найбільш логічним саме метод підриву, який не залежить від точності визначення місця розташування міни. Робот просто рухається вперед, активуючи міни контактним чи натискним способом, і завдяки округлій формі зберігає працездатність навіть після серії підривів.

Таким чином, вибір методу підриву для роботизованого розмінувальника є обґрунтованим з позиції надійності, простоти реалізації та відповідності конструкційним особливостям округлої платформи. Такий підхід дозволяє досягти максимальної ефективності з мінімальними технічними складнощами.

3 РОЗРОБКА МАКЕТУ РОБОТА РОЗМІНУВАЛЬНИКА

На основі проведеного аналізу, було розроблено ескіз роботизованого розмінувальника. На рис. 3.1 показано концепцію без захисних пластин, вона має корпус округлої форми, мотори які розташовати валом з середини до корпусу, також до моторів прикріплена платформа з платою управління, акумулятором та до цієї платформи кріпиться маятник з тягарцем.

Принцип роботи заложено у зміщення центру ваги за рахунок нахилу маятника та моторчиків.



1 – корпус; 2 – мотор-редуктор; 3 – вал; 4 – місце розташування плати управління та акумулятора; 5 – маятник; 6 – тягарець.

Рисунок 3.1 – Ескіз сферичного роботизованого розмінувальник

3.1 Компоненти макету та їх опис

Як серце проекту було обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32D (рис. 3.2), за його доступність, ціну та наявність на ринку. Також, треба зазначити що використовується варіант із чипом CH340C.

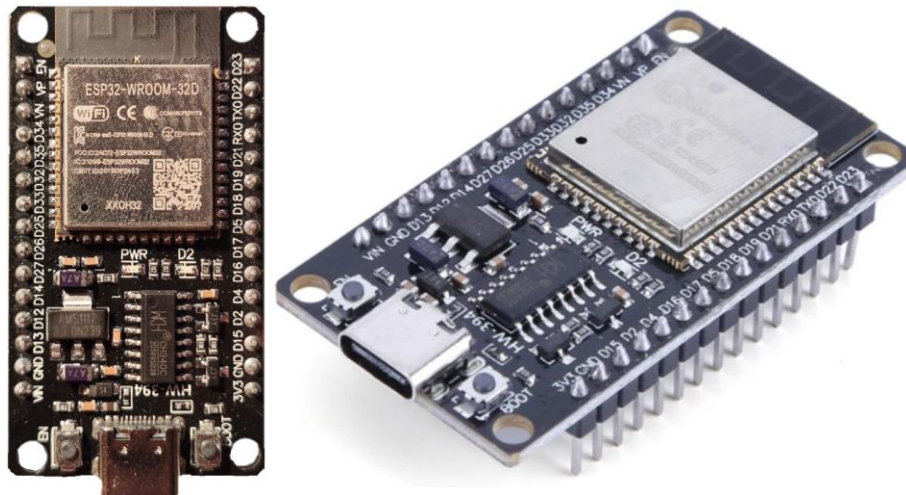


Рисунок 3.2 – ESP32-WROOM-32D [12]

Цей мікроконтролер може живитися від роз'єму Type-C 5 вольт, контакту «VIN» від 3,6 В до 18 В або від 3,3 вольт на вхід «3V3», а так як це рухливий робот він повинен містити акумулятор, в такому разі було обрано живлення через вхід на 3,3 вольт, пін «GND» є мінусом.

На контролері буде запущено точку доступу бездротової локальної мережі Wi-Fi. Підключившись до неї можна отримати доступ до локального сайту, який запущено на контролері, з нього можна керувати розмінувачем.

Мікроконтролер має багато пінів із різними властивостями та режимами роботи, але у цій версії роботизованого розмінувальника ці особливості не стануть у пригоді. Довідку про контактування на мікроконтролері наведено на рис. 3.3.

Мотор-редуктор N20 (рис. 3.4) є щіточним мотором з металевим редуктором з редукцією 1:250, він призначений для маленьких пристроїв що потребують високого крутного моменту. Кількість обертів приблизно 36-72 об/хв при напрузі 3-6 вольт.



Рисунок 3.4 – Мотор-редуктор N20, редуктор 1:200

Технічні характеристики Мотор-редуктора N20 наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики мотор-редуктора N20

Параметр	Значення
Оберти	від 25 до 36 об/хв
Крутний момент	від 6 до 9 кг
Струм без навантаження	від 25 до 45 мА
Струм з навантаженням	від 180 до 350 мА
Коефіцієнт редукції	1:250
Напруга живлення	від 3 до 6 В
Діаметр валу	3 мм
Розміри мотора	15 мм на 12 мм на 9
Розміри редуктора	9 мм на 12 мм на 9

Для живлення робота було взято літій-іонний акумулятор 18650, його зображено на рис. 3.5. Такі акумулятори, в основному, використовують для високопродуктивних ліхтарів, збірних акумуляторів для ноутбуків та різних радіокерованих моделей, а також, як у цьому випадку у роботизованих платформах і саморобних роботів де потрібна висока ємність при порівняно невеликих габаритах і масі. Завдяки розміру ідеально підходить для компактних мобільних роботів, які за розмірами та вимогами до живлення близькі до радіокерованих іграшок, що значно спрощує вибір корпусу, балансування ваги та заміну елемента живлення.



Рисунок 3.5 – Літій-іонний акумулятор 18650

Висока ємність дозволяє роботу автономно працювати до 4 годин залежно від навантаження, а максимальний струм розряду 20 А з лишком перебиває пікове споживання моторів. Технічні характеристики акумулятора можна знайти у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики мотор-редуктора N20

Параметр	Значення
Номінальна ємність	4000 мАч
Номінальна напруга	3,7 В
Напруга заряду	4,2 В
Напруга розряду	2,75 В
Стандартний струм заряджання та розряду	1500 мА
Опір	17 мОм
Розмір	65 мм на 18 мм

Далі не менш важливий елемент це контролер заряду, так як не зручно кожного разу вилучати акумулятор з корпусу для його зарядження. Розглянути контролер заряду можна на рис. 3.6. Плата має можливість заряджати акумулятор, має червоний світлодіод який сповіщає про процес зарядження акумулятора. Також на платі є кнопка та чотири контакти на вихід, працює одна з пар, для зміни пари потрібно тиснути кнопку 2 секунди. Після натиску кнопки перемикаються режим роботи плати, є три режими:

- повна напруга акумулятора
- знижена напруга до 50 %
- вихід повністю вимкнено

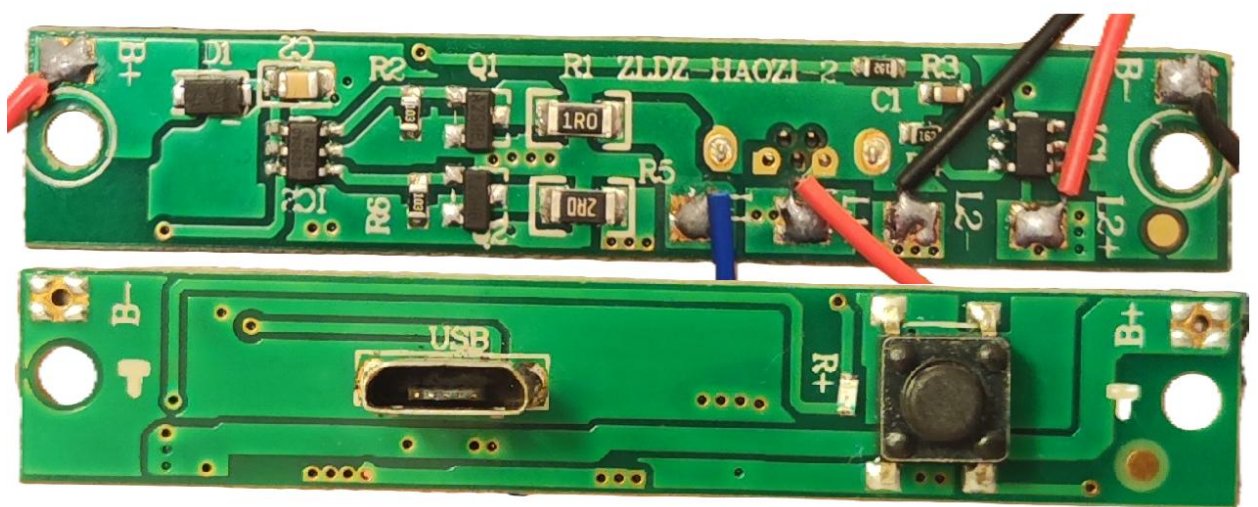


Рисунок 3.6 – Контролер заряду

Розглядаючи рисунок, можна помітити, що це невідома китайська плата, тому що для розроблення макету було розібрано китайський налобний ліхтарик, з якого була взята ця плата та акумулятор 18650 на 4000 мАч.

Якщо підключити мотори напряму до мікроконтролера, то він вийде з ладу від занадто великого току початкової загрузки при запуску моторів, а також при повному навантаженні моторів. Тому до макету добавлено мікросхему драйвер який приймає сигнал від мікроконтролеру та пропускає через себе струм з іншого джерела живлення до виходу на який підключено мотор. Цей драйвер може живити два моторчики або чотири двигуна постійного струму у одному напрямку. Іншим зовнішнім джерелом буде Літій-іонний акумулятор 18650 який й живить мікроконтролер. Цей драйвер можна побачити на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – Драйвер моторів двоканальний L293D

Мікросхема L293D має захист від перегріву, може живити моторчики до 600 мА постійного струму та видає до 1.2 А короточасний піковий струм. Технічні характеристики можна побачити у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики драйверу моторів L293D

Параметр	Значення
Тип	Двоканальний H-міст
Кількість каналів	2 (або 4 в одну сторону)
Напруга живлення моторів	від 4,5 В до 36 В
Максимальний постійний струм на канал	600 мА
Піковий струм на канал (короткочасно)	1200 мА
Температура роботи	від -20 °С до +150 °С
Корпус	DIP-16

Також потрібен корпус, і в якості корпусу було обрано захисний пластмасовий шар для маленьких домашніх гризунів. Куля повністю прозора, що дозволяє спостерігати за роботом з усіх боків і демонструвати його роботу. Цей шар ще має вентиляційні отвори, які забезпечують охолодження для електроніки під час роботи моторів. Шар складається з двох половинок, які легко роз'єднуються без інструментів, що значно спрощує доступ до компонентів під час налагодження чи заміни. Зображення шару можна побачити на рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Шар корпус

Матеріал шару досить легкий, прозорий та міцний, для макету. А вага корпусу приблизно 100 грам, що не буде переважувати важіль, діаметр 13 см. Ще таке рішення для корпусу є досить бюджетним і доступним.

Площадка для закріплення моторів, плат та акумулятора буде зроблено з полоси металу для монтажу, її показано на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Металічна монтажна стрічка

Це оцинкована сталева монтажна перфорована стрічка шириною 17 мм і товщиною 0,7 мм. Завдяки отворах стрічку легко різати ножицями по металу, гнути руками або плоскогубцями, кріпити різьбовим кріпленням, чи заклепками.

Далі стержні клею котрі будуть використані для балансування корпусу, заповнення порожнин маятника. Зображені на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Стержні клею для термопістолету

Це звичайні термоклейові стержні діаметром 7 мм, які плавиться при високій температурі, вище 100 °С, у термопістолеті, та видавлюється на поверхню в рідкому вигляді, де швидко застигає і утворює міцне еластичне з'єднання.

Для елементів які впливають на балансування та може буде потрібна заміна, буде використана ізоляційна стрічка (рис. 3.11) для кріплення на макеті.



Рисунок 3.11 – Ізоляційна стрічка

3.2 Збір макету робота

Спочатку потрібно зробити основу на яку буде все закріплено, щоб дізнатися яка довжина потрібно вийняти з діаметру корпусу ту довжину, яку не повинна займати металічна стрічка. Так як діаметр корпусу 13,2 см (рис. 3.12) а довжина валу з редуктором 2,4 см (рис. 3.13), які повинні виступати за межі основи, щоб нічого не чіпляти. Ця довжина визначається за (3.1):

$$L = D - 2 \cdot l, \quad (3.1)$$

де L – довжина металевої стрічки;
 D – діаметр корпусу;
 l – довжина валу з редуктором.

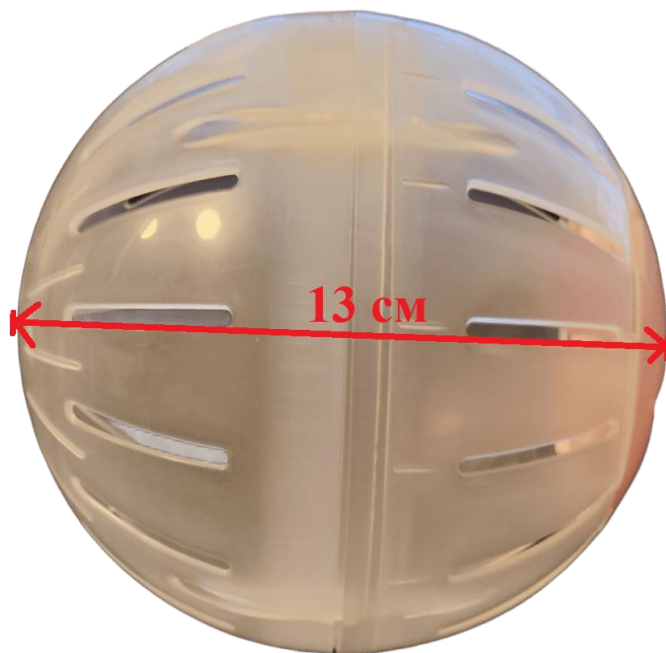


Рисунок 3.12 – Діаметр корпусу

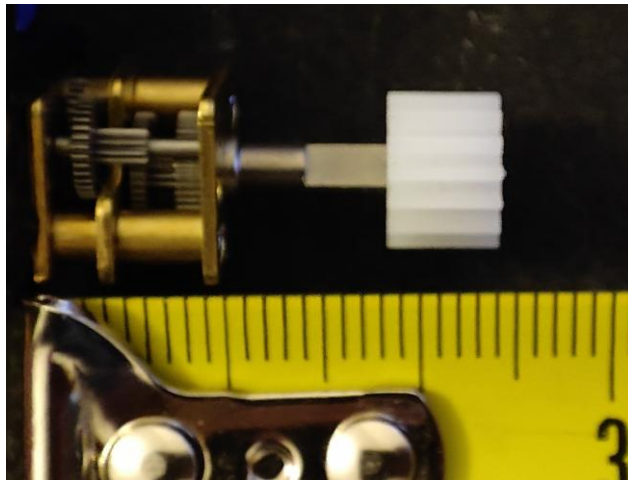


Рисунок 3.13 – Довжина редуктора з валом моторчика

Виходячи з рівняння, відрізається полоса від металічної монтажної стрічки довжиною 8,2 сантиметри. Вона зображена рис. 3.14.



Рисунок 3.14 – Металева стрічка

На цю стрічку кріпляться два моторчики, поки що ізоляційною клейкою стрічкою, яку потім можна замінити на хомути чи стяжки. Стрічка з моторчиками зображена на рис. 3.15.



Рисунок 3.15 – Основа приводу руху

Тепер можна приміряти до корпусу та перевірити балансування корпусу. Для цього потрібно розширити лівий отвір, так як він вужче чим правий отвір. Отвір було розширено лезом ножиць, та спеціально зроблено виступи для зачеплення зубців із корпусом, так як ця сторона просто вставляється у отвір і ніяк більше не кріпиться. Результат механічного розширення отвору можна побачити на рис. 1.16, а на рис. 1.17 зображено результат перевірки балансування.

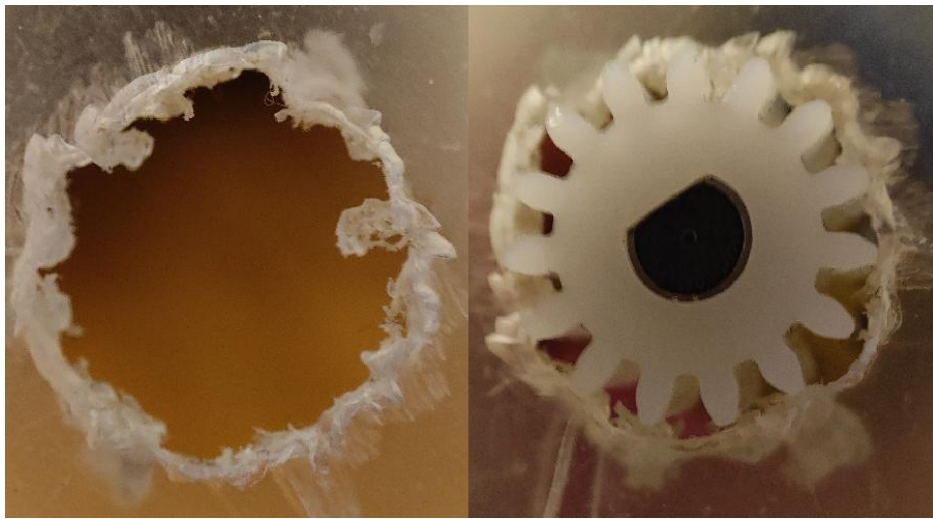


Рисунок 3.16 – Отвір для валу мотора



Рисунок 3.17 – Корпус з приводом

Як можна побачити з рис. 3.17, корпус трохи нахилений вліво, і якщо його покотити чи трохи штовхнути, то його перевесить у правий бік повністю, що свідчить про зміщення центру тяжіння, що робить систему нестійкою, тому корпус треба балансувати. Процес балансування корпусу роботизованого розмінувальника зображено на рис. 3.18.



Рисунок 3.18 – Балансування корпусу

Балансування корпусу буде проводитися шляхом штучного збільшення маси на легшій стороні конструкції. Для цього застосовується термоклей та термопістолет. Це є оптимальним рішенням, оскільки такий метод дозволяє наносити матеріал пошарово.

Після цього процесу тримається баланс, але корпус, все одно, наклонено в одну з боків, так як корпус на стику має невеличкий виступ, що не дає досягти ідеального горизонтального балансу. Виступ зображено на рис. 3.19.



Рисунок 3.19 – Виступ на корпусі

Далі кріпимо акумулятор та зарядну плату до металічної основи, перевіряючи рівновагу робота. Зображено на рис. 3.20.

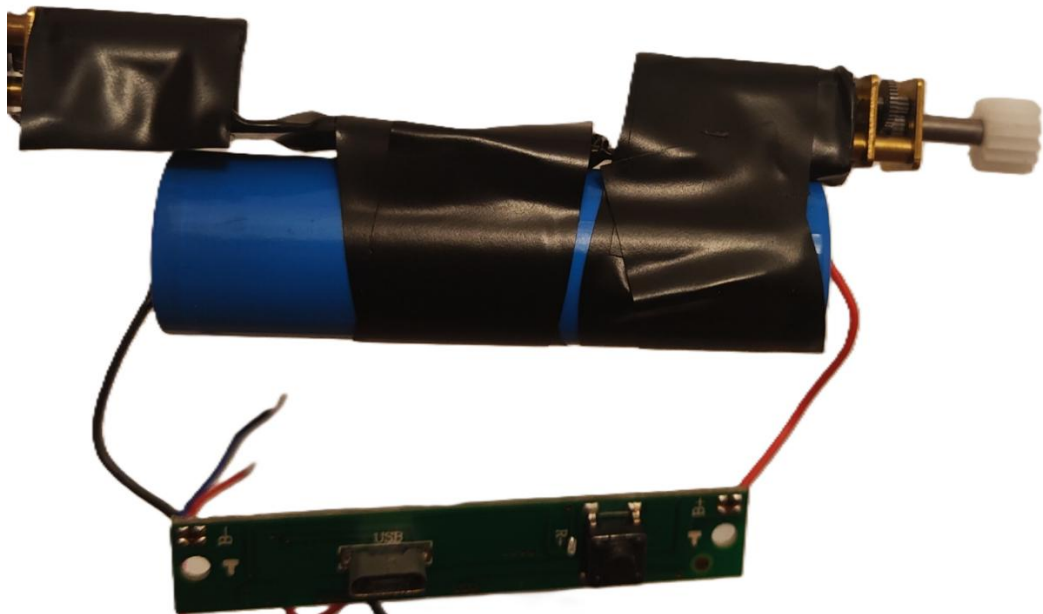


Рисунок 3.20 – Привід з акумулятором та контролером заряду

Тепер кріпиться кришка корпусу до приводу робота (рис. 3.21). Кріпитися буде на пролітому у середину термоклею.

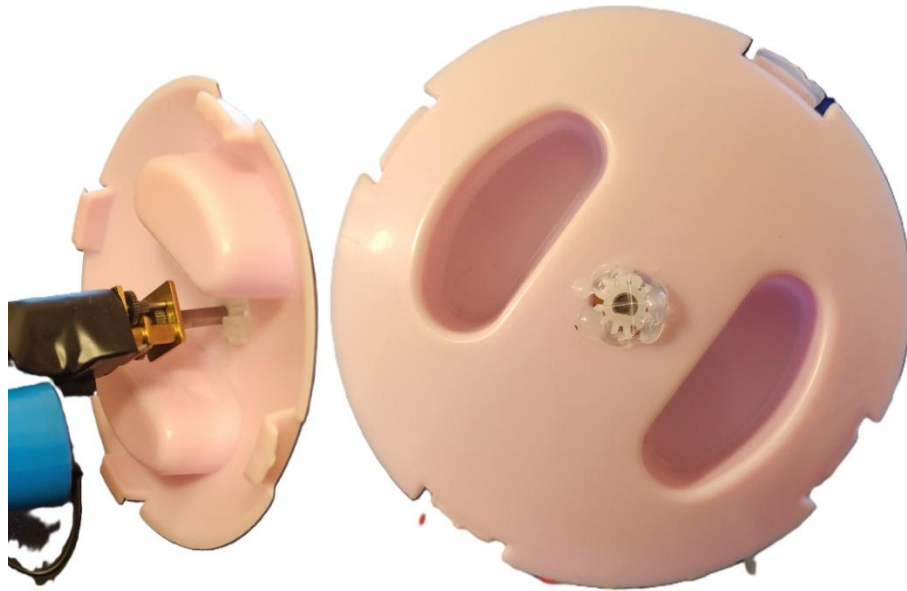


Рисунок 3.21 – Кришка корпусу

Кріпиться плата заряду (рис 3.22).

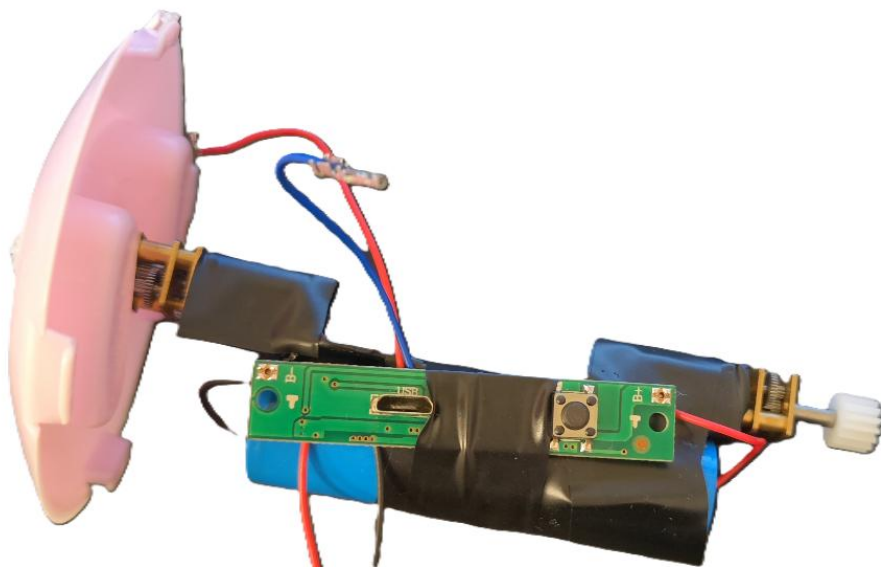


Рисунок 3.22 – Лабораторний макет системи

Для кріплення дротів живлення до мікроконтролеру, будуть використовуватися піни 3 мм MFW (рис. 3.23). Спочатку потрібно оголити дріт за допомоги інструментів або запальнички. Скручуються ворсинки дроту, дріт вставляється у пін та притискається вусиками (рис. 3.24).

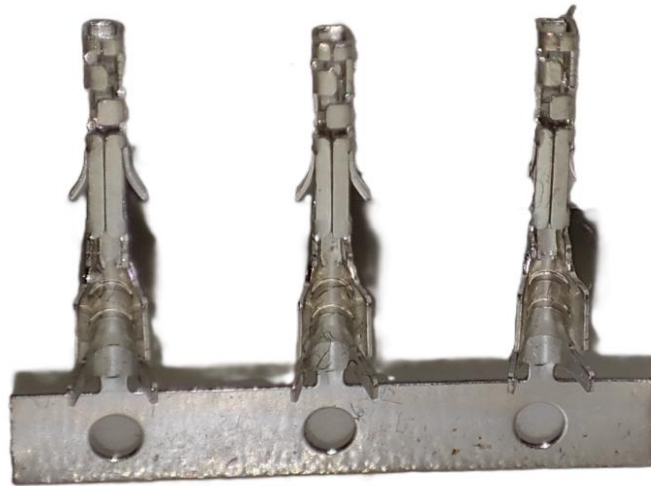


Рисунок 3.23 – Піни 3 мм MFW



Рисунок 3.24 – Кріплення піну до дроту

Також їх треба ізолювати, щоб вони не коротили, це робиться за допомоги ізоляційної стрічки та запальнички. Спочатку, щільно намотується ізоляційна стрічка, так щоб перекрити оголені частини піна, окрім входу. Далі потрібно нагріти ізоляцію, щоб вона ще щільніше сіла на дроті. Цей процес показано на рис. 3.25. Таким чином можна уникнути небажаного контакту із другими оголеними контактами.

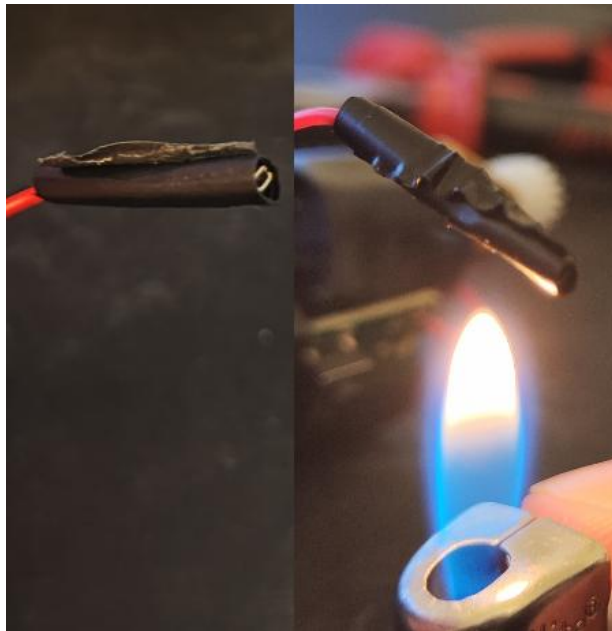


Рисунок 3.25 – Процес ізоляції

При ізолюванні важливо саме гріти ізоляцію, не підносячи полум'я занадто близько до ізоляції, тому що ізоляція загориться та обвуглиться і в результаті буде пухирчата (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – Обвуглення

Далі кріпиться мікроконтролер, а також підключається живлення від акумулятора через плату живлення та зарядки (рис. 3.27).



Рисунок 3.27 – Кріплення ESP32 та живлення

Щоб зробити маятник, буде використано паперові трубочки для напоїв. Відрізається 2,5 см трубочки та проливається клеєм для жорсткості (рис. 3.28).

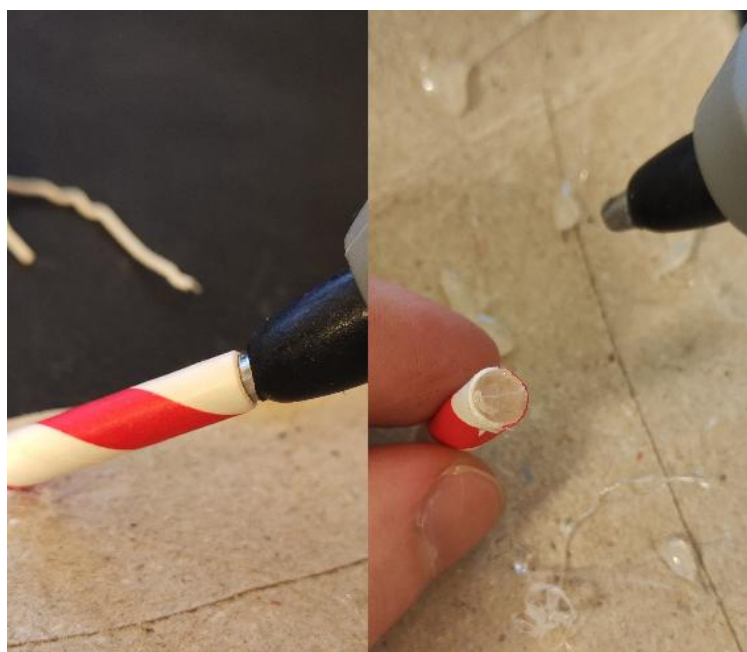


Рисунок 3.28 – Підготовка маятника

Маятник кріпиться на акумулятор знизу посередині приводу, кріпиться термоклеєм (рис. 3.29).

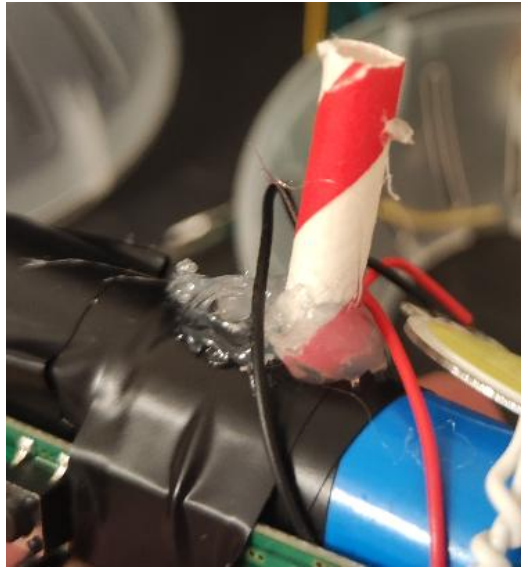


Рисунок 3.29 – Кріплення маятника

У якості тягарця буде використано шарики з підшипників, а також зірвану шестигранну головку болта, ці тягарці досить малі та важкі для такої задачі (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Тягарці

Тепер до маятника кріпляться тягарці, за допомоги термоклею. Два блискучі шари кріпляться паралельно, так як вони однакові, інші два тягарця відрізняються, але приблизно схожі за вагою. Це зображено на рис. 3.31.



Рисунок 3.31 – Кріплення тягарців до маятника

Далі треба підготувати драйвер моторів до встановлення у роботизованого розмінувальника. Спаюються контакти які будуть приймати однакові сигнали, або просто живлення. Вигляд підготовленого драйверу зображено на рис. 3.32.

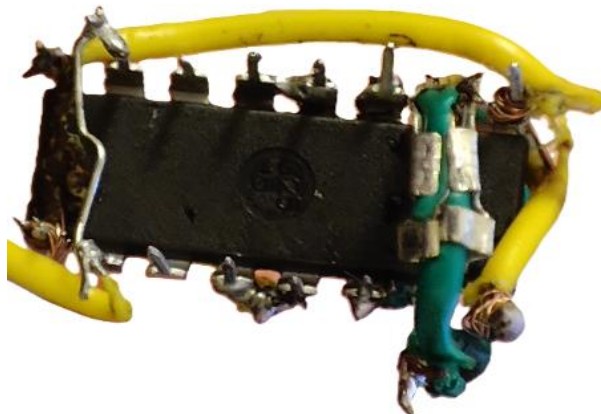


Рисунок 3.32 – Підготовлений драйвер моторів L293D

Тепер можна збирати роботизованого розмінувальника, паяються контакти живлення до акумулятора, а піни які приймають високий та низький

сигнали, підключаються до пінів D4 та D5 на мікроконтролері. Так як передбачено, що мотори обертаються тільки в одну сторону, мінус проведено на пряму від акумулятора, а плюс береться від драйверу. Вставляється привід у корпус. Результат збору макету робота показано на рис. 3.33.



Рисунок 3.33 – Макет роботизованого розмінувальника

У основі ідеї він повинен мати зовнішній захист у виді парасольок які будуть відпадати при підриві, щоб зменшити удар по основному корпусу та по приводу. Це зображено на рис. 3.34.

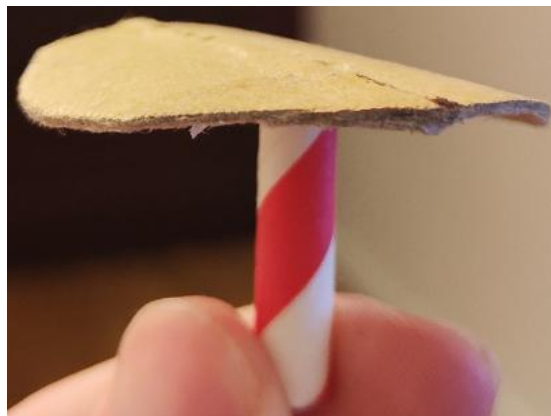


Рисунок 3.34 – Захисна парасолька

Але у макеті така конструкція з захисними парасольками призводить до дисбалансу рівноваги, а також корпус стане нерозбірним. Тому у макеті ці захисті парасольки не встановлено.

3.3 Розробка коду для мікроконтролера ESP-32

Для керування роботом на базі мікроконтролера ESP32, потрібна програма яка забезпечує бездротове керування через Wi-Fi за допомогою звичайного смартфона чи комп'ютера без встановлення додатків.

На першому етапі розробки підключаються необхідні бібліотеки та визначається кількість і котрі піни потрібні, потім оголошуються у скетчі. Було обрано піни 4 та 5, для керування моторами, задано ім'я та пароль точки доступу Wi-Fi. Також формується HTML-сторінка з простим і зручним веб-інтерфейсом та хендлери для обробки натискань на кнопку. Тест підключення до сайту з телефона, та вигляд сторінки для керування роботом показано на рис. 3.35.

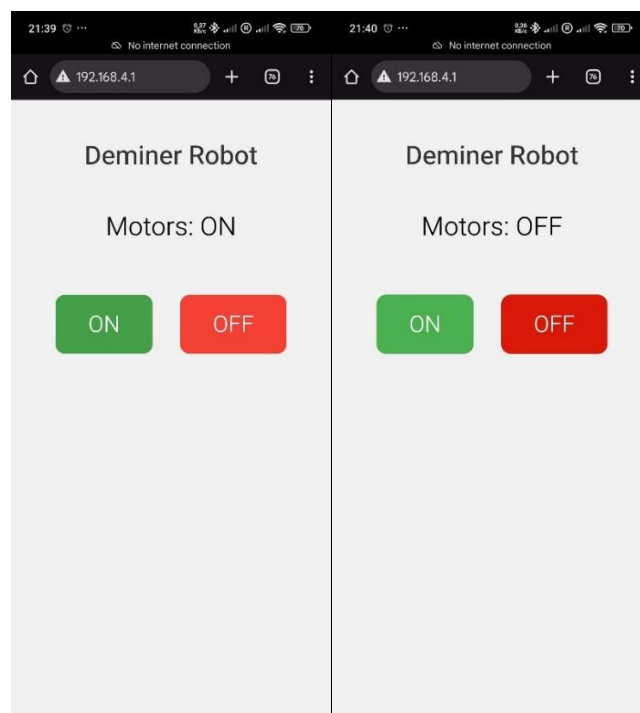


Рисунок 3.35 – Підключення до сайту з телефона

Далі представлено алгоритм функції «setup()» на рис. 3.36.



Рисунок 3.36 – Блок-схема алгоритму роботи функції setup

При запуску функції setup контролером відбувається ініціалізація послідовного порту для відлагодження, піни 4 та 5 переводяться у режим виходу та встановлюються в стан LOW. Після чого мікроконтролер запускає власну точку доступу та виводить IP-адресу точки доступу, налагоджує

обробники HTTP-запитів. Під кінець функції, запускає веб-сервер і виводить це у консоль.

Далі представлено алгоритм програми мікроконтролера на рис. 3.37.

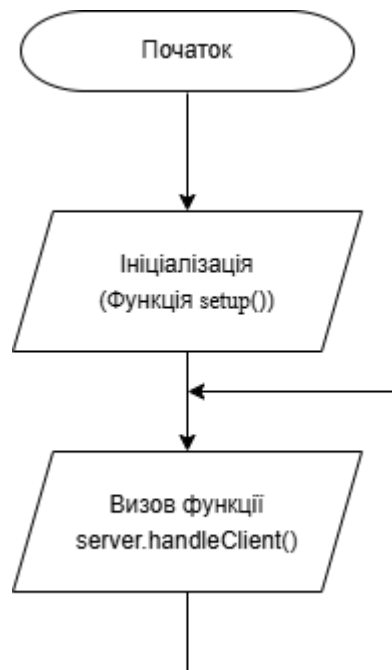


Рисунок 3.37 – Блок-схема програми мікроконтролера

З рис. 3.36 можна побачити що у функції loop постійно викликається функція `server.handleClient`, яка обробляє вхідні запити від клієнтів.

Алгоритм праці робота простий. Спочатку користувач підключається до Wi-Fi мережі «Deminer» з будь-якого пристрою. У браузері відкриває адресу 192.168.4.1 і бачить мінімалістичну сторінку з назвою «Deminer Robot», на ній є надпис з поточним станом моторів та двома великими кнопками ON і OFF. При натисканні кнопки ON браузер надсилає GET-запит `/on`, а обробник `handleOn` встановлює обидва піни моторів у HIGH, мотори починають обертатися вперед, клієнту повертається текст «Motors: ON», який одразу відображається на сторінці. А При натисканні кнопки OFF надсилається запит `/off`, і обидва піни скидаються в LOW, мотори зупиняються, а клієнту

повертається «Motors: OFF». Блок-схему алгоритму роботи робота представлено на рис. 3.38.

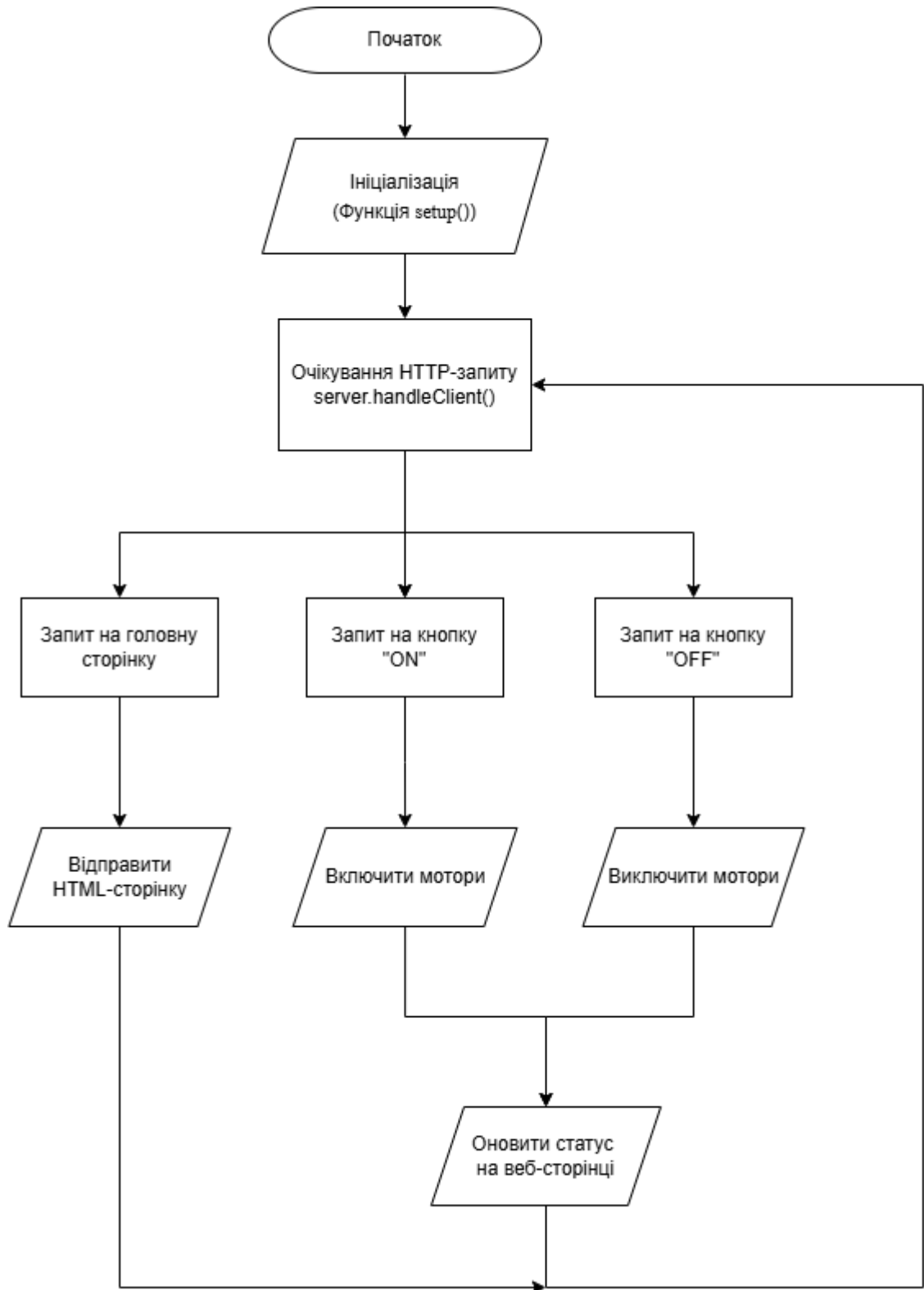


Рисунок 3.38 – Блок-схема алгоритму роботи робота

Таким чином, робот отримав дистанційне керування рухом по Wi-Fi, без використання пультів, додатків чи складних протоколів. Написаний код мікроконтролера ESP32 наведено у додатку А.

4 РОЗРАХУНКИ ДИНАМІКИ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТИ

Щоб робот почав рух, моторчики повинні підняти маятник на такий кут, при якому створений крутний момент перевищить опір качанню робота, а також силу тяжіння при наїзді на нахил.

4.1 Розрахунок динаміки

Щоб робот міг рухатись і долати перешкоди, маса тягарця на кінці важеля повинна бути така ж сама як і маса робота, або перевищувати її. Тобто якщо маса тягарця менша за масу робота:

$$m = 0.5 \cdot M, \quad (4.1)$$

де m – маса важелю;

M – маса робота.

То, робот буде дуже повільний та встане при наїзді на будь-який нахил. А якщо, маса тягарця така ж сама, або трохи перевищує:

$$m = 1 \dots 1.5 \cdot M, \quad (4.2)$$

де m – маса важелю;

M – маса робота.

Це буде оптимальним рішенням для маневреності робота, він зможе заїжджати на невеличкі нахили та достатньо швидко пересуватися по рівній поверхні.

Також, якщо маса важелю буде значно перевищувати масу робота:

$$m = 3 \cdot M, \quad (4.3)$$

де m – маса важелю;

M – маса робота.

Робот стане дуже швидким та зможе долати перешкоди з більшим нахилом, але його інерція буде перешкоджати його гальмуванню.

Дуже важливо розуміти, що центр тяжіння важелю, тобто тягарець, повинен бути як можна далі від центру робота, щоб зробити максимальний можливий важіль.

Одним із найважливіших моментів для руху робота, це нахил маятника. Для початку руху, кут нахилу маятника може доходити від 10° до 30° , а максимальна тяга буде при куті 90° , таке положення дає максимальний крутний момент. Якщо кут нахилу маятника перевищить 90° , то ефективність почне падати.

При подоланні перешкод крутний момент маятника повинен бути більше за умову статичної рівноваги:

$$m \cdot L \cdot \sin(\theta) > (M + m) \cdot R \cdot \sin(\alpha), \quad (4.4)$$

де m – маса тягарця;

L – довжина від центру до центру маси тягарця;

θ – кут нахилу маятника;

M – маса робота (без тягарця);

R – радіус сфери;

α – кут нахилу поверхні.

Тобто, припустимо що маса робота 130 грам, а його радіус 6,5 см, довжина маятника 5 см, а маса тягарця перевищує масу робота у 2 рази, то за статичним рівнянням (4.4):

$$0.26 \cdot 5 \cdot \sin(90^\circ) > (0.13 + 0.26) \cdot 6.5 \cdot \sin(10^\circ)$$

$$1,3 > 0,44$$

Виходячи з цього рівняння, крутний момент робота, з такими даними буде 0,75 кг · см, а крутний момент рівноваги при куті нахилу у 10° буде 0,44 кг · см, тому робот може без проблем долати перешкоди з кутом 10°.

4.2 Експеримент переміщення по нахилу

Підставка з нахилом 11°, макет вагою 150 г, та тягарець 100 г, довжина маятника 4,5 см (рис. 4.1).

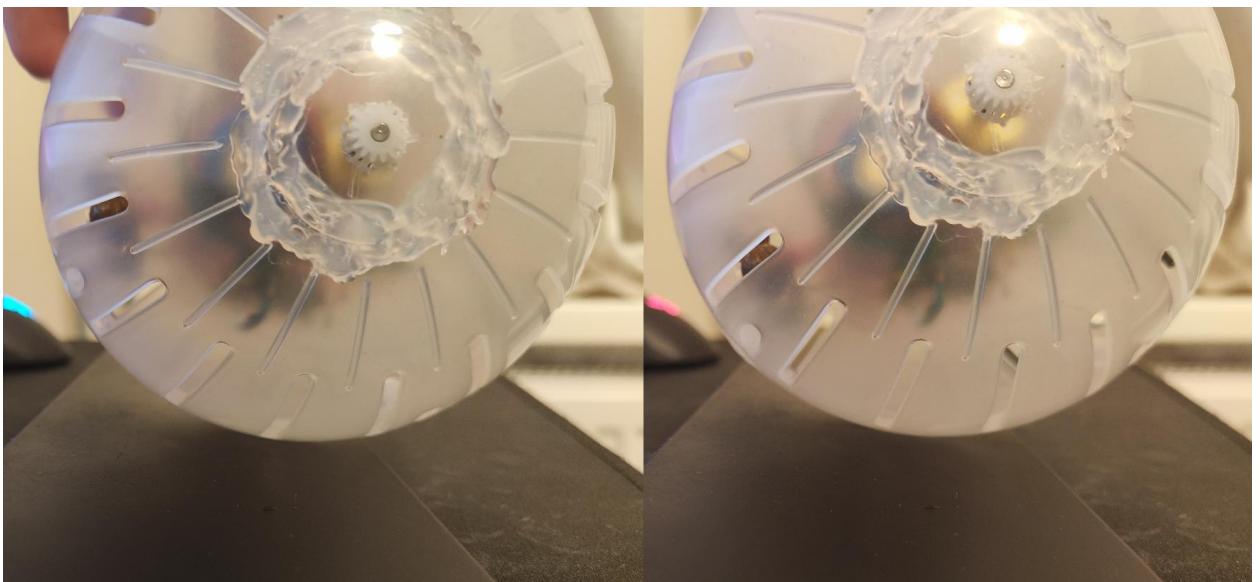


Рисунок 4.1 – Статика макету при нахилу 11°

Згідно умові статичної рівноваги (4.4) макет має $0,45 \text{ кг} \cdot \text{см}$ крутного моменту, а для того, щоб макет не скотився, з нахиленої платформи, потрібно $0,31 \text{ кг} \cdot \text{см}$ крутного моменту. На рисунку можна побачити що кут при статиці приблизно 45° , у такому разі макет має $0,32 \text{ кг} \cdot \text{см}$ крутного моменту. Максимальний кут на котрий макет роботизованого розмінувальника заїде без інерції, це 16° , що потребує $0,44 \text{ кг} \cdot \text{см}$ крутного моменту. При спробі збільшити кут нахилу, приблизно до 16° , кут маятника, при утриманні свого положення, майже, досягає 90° (рис. 4.2).

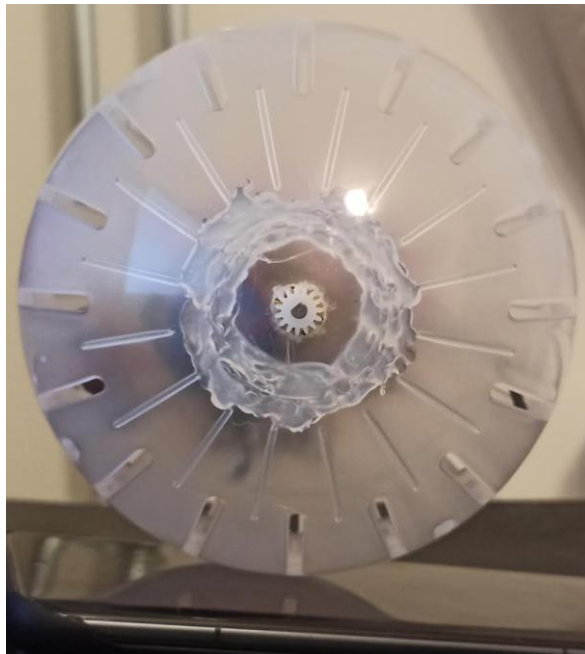


Рисунок 4.2 – Статика макету при нахилу 16°

4.3 Математична модель керування зі зворотним зв'язком

Якщо до робота додати акселерометр з гіроскопом, та задати роботу задачу утримувати маятник під кутом 90° , то можна зробити рівняння помилки:

$$e(t) = \theta_{\text{задане}} - \theta_{\text{актуальне}}(t), \quad (4.5)$$

де $\theta_{\text{задане}}$ – заданий кут нахилу маятника 90° ;

$\theta_{\text{актуальне}}(t)$ – фактичний кут нахилу маятника у момент часу t .

А щоб двигун плавно та точно утримував цей кут, використовується алгоритм ПІД-регулювання:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.6)$$

де $e(t)$ – помилка управління;

$K_p(t)$ – коефіцієнт пропорційного посилення;

$K_i(t)$ – коефіцієнт інтегрального посилення;

$K_d(t)$ – коефіцієнт диференційного посилення.

Також буде добавлено логіку при застряганні. Коли робот, наприклад, уперся в стіну, датчик не дає сигнал о прискоренні, а кут маятника не змінюється, цей стан триває деякий період часу, тоді буде подано команду на вимкнення живлення моторів для уникнення перегрівання.

4.4 Охорона праці

Роботизований розмінувальник має забезпечувати безпечне розмінювання на відстані, а скільки це пристрій, що взаємодіє з вибухонебезпечними об'єктами, охорона праці має бути суворою, щоб мінімізувати ризики для операторів, персоналу та навколишнього середовища.

До травматизму відноситься:

- небезпечна відстань спостереження за процесом розмінювання;
- неправильне поводження з роботом.

До професійних захворювань та отруєнь можна віднести:

- посттравматичний стресовий розлад, депресія від постійного ризику;
- проблеми зі слухом від вибухів;
- вплив шкідливих хімічних речовин на організм при підриві мін.

До пожежі та вибухів:

- вибух мін;
- займання хворосту та інших легко займистих предметів які можуть бути поблизу вибуху, внаслідок чого може бути пожежа.

Забруднення навколишнього середовища є вибуховими сполуками мін.

Основна небезпека це:

- неконтрольований підрив мін;
- втрата керування, робот може зупинитися на міні;
- помилка оператора у призначенні маршруту;
- пожежа від підриву;
- токсичні гази після вибуху.

Для того щоб уникнути травм, потрібно проводити інструктаж перед використанням роботизованого розмінувального. Основні правила для запобігання травм це:

- неможна становитися на маршруті роботизованого розмінувального;
- залишатися у безпечному місці під час розмінування;
- ні в якому разі не підходити до небезпечної зони, навіть якщо там застряг роботизований розмінувальник.
- при пожежі не можна заходити у зону з мінами;
- одразу після вибуху, неможна виходити з безпечного місця, так як уламки все ще можуть падати, або може бути спровоковано декілька вибухів;
- не вмикати робота у замкнутому просторі;
- завжди планувати маршрут робота;
- при пожежі вимкнути робота;
- при неконтрольованих підривах вимкніть робота;
- не підходити до робота для його вимкнення;
- не торкатися увімкненого роботизованого розмінувального.

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи було проведено аналіз сучасних систем розмінування, особливостей мін та вимоги до розмінувальних роботів. Також була проведена оцінка ефективності різних конструктивних форм. Оцінено перспективи застосування округлих форм у роботизованих розмінувальників. Розглянуто методи виявлення та знешкодження мін.

Роботизований розмінувальник розроблювався для розмінування мінних полів на постконфліктних територіях, а також із можливістю використання для гуманітарного розмінування. Було розроблено макет, та написано код для мікроконтролеру. Для макету управління зроблено через локальну мережу. Концепція роботизованого розмінувальника передбачала багаторазове використання на полі за допомоги змінних захисних пластин на ніжках, у макеті не вдалося це реалізувати із-за того, що роботизований розмінувальник стане нерозбірним та втратить балансування.

Були виконані наступні задачі:

- проведено аналіз існуючих системи розмінування;
- проведено аналіз типів мін і вимоги до роботів для їх знешкодження;
- досліджено та обрано метод знешкодження мін;
- розроблено макет роботизованого розмінувальника;
- розроблено код для мікроконтролера;
- зроблено розрахунки динаміки;
- розроблено математична модель керування зі зворотним зв'язком;
- розроблено підрозділ про охорону праці;

Досягнуто переміщення робота за рахунок зміщення центру ваги. Реалізовано це двома моторами які підіймають маятник з тягарцями на кінці, без зупинки.

Результати роботи можна віднести до цілей сталого розвитку: ціль 9. Індустріалізація, інновації та інфраструктура.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «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, 2024. 57 с.

3. Сириця О. О. Сферичний робот для гуманітарного розмінування: доступне рішення для безпечного майбутнього / О. О.Сириця, Д. В Гурін // Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2025 : тези доповідей II-ої Всеукраїнської конференції, 16-17 травня 2025. - Харків, 2025. – С. 106-109. / URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/30232>

4. 17 Цілей сталого розвитку | Global Compact. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku> (дата звернення: 12.10.2025).

5. DOK-ING MV-4 | Міношукачі Україна. Міношукачі Україна. URL: <https://minoshukach.com.ua/wiki/texnika-dlya-rozminuvannya/dok-ing/dok-ing-mv-4/> (дата звернення: 04.05.2025).

6. MED-ENG Avenger LT | Міношукачі Україна. Міношукачі Україна. URL: <https://minoshukach.com.ua/wiki/texnika-dlya-rozminuvannya/med-eng/med-eng-avenger-lt/> (дата звернення: 04.05.2025).

7. MED-ENG ROV Integrated Sensor Suite | Міношукачі Україна. Міношукачі Україна. URL: <https://minoshukach.com.ua/wiki/tehnika-dlya-rozminuvannya/med-eng/med-eng-rov-integrated-sensor-suite/> (дата звернення: 04.05.2025).

8. Bombs Away: EOD Disposes of Explosive Threats. DVIDS. URL: <https://www.dvidshub.net/image/1704852/bombs-away-eod-disposes-explosive-threats> (дата звернення: 05.05.2025).

9. FLIR Fido X4 Premium Handheld Explosives Trace Detector | Teledyne FLIR. URL: <https://www.flir.com/products/fido-x4> (дата звернення: 06.05.2025).

10. MV-10 - DOK-ING. DOK-ING. URL: <https://dok-ing.hr/defence-security/mv-10/> (дата звернення: 07.05.2025).

11. BOŽENA - Way Industries. Way Industries. URL: <https://way.sk/produkt/bozena/> (дата звернення: 07.05.2025).

12. ESP32 -32D Entwicklungsboard Drahtloses WiFi-Bluetooth-Modul Extrem geringer Stromverbrauch Dual Core 30Pin ESP 32 für Smart Home - AliExpress 44. aliexpress. URL: <https://www.aliexpress.com/item/1005006336964908.html> (дата звернення: 15.11.2025).

13. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки першого (бакалаврського) рівня усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, О. В. Мамонтов. – Харків, 2024. – 164 с.