

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

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Розроблення макета мобільного робота з системою комп'ютерного  
зору для розпізнавання вибухонебезпечних предметів  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи АКТАКІТ-21-2  
Андрій КАРПЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Владислав ЄВССЄВ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я , Карпенко Андрій Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із 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.

02 червня 2025 р.



Андрій КАРПЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
«03» травня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Карпенко Андрію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення макета мобільного робота з системою  
комп'ютерного зору для розпізнавання вибухонебезпечних предметів

затверджена наказом університету від 19 травня 2025 р. № 390 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 08 червня  
2025р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Коефіцієнт тертя між робочою поверхнею та колесом робота – 0.9;

3.2 Мінімальна швидкість за рівномірного прямолінійного руху – 0,0125 м/с;

3.3 Класова втрата нейронної мережі кінцевого тренування – менше за 0.5;

3.4 Втрата координат рамки кінцевого тренування – менше за 0.75;

3.5 Класова втрата кінцевої хресної перевірки – менше за 1;

3.6 Втрата координат рамки кінцевої хресної перевірки – менше за 1.25;

3.7 Повнота моделі – більше за 0.7

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз сучасних мобільних роботів для знаходження вибухонебезпечних предметів;

4.3 Розробка апаратної частини мобільного робота;

4.4 Розробка програмної частини мобільного робота;

4.5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt). – с. 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	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних мобільних роботів для знаходження вибухонебезпечних предметів	05.05.2025 – 11.05.2025	виконано
2	Розробка апаратної частини мобільного робота	12.05.2025 – 18.05.2025	виконано
3	Розробка програмної частини мобільного робота	19.05.2025 –	виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	31.05.2025 – 01.06.2025	виконано
5	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	02.06.2025 – 03.06.2025	виконано
6	Подання роботи на рецензію	04.06.2025 –	виконано
7	Подання роботи на підпис зав. кафедри	06.06.2025 –	виконано
8	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	07.06.2025 –	виконано

Дата видачі завдання 03 травня 2025 р.

Здобувач

  
(підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрій КАРПЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

професор Владислав ЄВСЄЄВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 7 табл., 45 рис., 9 дод., 73 джерел

КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, РОЗМІНУВАННЯ, ВИБУХІВКА, ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИЙ ПРЕДМЕТ, МІНА, РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ, РОБОТ, РОБОТОТЕХНІКА, YOLOV8.

Мета роботи – покращення якості розпізнавання вибухонебезпечних предметів для мобільних роботів за рахунок навчання нейронної мережі моделі YOLOv8.

Об'єкт розробки – процеси розпізнавання вибухонебезпечних предметів.

Предмет розробки – апаратне, алгоритмічне, програмне забезпечення для розпізнавання вибухонебезпечних предметів на базі нейронної мережі для мобільних роботів.

В даній роботі було описано процес розробки мобільного робота з системою розпізнавання образів для пошуку вибухонебезпечних предметів: було проаналізовано сучасні конструкції таких роботів, їх системи керування та способи знаходження вибухонебезпечних предметів, сформовано вимоги до робота, розроблено його структурну схему, вибрано апаратні модулі, включно з розрахунками необхідних характеристик двигунів коліс та їх вибором. Було зібрано робота, створено схему підключення його модулів та виконано аналіз стійкості серводвигуна.

Також, було створено алгоритми роботи складових робота: прошивок контролерів руху та камери, мобільного додатку для керування руху та системи розпізнавання образів. Для кожної із зазначених складових, було вибрано середовище розробки та створено код. Для системи розпізнавання

образів, було вибрано модель нейронної мережі та виконано її тренування. Наостанок, було виконано тестування системи розпізнавання образів.

## ABSTRACTS

The explanatory note contains 71 pages, 7 spreadsheets., 45 figures., 9 pp., 73 sources

COMPUTER VISION, DEMINING, EXPLOSIVE, EXPLOSIVE DEVICE, MINE, LANDMINE, OBJECT DETECTION, ROBOT, ROBOTICS, YOLOV8.

The goal of the work is to improve the detection of explosives by training a neural network of YOLOv8 model.

Object of design – explosive devices detection process.

Subject of design – hardware, algorithms and software for explosive devices detection, based on neural network.

In this document, the process of developing mobile robot with computer vision system for explosives detection was described: modern constructions of such robots, their control systems and detection methods of explosives were analyzed, requirements for robot were formed, his structural schematics was designed, hardware was chosen, including wheel drives, with provided calculations. The robot was constructed afterwards, with its connection schematics provided, while the stability of control system for servo drive for camera movement was estimated.

Moreover, for movement controller, camera, mobile application for movement control and object detection system, algorithms were developed, development environments were chosen, and code was written. As for object detection system, model was chosen and training was performed. Lastly, the computer vision system was tested.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	10
Вступ.....	11
1 Аналіз сучасних мобільних роботів для знаходження вибухонебезпечних предметів .....	13
1.1 Аналіз конструкцій роботів.....	13
1.2 Аналіз систем керування мобільними роботами .....	17
1.3 Аналіз методів розпізнавання вибухонебезпечних предметів .....	19
2 Розробка апаратної частини мобільного робота .....	25
2.1 Розробка структурної схеми мобільного робота.....	25
2.2 Вибір апаратних модулів.....	26
2.3 Складання робота .....	32
2.4 Розрахунок крутного моменту та лінійної швидкості двигунів коліс ....	34
2.5 Аналіз стійкості та виду затухання серводвигуна mg90s .....	38
3 Розробка програмної частини мобільного робота .....	41
3.1 Побудова алгоритму роботи робота.....	41
3.2 Вибір моделі нейронної мережі для розпізнавання об'єктів .....	46
3.3 Вибір засобів розробки .....	47
3.4 Розробка системи керування рухом мобільного робота .....	51
3.5 Розробка системи обробки зображення .....	52
3.6 Тестування роботи системи комп'ютерного зору.....	55
3.7 Охорона праці .....	59
Висновки .....	61
Перелік джерел посилання .....	63
Додаток А Апробація результатів роботи .....	72
Додаток Б Характеристики апаратних модулів .....	76
Додаток В Порівняння моделей нейронних мереж .....	80
Додаток Г Лістинг програми керування рухом мобільного робота .....	82

Додаток Д Лістинг програми керування рухом мобільного робота .....	83
Додаток Е Лістинг програми передачі зображення з камери до веб-сервера.	87
Додаток Ж Лістинг програми обробки потоку відео нейронною мережею ...	90
Додаток И Лістинг програми тестування моделі на зображеннях різної яскравості .....	92
Додаток К Демонстраційний матеріал.....	95

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКІТ – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології;

ДСТУ – державний стандарт України

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

САПР – системи автоматизованого проєктування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

DOК-ING – DO and engineering;

МН – mine hunter;

YOLOv8 – you only look once version 8.

## ВСТУП

Відповідно до [1], станом на 29 лютого 2024 року Україна посідає перше місце за площею замінованої території. Через це, наразі Україна потребує 37 мільярдів доларів та 10 тисяч саперів, з яких має 250 мільйонів доларів та 3 тисячі саперів. Також, відповідно до [2], за 2022 рік Україна посіла друге місце в світі з кількості постраждалих від протипіхотних мін.

Зазначені статистичні дані можна пояснити великою кількістю запасів вибухонебезпечних предметів в країні-агресора та намірами представників останньої регулярно порушувати міжнародні норми на кшталт пункту 4 статті 51 першого додатку до Женевської конвенції про захист цивільного населення від непрямих військових атак [3]. Через це, кількість вибухонебезпечних предметів для розмінування на території України є відносно великим та зростатиме з плином військової агресії.

Для вирішення зазначеної проблеми необхідно вживати заходи з розмінування, при чому в якомога більш безпечних умовах для життя та здоров'я сапера. В даному випадку, мобільні роботи є оптимальним вирішенням проблеми: вони можуть рухатися на місцевості віддалено від оператора, зберігаючи життя останнього. Втім, існуючі аналоги мають свої недоліки, про які буде зазначено в першому розділі даної роботи.

Таким чином, мета даної роботи – покращення якості розпізнавання вибухонебезпечних предметів для мобільних роботів за рахунок навчання нейронної мережі моделі YOLOv8.

Об'єкт розробки – процеси розпізнавання вибухонебезпечних предметів.

Предмет розробки – апаратне, алгоритмічне, програмне забезпечення для розпізнавання вибухонебезпечних предметів на базі нейронної мережі.

Для досягнення поставленої мети, необхідно:

- проаналізувати існуючі макети мобільних роботів: їх конструкції, системи керування та методи пошуку вибухонебезпечних предметів;
- розробити структурну схему мобільного робота;
- вибрати апаратні модулі;
- зібрати макет мобільного робота;
- дослідити на стійкість модулі робота із замкненими системами керування;
- вибрати середовище розробки програмних складових, а також моделі системи розпізнавання образів;
- побудувати програмні складові;
- виконати тестування системи комп'ютерного зору.

Кваліфікаційну роботу виконано згідно з ДСТУ 3008–2015 [4], та керуючись навчальним посібником з дипломного проектування [5] і відповідними методичними вказівками [6].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

## 1.1 Аналіз конструкцій роботів

В першу чергу, міннопошуковий робот має розпізнати вибухівку на робочій ділянці з метою знешкодити міну або власноруч, або шляхом втручання оператора. Загалом, досліджено безліч способів знаходження вибухонебезпечних предметів: від найбільш поширеного металошукача до біологічних датчиків, що імітують роботу нюху тварин шляхом реєстрації молекул вибухонебезпечних речовин у повітрі [7]. Втім, практично лише деякі із зазначених методів використовують у масовому розмінуванні (рис. 1.1).

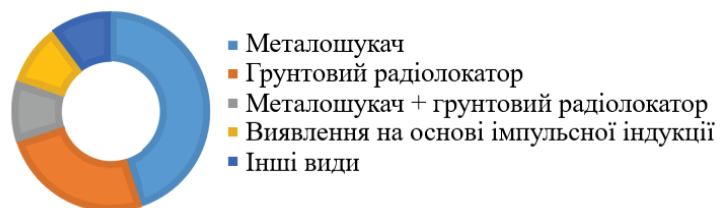
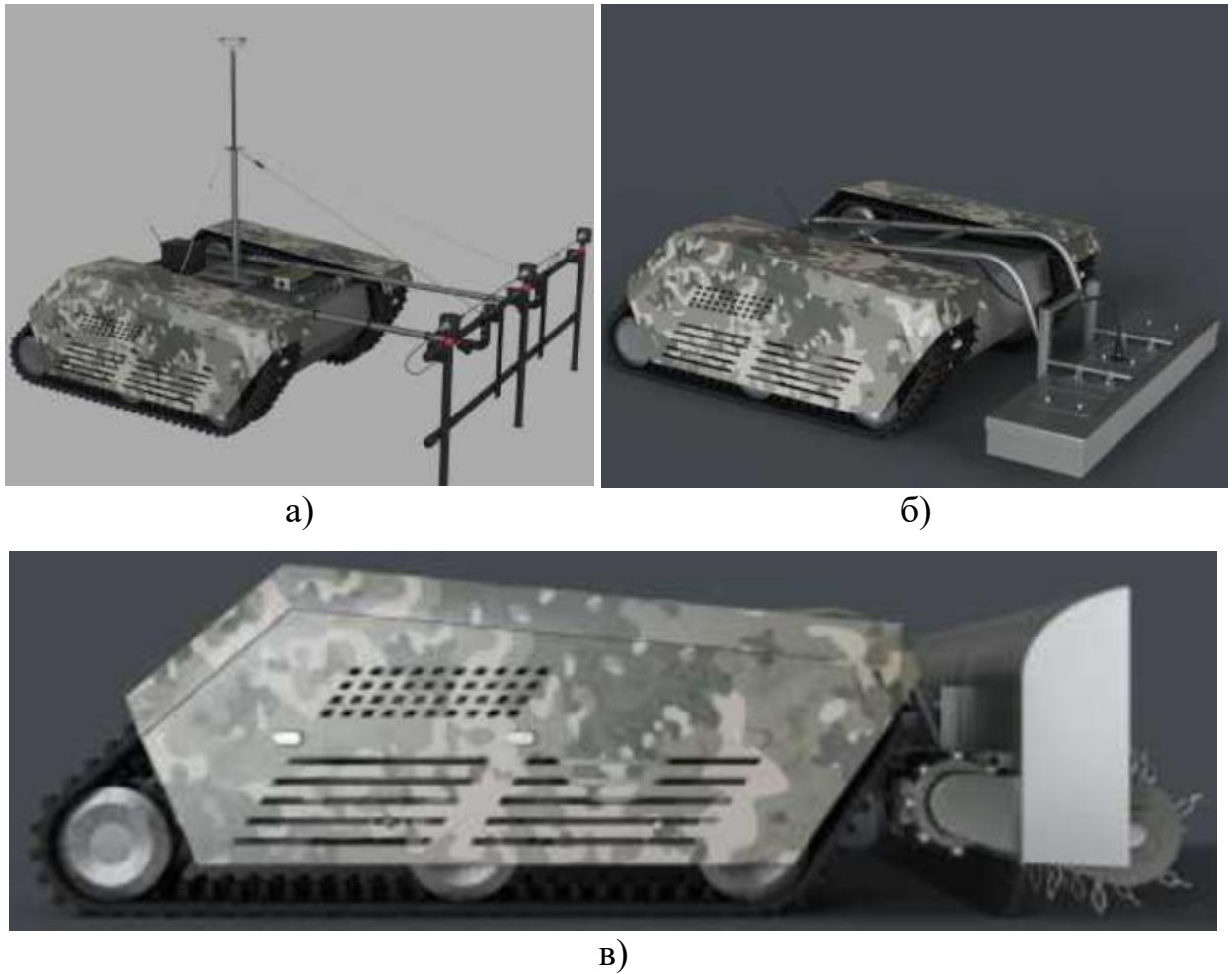


Рисунок 1.1 – Розподіл методів виявлення вибухонебезпечних предметів серед мобільних роботів [7]

Найбільш популярним рішенням серед мобільних роботів для роботи з вибухівкою є безпосередня детонація, яку використовують в агрегатах на кшталт DOK-ING [8] або Leotronics TrackReitar CleanField MH (MineHunter) [9] (рис. 1.2, в).

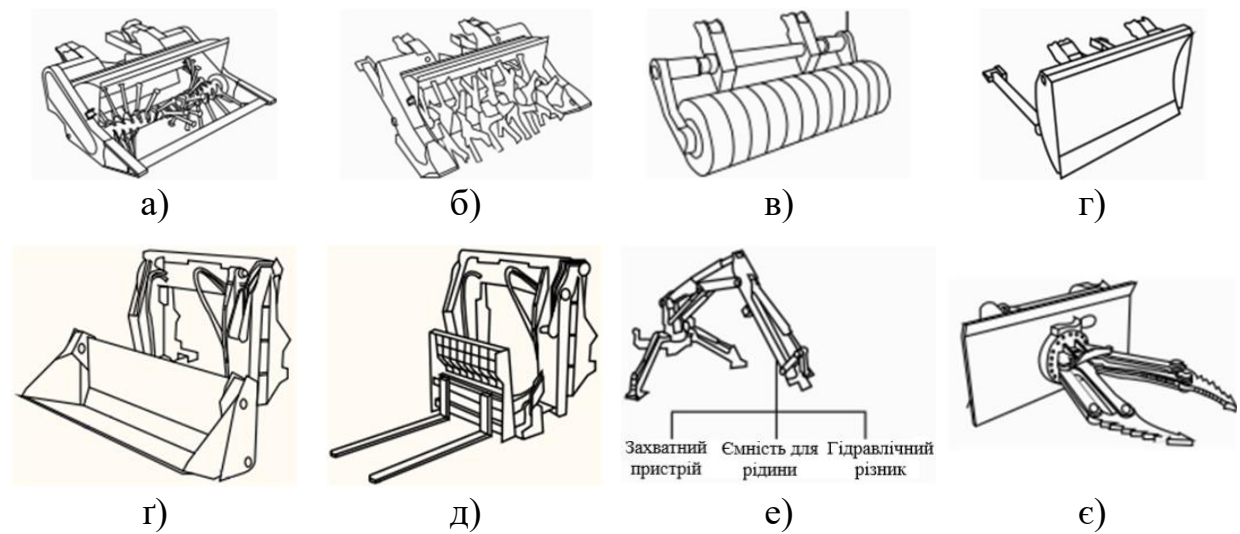


а) радіолокація ґрунту; б) металопошук; в) безпосередньо детонація.

Рисунок 1.2 – Найбільш поширені методи знаходження вибухонебезпечних предметів [10]

Зазначені роботи зазвичай мають великі габарити (як приклад,  $345 \times 178 \times 152$  см для DOK-ING MV-2 та  $728 \times 297 \times 213$  см для DOK-ING MV-10) через те, що їх передня частина зазвичай детонує вибухонебезпечні предмети. В Україні їх використовують найбільше через можливість швидкого розмінування таких територій з великою площею, як зернові поля: даному агрегату не потрібно витрачати час на оминання знайдених вибухівок та їх позначення на місцевості: робот може проїхати по міні та залишитися цілим. Також, їх структура дозволяє прикріпляти інструменти для очищення території, що полегшує роботу в рослинних місцевостях та дає можливість

повторно використовувати робота для вирішення завдань, не пов'язаних з розмінуванням (рис. 1.3).



а) цеп; б) – румпель; в) сегментований ролик; г) бульдозерний відвал;  
г) задня лопата; д) задній підйомник; е) маніпулятор; є) поворотний захват.

Рисунок 1.3 – Обладнання DOK-ING MV-4

У той же час, дані роботи мають певні вади: знайдені вибухівки обов'язково детонують, що руйнує елементи навколишнього середовища; встановлені спереду цеп або румпель можуть застрягти в землі під час руху по похилій поверхні; робота не можна використовувати в густо забудованій місцевості через великі габаритні розміри, а в лісах – через неспроможність додаткового обладнання високопродуктивно рубити дерева.

У випадках, коли зазначені недоліки є суттєвими, здебільше використовують рішення на основі металошукача (рис. 1.2, б) або радіолокатора (рис. 1.2, а). Металошукачі знаходять вибухівку шляхом розрахунку провідності електромагніта, у той час як радіолокатор пронизує землю радіохвилями з метою знайти неоднорідні ділянки землі, що свідчать про закопаний об'єкт на кшталт міни.

Металошукач набув найбільш широкого поширення через низьку вартість індуктивних датчиків у поєднанні з достатньо ефективним способом знаходження металевої вибухівки. Втім, системи на основі металошукача не можуть розпізнати неметалеві об'єкти, такі як пластикова міна. Більш того, через неоднорідність земної поверхні, в таких системах необхідно використовувати просунуті алгоритми обробки сигналів та знаходження вибухівки, адже в гіршому випадку багаті на металеві елементи ділянки землі будуть помилково визнані як заміновані.

Схожі проблеми має радіолокатор: незважаючи на можливість більш точно знаходити предмети з пластиковими предметами включно, радар може помилково визнавати шари землі з більшою щільністю як міни. Через це, міннопошукові роботи оснащують металошукачем разом з радіолокатором для підвищення точності розпізнавання.

Окрім зазначених на рисунку 1.2 конструкцій мобільних роботів, існують також інші (рис. 1.4), але які через певні недоліки застосовані виключно в наукових розробках. Так, COMET IV (рис. 1.4, а) може розмінювати вибухівки у важкодоступних місцях завдяки шести ногам, втім його швидкість руху є дуже низькою, через що використати сапера більш рентабельно, ніж наукову розробку. У той же час, конструкція Gryphon-a (рис. 1.4, б) дозволяє оператору за необхідності швидко рухатися по досліджуваній поверхні, і водночас виконувати розмінування дистанційно, втім зазначена архітектура не зазнала широкого поширення. Ймовірно, це пов'язано з високою вартістю складових маніпулятора та небезпечним розташуванням сидіння в робочій зоні маніпулятора.

Таким чином, в галузі мобільної робототехніки існує чимало досліджень структур роботів, втім лише деякі рішення використовують масово та поза межами лабораторних досліджень.



а)



б)

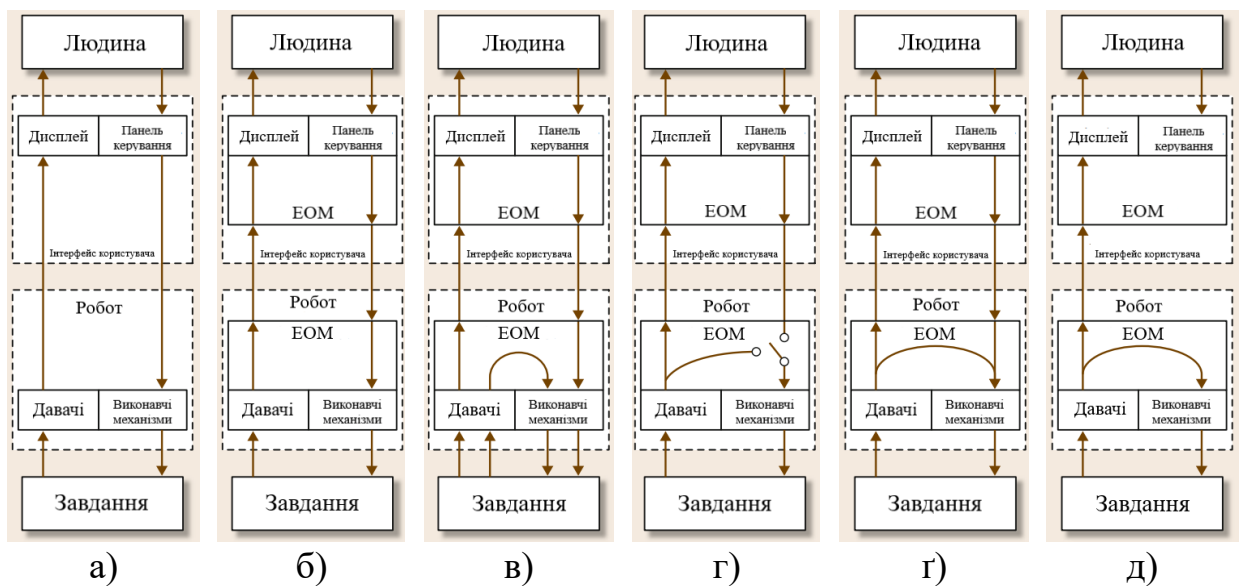
а) COMET IV [11]; б) Gryphon [12].

Рисунок 1.4 – Інші конструкції мобільних роботів

## 1.2 Аналіз систем керування мобільними роботами

Відповідно до рисунку 1.5, існує шість видів систем керування роботами.

За ручного керування, людина отримує на дисплеї безпосередньо дані з датчиків робота та надсилає команди з панелі оператора безпосередньо до виконавчих механізмів агрегату. В крайньому випадку, для обробки даних використовують електронно-обчислювальну машину (ЕОМ) у формі контролера, міні-комп'ютера та інше. Як приклад, такий принцип керування мають роботи-маніпулятори хірургічного обладнання, де на основі вказівок лікаря робот виконує певні дії над об'єктом. Щодо мобільних роботів, то цей тип керування характерний найпростіші підводні роботи.



- а) пряме ручне керування без ЕОМ; б) непряме ручне керування з ЕОМ;  
 в) автоматизоване керування паралельного типу; г) автоматизоване керування послідовного типу; г) автоматизоване керування змішаного типу;  
 д) автоматичне керування.

Рисунок 1.5 – Систем керування мобільними роботами [13]

Автоматизовані роботи керуються частково на основі команд оператора, частково – на основі алгоритму, записаного в ЕОМ. Як приклад, оператор може вказати марсоходу напрямок руху під час знаходження в диспетчерській, а перед кінцем робочого дня – вказати напрямок для автоматичного дослідження.

Наостанок, автоматичні роботи можуть виконувати завдання виключно за допомогою початкових даних, введених оператором. Як приклад, автономні автомобілі можуть налаштовувати власні швидкість та напрямок руху на основі введених пілотом даних про маршрут.

### 1.3 Аналіз методів розпізнавання вибухонебезпечних предметів

Як було зазначено в пункті 1.1, загалом існує безліч способів розпізнати вибухонебезпечний предмет [7]. У випадку прямої детонації робот контактує безпосередньо з поверхнею предмету з метою детонувати його (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – DOK-ING очищує місцевість від рослин на головному зображенні та детонує протипіхотну міну на вставному [13]

Такий метод ефективний для знаходження та розмінування предметів на місцевостях, де вибух не спричинить значних пошкоджень. Втім, його використання в місцевостях на кшталт міста або лісу є або небезпечним для навколишнього середовища, або неможливим через великі габарити агрегатів для розмінування.

Металошукач (рис. 1.7) найбільш часто використовують в розмінуванні через низьку ціну комплектуючих.

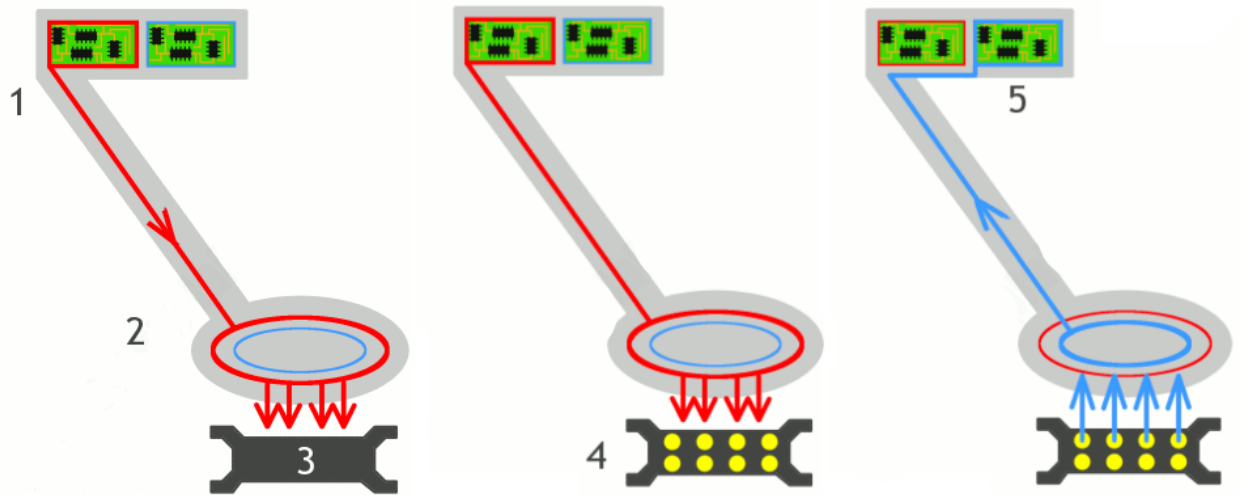
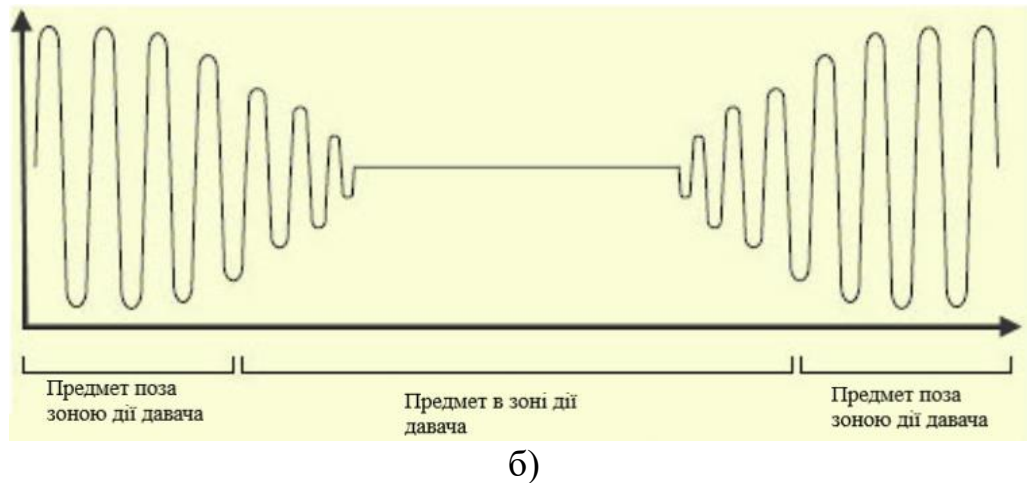
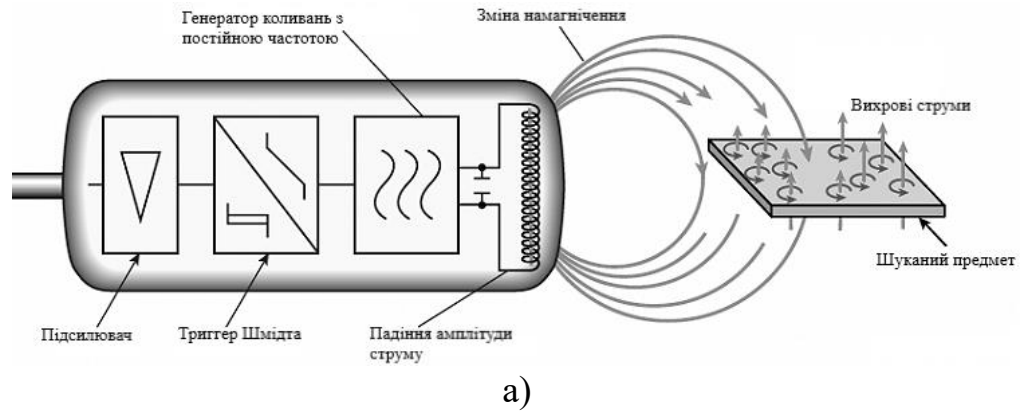


Рисунок 1.7 – Принцип роботи металошукача на основі електромагнітної індукції [14]

На рисунку 1.7, блок живлення (1) створює струм в червоному електричному колі (2), що створює магнітне коло навколо металевого об'єкта (3). Відповідно до закону електромагнітної індукції, в металевому об'єкті створюється потік електронів (4), що генерує магнітне поле, яке намагнічує синє коло (5), який сигналізує про існування металевого об'єкта.

Незважаючи на широку область застосування, металошукачі схильні до помилок через шумові завади, особливо в багатих на метал ґрунтах. Також, зазначені пристрої не можуть бути використані для пошуку неметалевих предметів.

Пошук на основі індуктивного датчика наближення працює на основі реєстрації змін в амплітуді згенерованих давачем коливань (рис. 1.8).



а) будова давача; б) сила струму в контурі котушки

Рисунок 1.8 – Принцип роботи металошукача на основі індуктивного датчика наближення [15]

В даному датчику, генератор коливань створює змінне магнітне поле (рис. 1.8, б, зліва та справа). Коли металевий об'єкт потрапляє в область дії давача, магнітне поле котушки індуктивності генератора коливань зменшується через протидіюче магнітне поле, яке генерують вихрові струми. Це призводить до зменшення сили струму на котушці, що реєструється тригером Шмідта. Надалі, сигнал підсилюється та надходить до пристроїв сигналізації. Такі давачі є більш точними за електромагнітний металошукач, але можуть шукати тільки на більш близькій відстані до предмета.

Ґрунтовий радіолокатор (рис. 1.9) одноразово надсилає радіохвилі під землі та реєструє форму відбитого сигналу.

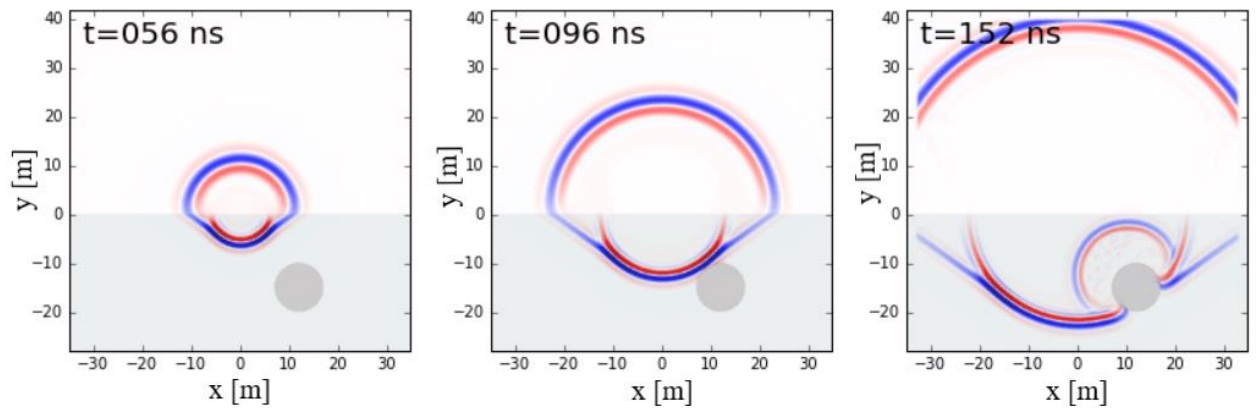


Рисунок 1.9 – Форма сигналу, надісланого ґрунтовим радіолокатором [16]

Даний метод корисний завдяки можливості реєструвати неметалеві об'єкти, втім налаштування такого давача є складним через можливі особливості місцевого ґрунту: розшарування ґрунту на більш та менш щільний може спричинити додаткове відлуння, а дрібні предмети можуть спотворити форму сигналу. Через це, такі системи можуть підсилювати сигналами інших спектрів (рентгенівського та інфрачервоного), втім такі доповнення не зазнали широкого поширення.

Наразі для знаходження предметів у мобільних роботах створюють системи комп'ютерного зору [17–19] (рис. 1.10).

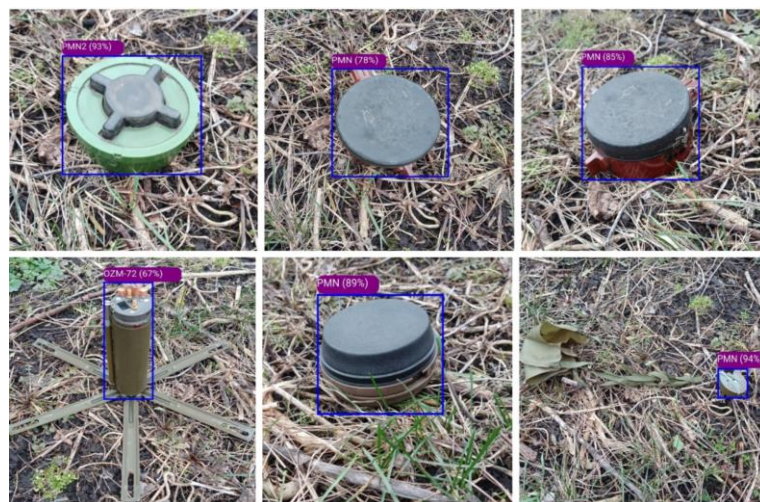


Рисунок 1.10 – Розпізнавання вибухонебезпечних предметів за допомогою нейронної мережі [19]

За даного метода, нейронна мережа тренується на наборі даних, де в окремих файлах збережено зображення для тренування, а в інших – координати рамки для обведення та номер класу, або іншими словами – ідентифікаційний номер предмету. Якщо вибір та налаштування початкового набору даних, а також саме тренування виконано правильно, то формується спеціальний алгоритм, за допомогою якого предмети можна знайти на нових зображеннях. Це корисно під час знаходження непомітних для людського ока предметів, таких як протипіхотні міни, але нейронні мережі є ймовірнісними: навіть найкращі системи можуть надати хибний результат, а великі мережі потребують значних витрат електроенергії.

Таким чином, було сформовано систематизовано переваги та недоліки кожного з методів виявлення вибухонебезпечних предметів та сформовано таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки методів розпізнавання вибухонебезпечних предметів

Метод	Переваги	Недоліки
1	2	3
Металошукач на основі електромагнітної індукції	Дешевий, чутливий до металевих об'єктів	Схильний до помилок через шумові завади, обмежений діапазон металів для виявлення
Металошукач на основі індуктивного датчика наближення	Висока точність в щільних ґрунтах	Обмежений радіус дії, виявлення виключно металів
Ґрунтовий радіолокатор	Можливість проникнення через ґрунт, висока точність локалізації	Складний в налаштуванні, великі витрати на обладнання

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Системи комп'ютерного зору	Висока точність ідентифікації непомітних об'єктів.	Залежний від освітлення та атмосферних умов, є ймовірнісним, велика вартість для точних систем

Таким чином, за умов наявності вибухонебезпечного предмету на зображенні з камери, системи комп'ютерного зору можуть знайти шуканий предмет, непомітний для людського ока.

## 2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 2.1 Розробка структурної схеми мобільного робота

Відповідно до власної назви, мобільний робот з системою розпізнавання образів має в першу чергу рухатися мобільно та розпізнавати об'єкти перед ним. Для дослідження робочих поверхонь до розмінування, найбільш доречно використати або дистанційне керування за допомогою пульта оператора, або алгоритми побудови мапи досліджуваної ділянки. Останній метод є більш зручним, втім менш адаптивним (робот має по-різному діяти в приміщенні та на відкритій поверхні). Більш того, програмна розробка алгоритму побудови цифрової мапи є тривалою. Таким чином, для якнайшвидшого отримання робочого проєкту, краще розробити систему керування за допомогою пульта оператора.

Розпізнавання образів можна вбудувати в саму камеру, або виконати у віддаленому середовищі на кшталт персонального комп'ютера. Для виконання першого з методів необхідно мати відповідне апаратне забезпечення: камеру, що має достатньо фізичної пам'яті для вивантаження моделі нейронної мережі та достатньо якісні відеокарту та оперативну пам'ять для обробки зображень в режимі реального часу. Зазначені камери як правило є дорогими порівняно з бюджетом на розробку макету, тому краще вибрати більш дешеву камеру, що надсилатиме зображення на віддалений пристрій.

Таким чином, оператор має мати можливість надсилати команди з панелі керування до робота, а також отримувати зображення з камери. Можливо створити єдину панель керування для виконання обох завдань, або можна відокремити обидві підсистеми одна від одної. В першому випадку, розроблений програмний засіб має одночасно виконувати два процеси, що в умовах бойових дій може бути вирішальним для цілісності робота. Тому, було вирішено розділити підсистеми руху та розпізнавання зображень.

Таким чином, було розроблено структурну схему проєкту, що збігається з рисунком 2.1.

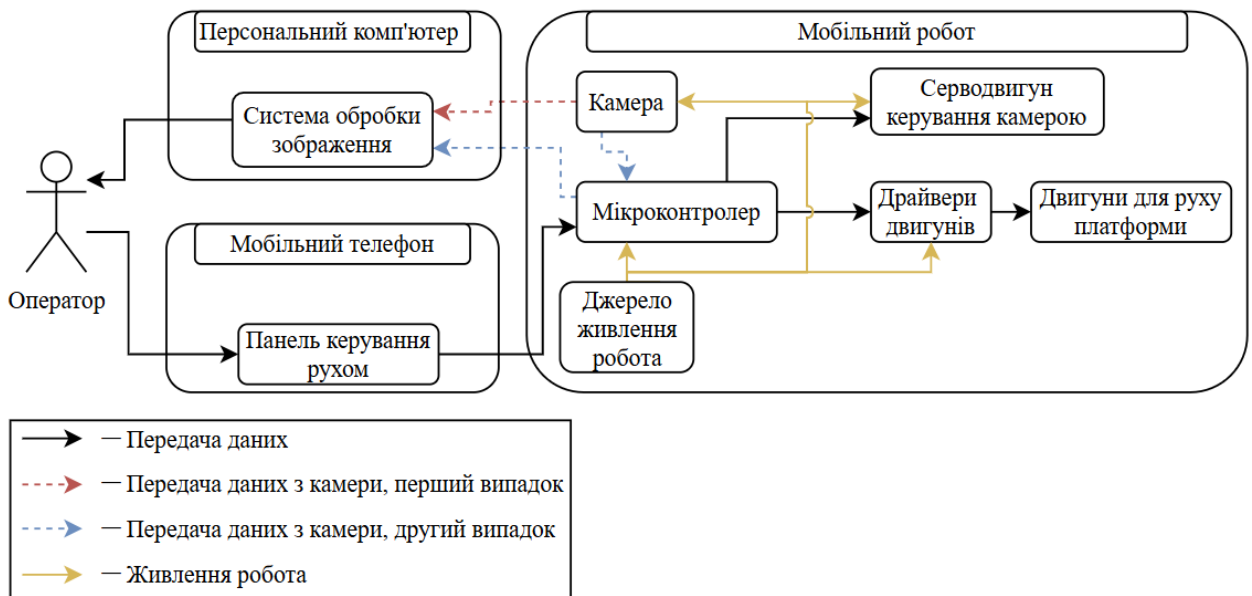


Рисунок 2.1 – Структурна схема мобільного робота

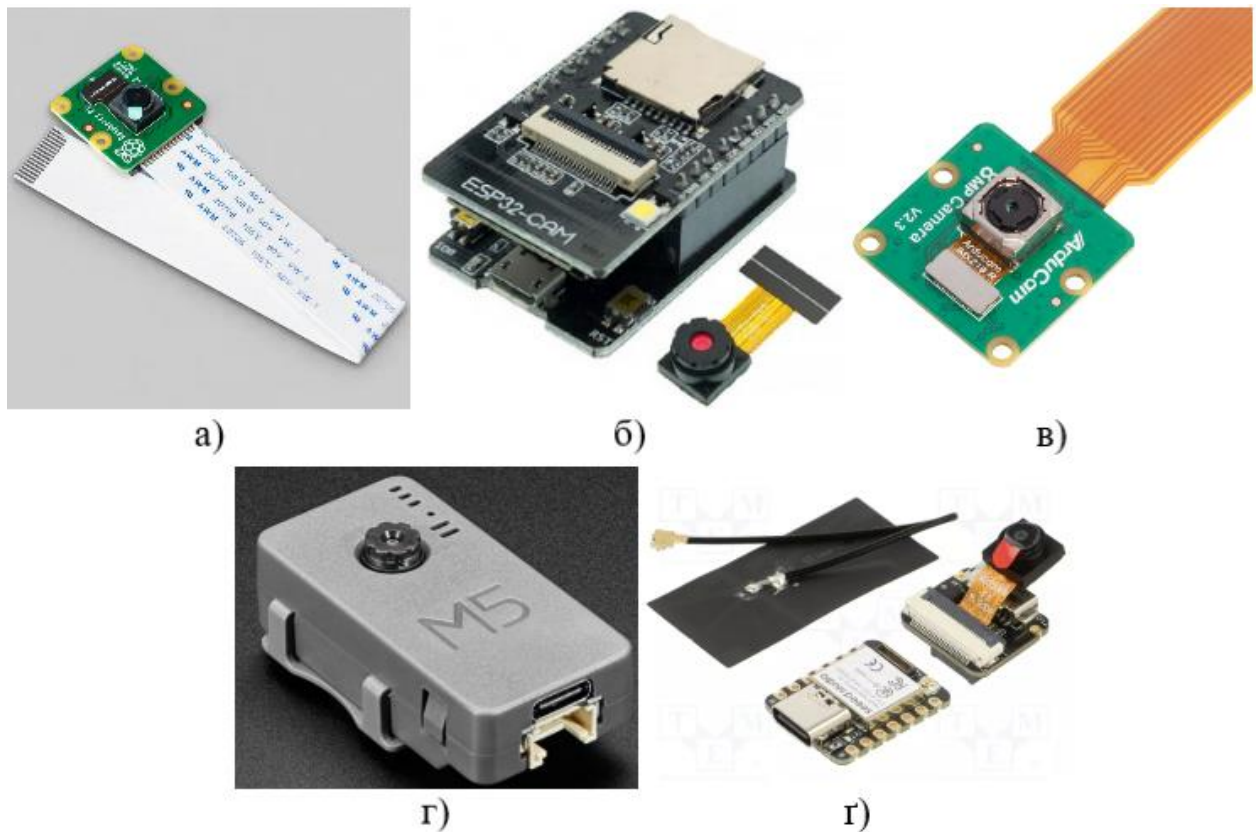
На рисунку 2.1, дійсним один з двох випадків: якщо камера має можливість самостійно передавати дані до системи обробки зображення, то дані з камери будуть передаватися відповідно до лінії з червоним пунктиром, інакше – через мікроконтролер відповідно до синього пунктиру.

## 2.2 Вибір апаратних модулів

Якщо спочатку вибрати контролер, то після вибору датчиків та виконавчих механізмів може статися так, що вибраний контролер матиме недоречні для даного проєкту характеристики. Тому в першу чергу необхідно вибрати датчики та виконавчі механізми.

Як було зазначено в пункті 2.1, відповідно до назви проєкту робот має бути мобільним та вміти розпізнавати образи, тож в першу чергу необхідно вибрати камеру для отримання зображення та виконавчі механізми для рухової підсистеми робота.

На рисунку 2.2 зображено камери, що можна використати для керування роботом, із зазначенням параметрів у таблиці Б.1.

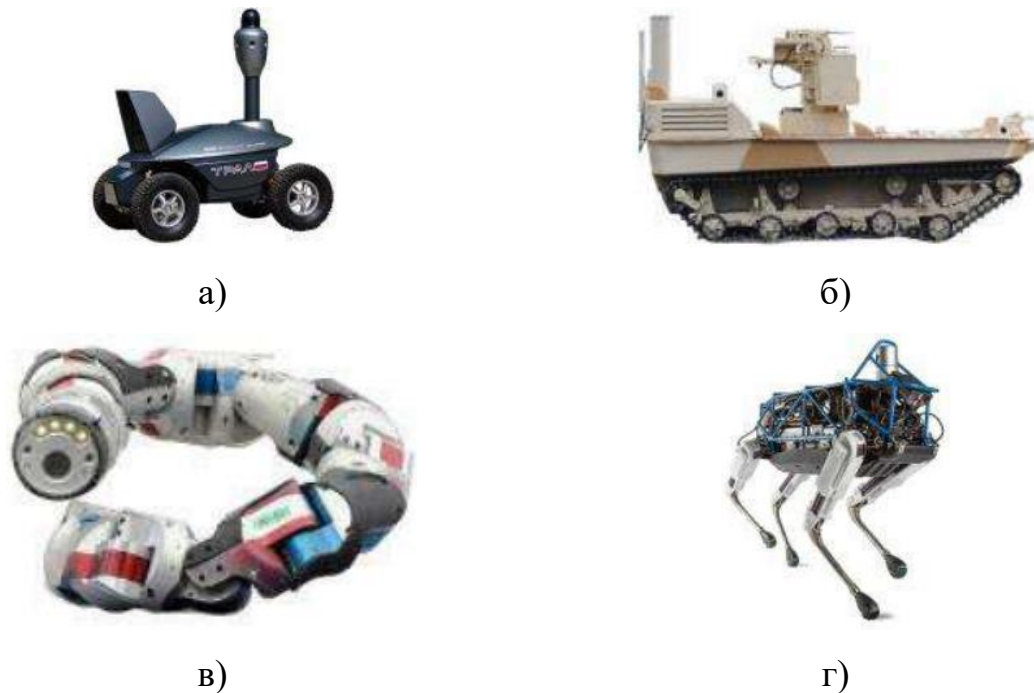


а) Raspberry Pi Camera Board [20]; б) модуль ESP32-CAM з камерою OV2640 2MP та програматором CH340 [21]; в) Arducam BO393 [22]; г) M5Stack ESP32 Timer Camera X [23]; е) XIAO ESP32S3 sense seed studio [24].

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд модулів камер

Для систем комп'ютерного зору зазвичай використовують рішення на основі ESP32 (рисунки 2.2,б, 2.2,г, та 2.2,е) або Raspberry Pi (рисунки 2.2,а та 2.2,в). З усіх зазначених модулів, ESP32-CAM є найбільш дешевим та має роздільну здатність і якість зображення, достатні для можливості розпізнати вибухонебезпечний предмет. Більш того, зазначений модуль підтримує передачу Wi-Fi та Bluetooth, що може бути використано для розвантаження потоку даних. Таким чином, як модуль камери було вибрано ESP32-CAM.

Далі, необхідно вибрати кінематику руху робота для подальшого вибору відповідних виконавчих механізмів. Відповідно до [17], мобільні роботи можуть бути колісними, гусеничними, повзаючими та крокуючими (рис. 2.3).



а) колісні; б) гусеничні; в) повзаючі; г) крокуючі.

Рисунок 2.3 – Види наземних роботів [17]

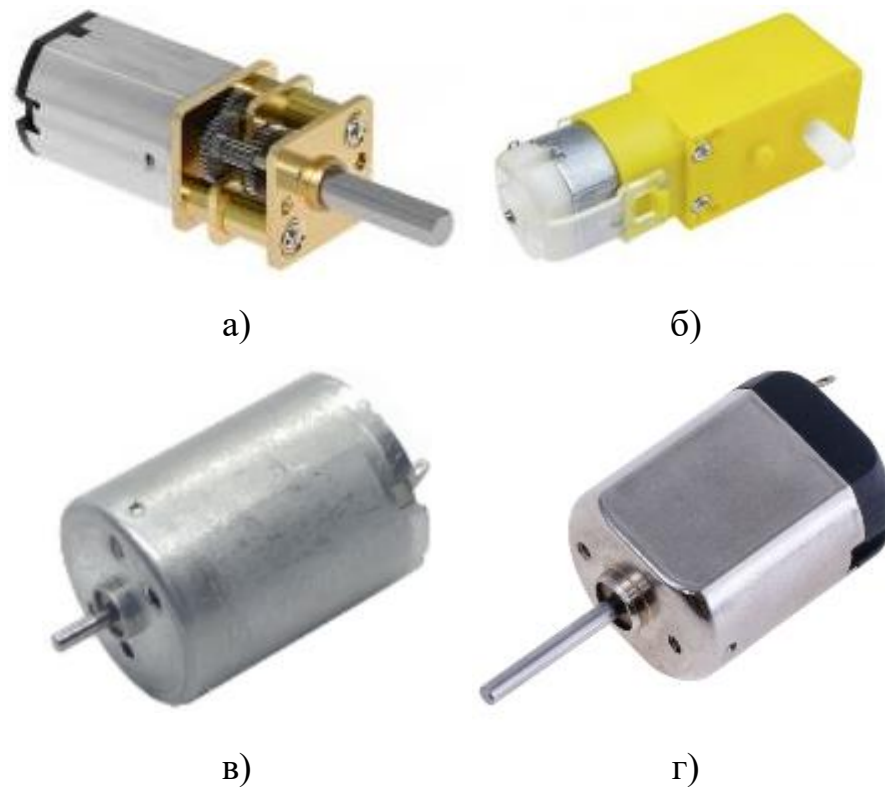
В даному проєкті рух робота відбуватиметься по пласкій поверхні, тож рух колесами буде з одного боку достатнім для виконання поставлених завдань, а з іншого – дешевим для реалізації.

Але рух колесами також може бути різним залежно від кількості коліс та їх видів. В даному випадку, робот має рухатися пласкою поверхнею з мінімальною ймовірністю впасти на бічну сторону, отже найкраще використати чотириколісну структуру зі шведськими колесами для збільшення рівня свободи руху робота.

Таким чином, для робота необхідно вибрати чотири двигуни для керування кожним шведським колесом. Напрямок руху робота керує

виключно оператор шляхом аналізу зображень з камери, тому до руху робота немає вимог з прецензійного руху, і двигуни не мають бути розраховані на такий тип руху. Крім того, для керування роботом більш зручно використати двигуни постійного струму, адже більшість контролерів подають на вихідні контакти напругу у вигляді дискретних значень, і отже використати двигун постійного струму буде набагато простіше.

Серед двигунів постійного струму було розглянуто ті, що зображено на рисунку 2.4. Параметри цих двигунів зазначено в таблиці Б.2.



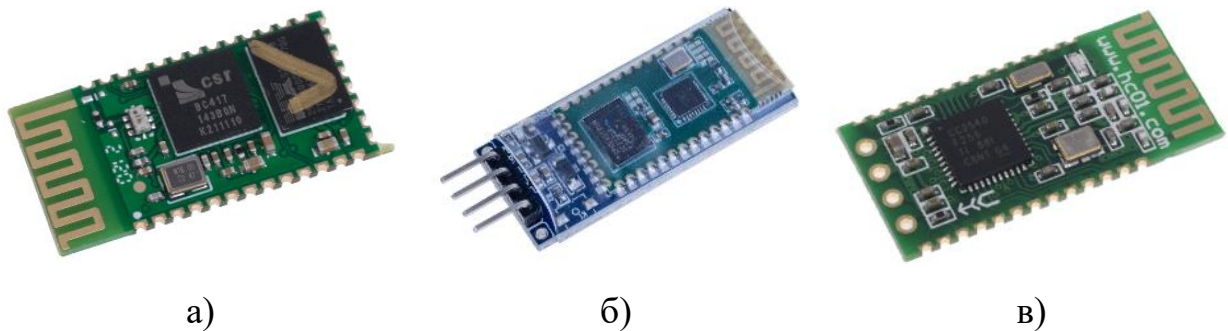
а) GA12-N20 [25]; б) DG01D [26]; в) DC мотор 6В 162 [27];  
г) RS133C-10300-45 [28].

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд двигунів постійного струму

Вимоги до характеристик двигунів залежать від необхідних швидкості руху робота та його маси, тож було вирішено виконати вибір в пункті 2.4. Щодо впливу на вибір контролер, то за умови використання драйвера двигунів

на платі контролера мають бути по два вихідні контакти на двигун, тобто 8 вихідних контактів.

Вибрана камера (ESP32-CAM) може передавати зображення через Wi-Fi, тож з метою пришвидшити передачу даних шляхом розподілу трафіку було вирішено використати Bluetooth для передачі команд оператора. Для цього, необхідно було вибрати датчик Bluetooth для робота (рис. 2.5). Характеристики датчиків зазначено в таблиці Б.3.



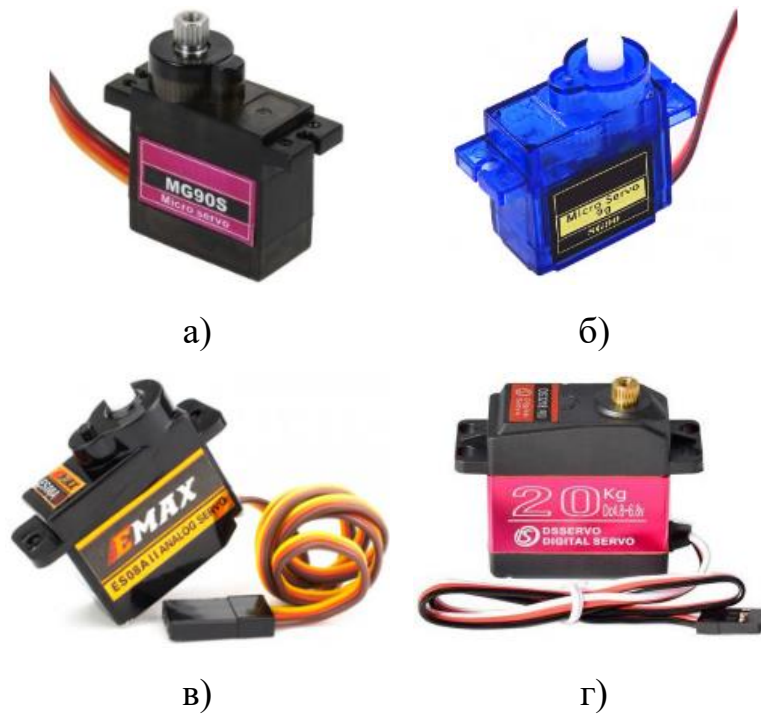
а) HC-05 [29]; б) HC-06 [30]; в) HC-08 [31].

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд Bluetooth датчики

Для оператора буде достатнім керувати макетом на відстані 10 метрів, тож серед зазначених модулів можливо вибрати як HC-05, так і HC-06. Серед обох краще вибрати HC-06 через більш меншу ціну в поєднанні з наявністю вбудованого адаптера.

Для створення додаткової можливості руху для камери, можна використати серводвигун (рис. 2.6). Його параметри зазначено в таблиці Б.4.

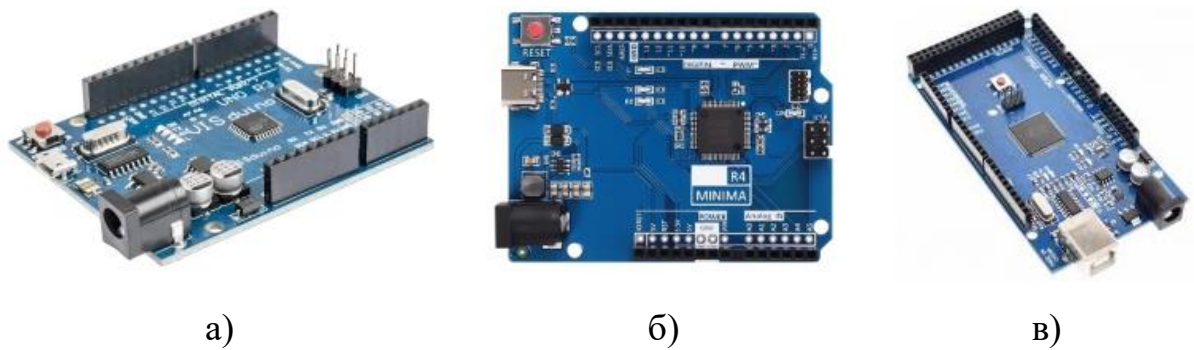
ESP32-CAM з масою максимум в декілька десятків грам планується встановити в декількох міліметрах від осі валу серводвигуна. Таким чином, крутний момент всіх двигунів значно перебільшує необхідний. В такому випадку, більш важливим є швидкість обертання валу, адже її високі значення зекономлять час оператора. Таким чином, було вибрано двигун з найбільшою швидкістю: MG90S V2.



а) MG90S V2 [32]; б) SG90 [33]; в) EMAX ES08A II [34]; г) DS3218MG [35].

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд серводвигунів

Наостанок, для керування роботом необхідно вибрати плату розробки, в якій буде як мінімум два вхідні цифрові контакти для Bluetooth-датчика, два вихідні контакти для запуску камери та вісім вихідних контактів для керування двигунами. Таким чином, було розглянуто плати (рис. 2.7) та зазначено їх характеристики в таблиці Б.5.

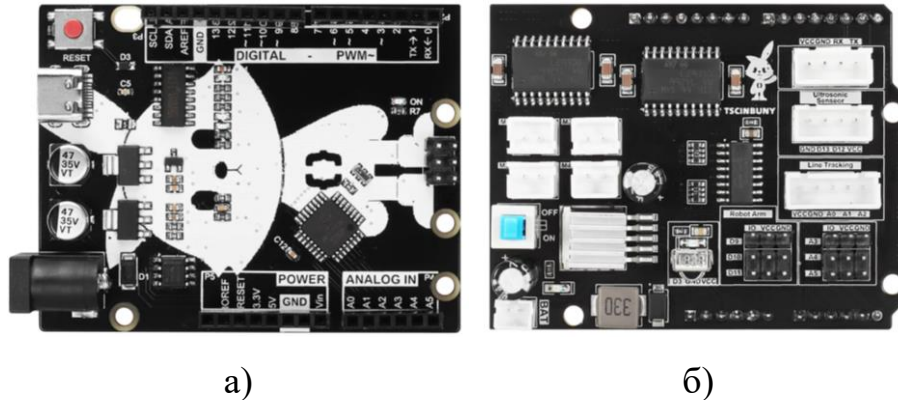


а) Arduino UNO R3 [36]; б) Arduino UNO R4 Minima [37]; в) Arduino Mega 2560 R3 (CH340) [38].

Рисунок 2.7 – Загальний вигляд плат розробки

Для створення робота достатньо плати з продуктивністю Arduino UNO R3, тож її було вибрано для керування роботом.

Під час дослідження видів плат розробки, було виявлено контролер від TSCINBUNY, що сумісний з shield-ом керування McNamHam wheel manipulator robot shield (рис. 2.8).



а) Tscinbuny Development Board for Arduino UNO R3 [39]; б) Tscinbuny Expansion Board for Arduino R3 [40].

Рисунок 2.8 – Загальний вигляд плат для керування роботом

Поєднання цих контролера та shield-а дозволяє підключати електродвигуни безпосередньо до shield-а за рахунок двох вбудованих драйверів двигунів L293D. При цьому, живлення контролера розподілене таким чином, що вхідну напругу контролера можна використати для живлення електродвигунів. Через це, для керування роботом було вибрано дані shield керування та контролер.

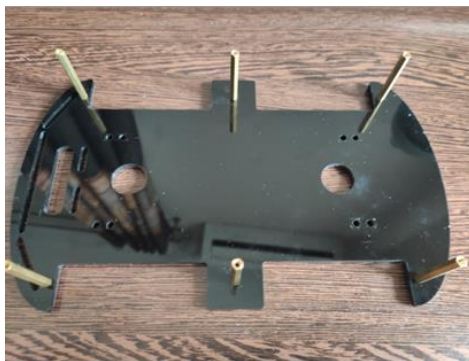
### 2.3 Складання робота

Для вибору двигунів руху коліс необхідно знати масу робота, адже без неї не можна вирахувати силу тяжіння, з якою робот діє на поверхню опори, і як наслідок, сили реакції опори та тертя.

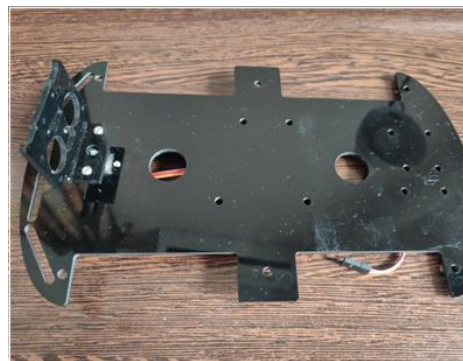
Тому, було вирішено частково зібрати робота та виміряти його масу. Для цього, було використано вибрані апаратні модулі та елементи каркасу з [41].

Спочатку, на нижню основу робота було встановлено латунні опори (рис. 2.9, а). В той же час, до верхньої основи було прикріплено каркас для встановлення камери (рис. 2.9, б). Даний каркас було подовжено (рис. 2.9, в) для встановлення камери (рис. 2.9, г). Після з'єднання верхньої та нижньої основи було встановлено латунні опори для мікроконтролера, а також корпус для акумуляторів (рис. 2.9, г). На латунні опори було встановлено плату розробки (рис. 2.9, д). Було встановлено shield керування на контролер та встановлено підключення до живлення та серводвигуна (рис. 2.9, е). Наостанок, камеру та датчик Bluetooth було підключено до shield-а керування (рис. 2.9, е).

Після складання, маса макету разом з акумуляторами становила 0.481 кг.



а)



б)

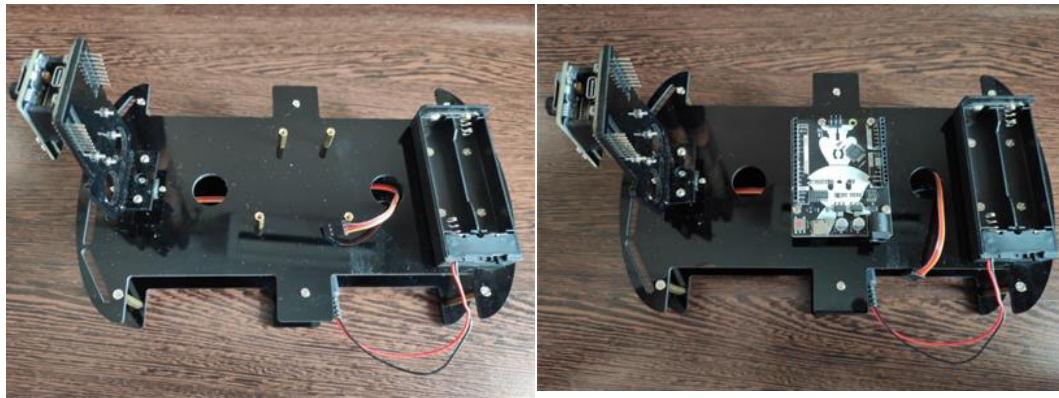


в)



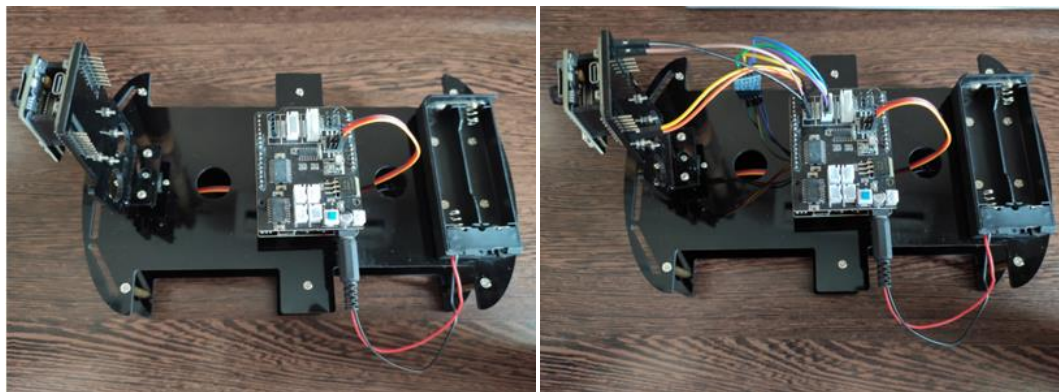
г)

Рисунок 2.9 – Складання робота



г)

д)



е)

е)

Рисунок 2.9, аркуш 2

#### 2.4 Розрахунок крутного моменту та лінійної швидкості двигунів коліс

Для вибору необхідного серводвигуна необхідно розрахувати крутний момент, за якого робот почне рухатися, та обертову частоту валу, за якої робот рухатиметься з необхідною швидкістю.

Спершу, було розраховано необхідний крутний момент коліс. Для цього, спершу було побудовано діаграму вільного тіла робота (рис. 2.10), із зображенням сил тяжіння, реакції опори, тертя та тяги. В даному випадку, сила реакції опори збігається з силою тяжіння.

Нехай робот необхідно зрушити з асфальтової поверхні для подальшого рівномірного прямолінійного руху, що перевищуватиме 0,0125 м/с. В такому випадку, коефіцієнт статичного тертя  $\mu$  становитиме 0,9.

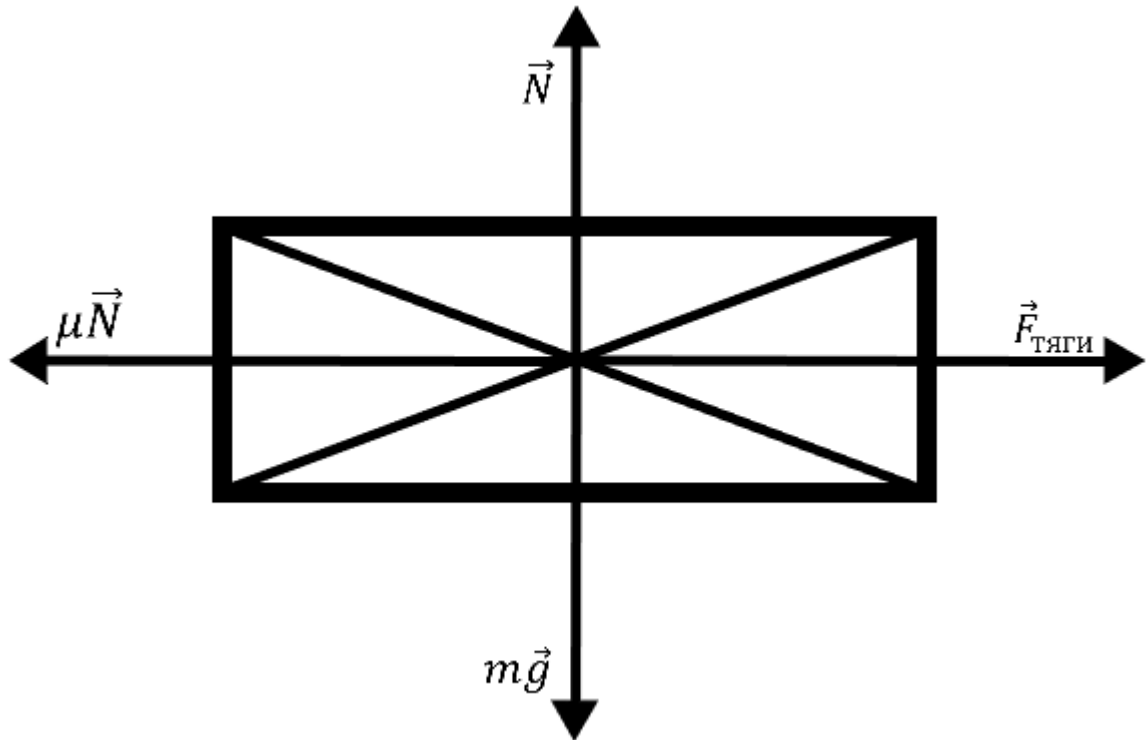


Рисунок 2.10 – Діаграма вільного тіла робота

Враховуючи те, що відстань від осі валу двигуна колеса до землі становить 2.5 см, а кількість маса двигуна розподілена по чотирьох двигунах, останні мають створювати крутний момент, що збігається з (2.1)

$$\mu t g < \frac{4 * a * M}{r}, \quad (2.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт статичного тертя;

$t$  – маса тіла;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$a$  – коефіцієнт підсилення редуктора;

$M$  – крутний момент, створений одним двигуном;

$r$  – радіус колеса.

Після підстановки значень було отримано, що двигун має створювати крутний момент в 2,65151 кг/см для двигуна без редуктора та 0,05524 кг/см за наявності редуктора зі коефіцієнтом передачі 1:48.

Що стосується швидкості руху, то швидкість лінійного руху одного колеса збігається зі швидкістю руху всієї системи. На основі обертальних частот двигунів можна знайти лінійну швидкість одного колеса, що збігатиметься з лінійною швидкістю всієї конструкції. Таким чином, було виконано розрахунок лінійної швидкості всієї конструкції відповідно до (2.2)

$$v = \omega * r = 2\pi * \nu * \frac{1}{a} * r * 10^{-2} > 0,0125, \quad (2.2)$$

де  $v$  – лінійна швидкість точки на вершині колеса (м/хв);

$\omega$  – кутова швидкість руху колеса;

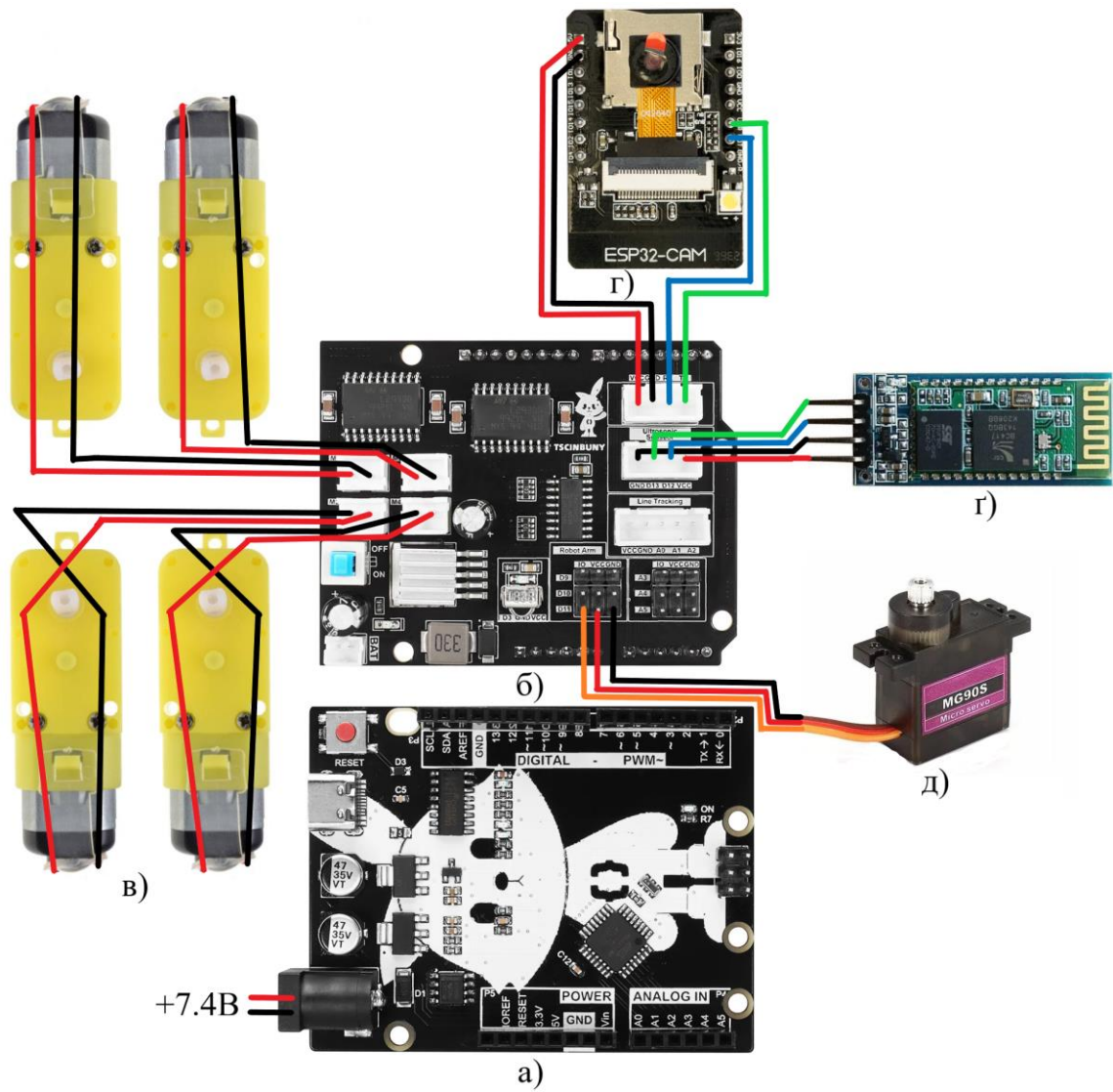
$\nu$  – обертова частота руху колеса;

$r$  – радіус кола.

Після перетворення рівняння (2.2) та підстановки значень було отримано, що обертова частота руху колеса має бути більшою за 0,07958 об/хв за відсутності редуктора та 3,81972 об/хв за наявності редуктора з коефіцієнтом передачі в 1:48.

Всі зазначені в таблиці Б.2 двигуни задовольняють вимогам крутного моменту та обертовій частоті, окрім RS133C-10300-45. Тож серед двигунів, що залишилися, було вибрано найбільш дешевий: DG01D.

Таким чином, було побудовано схему підключення модулів мобільного робота (рис. 2.11) та завершено його збирання (рис. 2.12).



а) плата розробки; б) shield керування; в) двигуни для руху коліс;  
 г) ESP32-CAM; г) датчик Bluetooth HC-06; д) серводвигун для руху камери  
 MG90S

Рисунок 2.11 – Схема підключення модулів мобільного робота

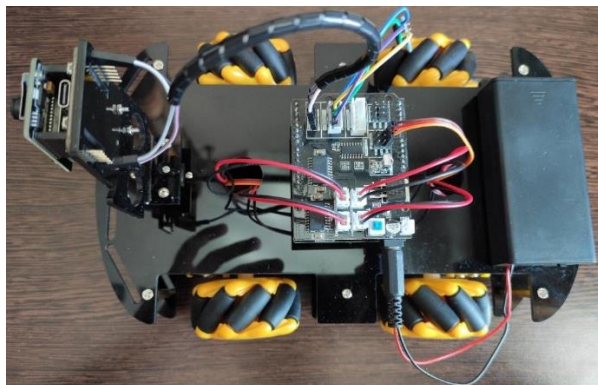


Рисунок 2.12 – Зібраний мобільний робот

## 2.5 Аналіз стійкості та виду затухання серводвигуна MG90S

Загальна схема керування серводвигуном збігається з рисунком 2.13 [42].

Для аналізу серводвигуна MG90 за стійкістю, необхідно знайти передатні функції всіх елементів керування системою.

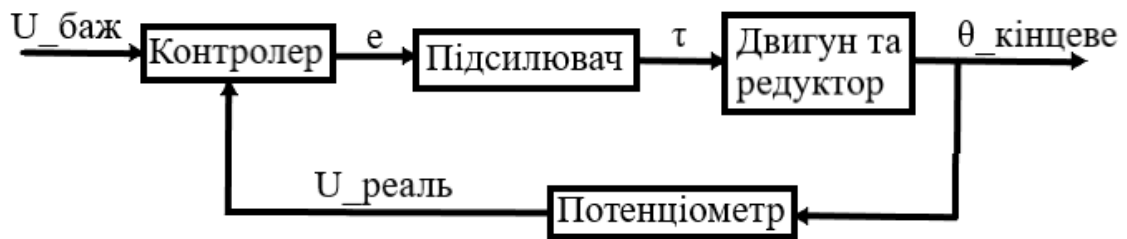


Рисунок 2.13 – Загальна схема керування позиціонуванням серводвигуна

Як правило, контролер та підсилювач будують як пропорційно-інтегральну ланку згідно з (2.3)

$$W(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (2.3)$$

де  $K_C$  – коефіцієнт підсилення пропорційної ланки,

$T_i$  – інтегральна складова часу.

Відповідно до технічної документації двигуна [43],  $K_C = 2$ ,  $T_i = 0.08$ .

У той же час, передатна функція двигуна з редуктором збігається з (2.4)

$$W(s) = \frac{K_m}{T_s s + 1}, \quad (2.4)$$

де  $K_m$  – статичне підсилення двигуна,

$T$  – постійна часу (як правило, час повороту двигуна на  $63^\circ$ ).

Якщо двигун повертає на  $60^\circ$  в середньому за  $0.09$  с, то можна вважати  $\tau$  рівним приблизно  $0.09$ . Що ж стосується статичного підсилення двигуна, то за перетворення  $5$  В напруги в поворот на  $180^\circ$ , його статичне підсилення дорівнюватиме  $36$  [град/В].

Що стосується потенціометра, то його передатна функція збігається з (2.5)

$$W(s) = K_p, \quad (2.5)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт перетворення потенціометра.

Якщо потенціометр перетворює рух серводвигуна в  $180^\circ$  на напругу в  $5$ В, то коефіцієнт перетворення становитиме  $0.0278$  [В/град].

Таким чином, було побудовано систему керування серводвигуном за допомогою пакету прикладних програм MATLAB (рис. 2.14).

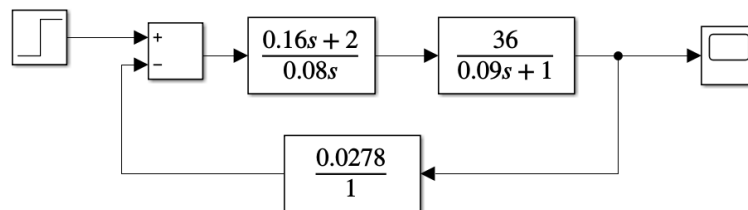


Рисунок 2.14 – Система керування MG90S

Для знаходження виду затухання, необхідно перетворити блок-схему рисунка 2.9 до єдиної передатної функції. Після перетворень та спрощень, було отримано передатну функцію, що збігається з (2.6)

$$W(s) = \frac{799,92s + 10000}{s^2 + 33.33s + 277.8} \quad (2.6)$$

Для визначення виду затухання, необхідно визначити коефіцієнт затухання системи та її резонансну частоту. Для цього, необхідно привести знаменник передатної функції до виду (2.7)

$$s^2 + 2\varepsilon s + \omega_0^2, \quad (2.7)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт затухання (демпфування) системи;

$\omega_0$  – резонансна частота.

В системі (2.6),  $\varepsilon = \omega_0 = 16,66$ , тому система є критично демпфованою, що можна підтвердити формою її реакції на ступінчастий вплив (рис. 2.15).

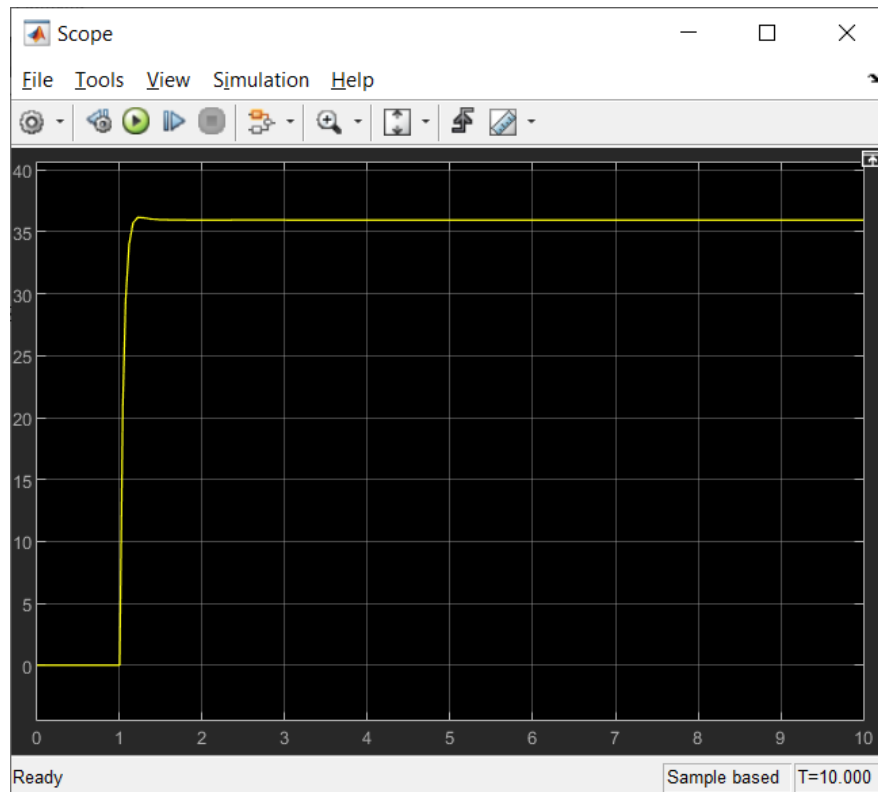


Рисунок 2.15 – Перехідна характеристика системи

Що стосується стабільності, то система є другого порядку, де всі коефіцієнти знаменника перехідної характеристики є додатними. Отже, відповідно до критерія Гурвіца, система є стабільною.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 3.1 Побудова алгоритму роботи робота

В даній розробці використовуються декілька пристроїв, кожен з яких виконує свій процес: камера, контролер, мобільний застосунок та система обробки зображень. Кожен з цих елементів виконує процес незалежно від іншого, що треба враховувати під час створення алгоритму [44].

Спершу, було розроблено алгоритм роботи камери та контролера (рис. 3.1). Обидва модулі мають починати роботу з отримання живлення від джерела, а закінчувати – від відсутності. Тому, після ввімкнення живлення вмикається контролер, а після нього – камера. Далі камера постійно робить знімки та надсилає до веб-сторінки, в той час як контролер виконує керування рухом.

В роботах [45–47] мобільними роботами керують на основі наростаючого та спадного фронтів, створеними за допомогою відповідно притиснення та відпускання кнопки руху відповідно, але незважаючи на легкість впровадження такого методу, такі системи нестійкі до шумових завад. Так, на рисунку 3.2 зеленим кольором відокремлено два алгоритми руху, синім позначено викликані оператором події, чорним – команди керування, надіслані роботом на серводвигуни, червоним – команди керування, отримані роботом від панелі керування (M – рухатися, S – зупинитися, Noth – нічого). В кожному блоці, верхня циклограма зображує алгоритм руху робота за нормальних умов, нижня – за наявності шумових завад.

За спрацювання двигунів на наростаючому та спадних фронтах (рис. 3.2, а), робот розпочинає рух за притиснення кнопки руху та зупиняється за відпускання. За наявності шумів, команда відпускання кнопки може не надійти до контролера. В такому випадку, робот продовжить рух.

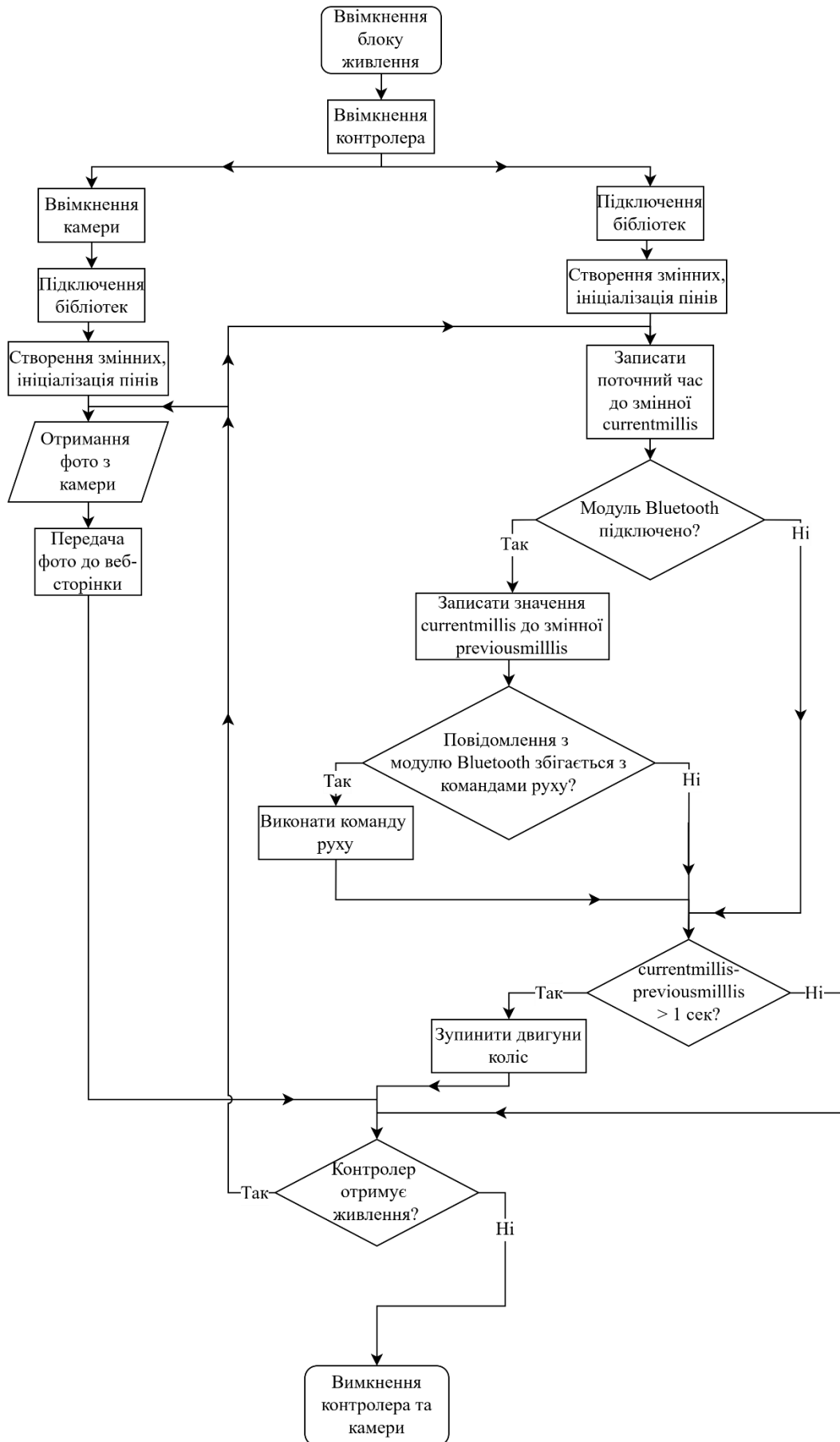
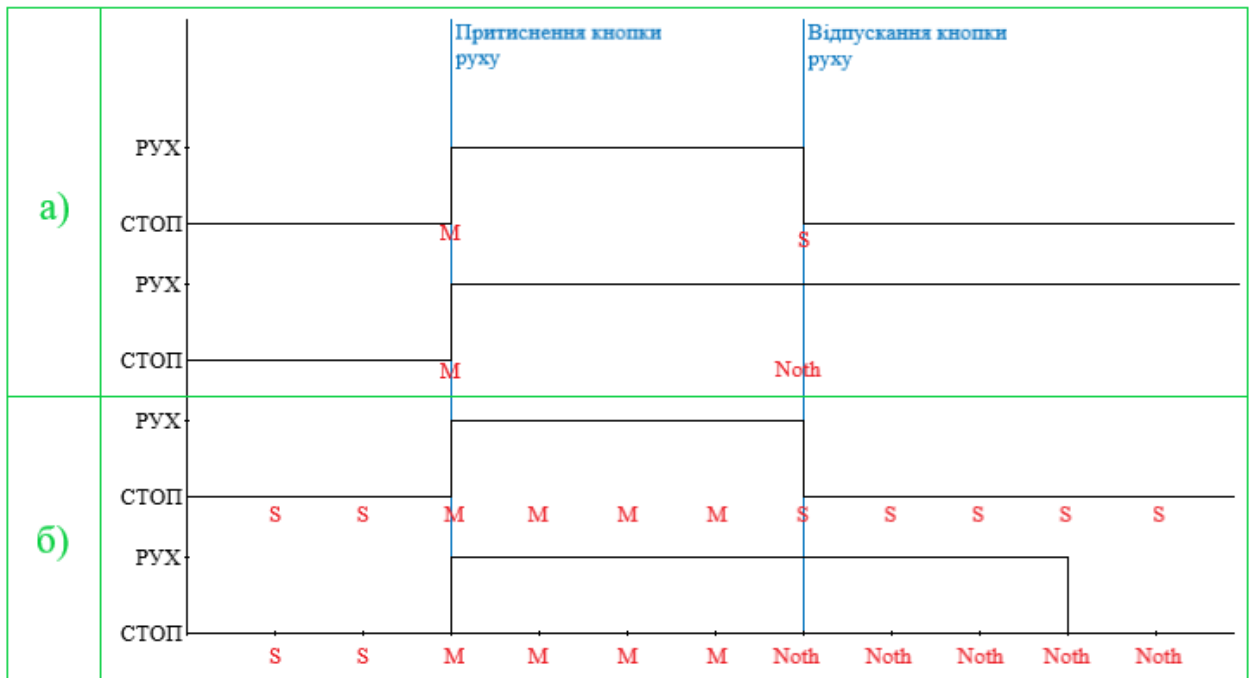


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи мобільного робота



а) рух на основі наростаючих і спадних фронтів; б) рух на основі періодичного отримання команд

Рисунок 3.2 – Циклограми руху робота

Більш того, не можна запобігти даному руху, адже таким же чином оператор може довго притискати кнопку. Натомість, якщо на контролер постійно надсилати певну команду (рис. 3.2,б), то відключення від мережі можна розпізнати. В даному випадку, через деякий інтервал часу на контролер завжди надходять інструкції від панелі керування, за натискання кнопки змінюється тільки вид інструкції. Якщо ж трапляється так, що контролер не отримує інструкцій протягом певного часу, то робот має аварійно зупинитися: це може врятувати його від вибухівки або вічного руху заміною поверхнею.

Такий вид руху було реалізовано в алгоритмі рисунка 3.1 шляхом запису та перезапису змінних `currentmillis` та `previousmillis`.

Відповідним чином було розроблено алгоритм роботи панелі керування (рис. 3.3): раз на 100 мс вона має надсилати команду керування, яка може бути зміненою за притиснення та відпускання кнопок команд руху.

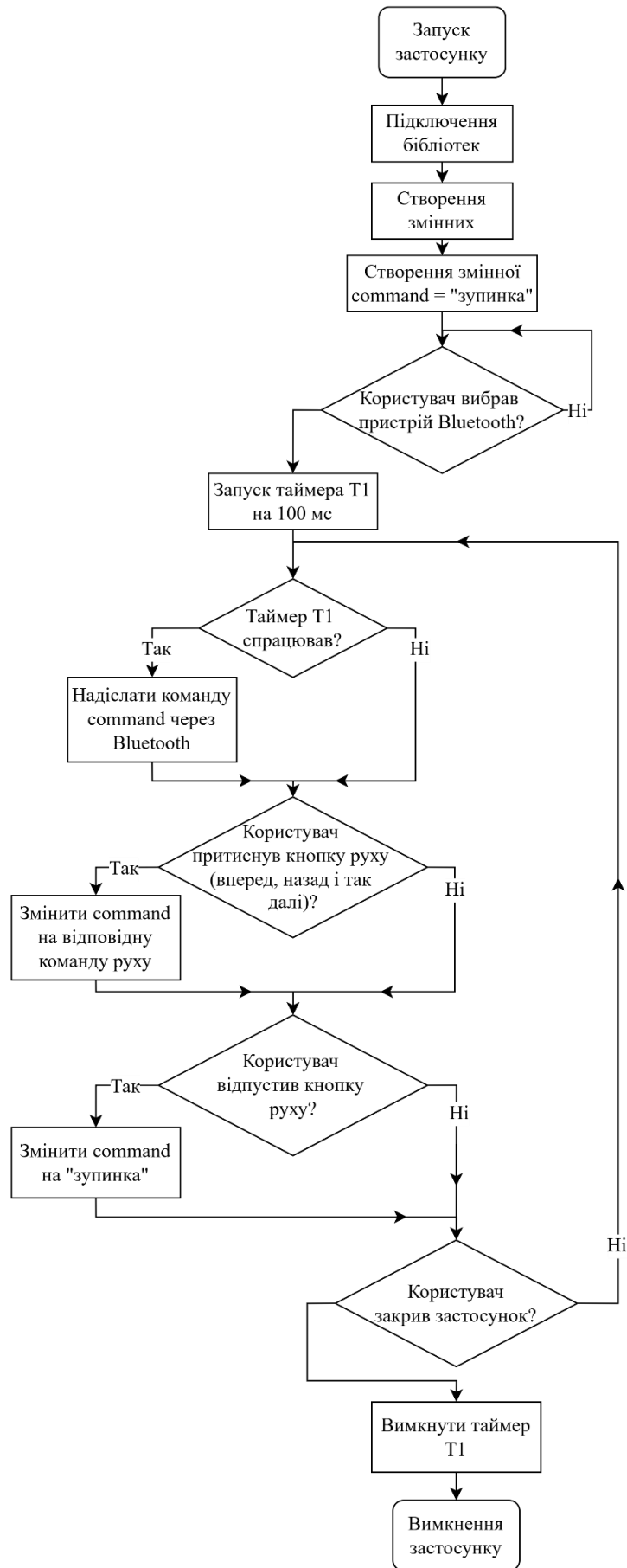


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи панелі керування

Наостанок, було розроблено алгоритм роботи системи розпізнавання зображення (рис. 3.4).

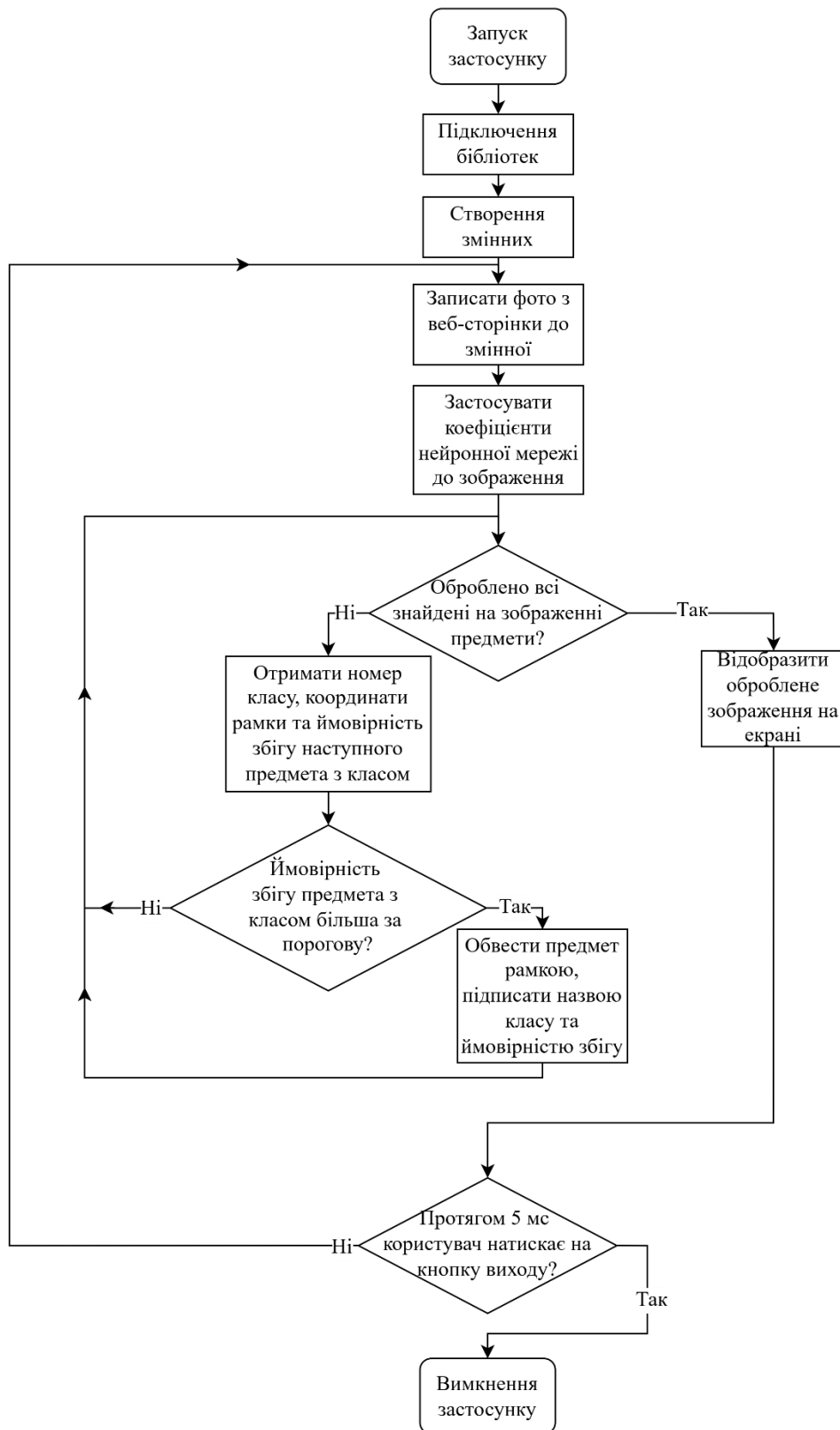


Рисунок 3.4 – Алгоритм роботи системи розпізнавання образів

За наявності зображень на веб-сторінці, програма має зчитувати зображення та обробити його за допомогою коефіцієнтів нейронної мережі. Після обробки, отримані результати необхідно відобразити на зображенні, і наостанок, вивести на екран.

### 3.2 Вибір моделі нейронної мережі для розпізнавання об'єктів

Вибір нейронної мережі зазвичай залежить від особливостей проєкту. В даній роботі необхідно знайти вибухонебезпечний предмет на зображенні з отриманого камерою відео, тож необхідно використати алгоритм розпізнавання об'єкта. Більш того, відео з камери надсилається в режимі реального часу, тож система розпізнавання має бути відповідною.

Для оцінювання точності розпізнавання зазвичай використовують характеристику mean Average Precision (mAp) [48] для набору даних Common Objects in Context [49]: її великі значення свідчать про високу точність.

Знання структури моделі може бути корисним для дослідження моделей мережі або створення власної; наявність пакету даних дозволяє розробникам швидко тренувати та розгортати модель на різних фізичних пристроях; умови ліцензій можуть обмежувати використання моделей в комерційних застосунках, а моделі великого розміру не можна використати у фізичних пристроях з обмеженою пам'яттю.

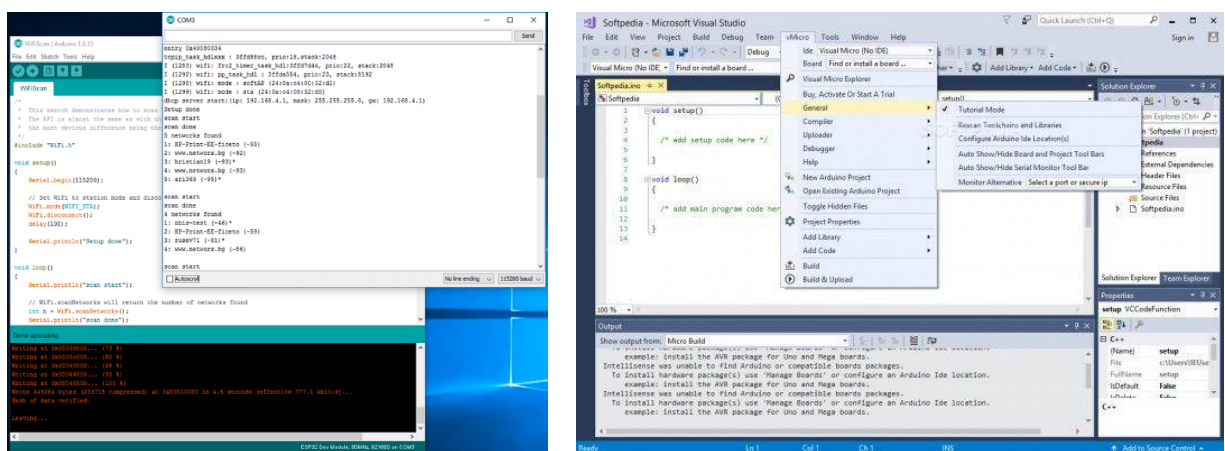
Таким чином, на основі джерел [50–53] було знайдені характеристики найбільш поширених моделей та систематизовано їх в таблиці В.1.

Так як зображення з відео оброблюються на персональному комп'ютері, система комп'ютерного зору має бути реального часу, мати найбільшу точність та бажано бути зручним в розгортанні. Таким чином, для тренування було вибрано модель YOLOv8.

### 3.3 Вибір засобів розробки

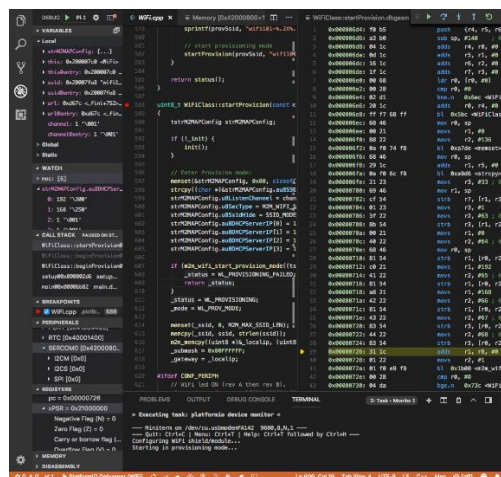
Для керування макетом необхідно запрограмувати два контролери, один мобільний додаток, програму для тренування нейронної мережі та програму для розпізнавання образів. Через специфіку кожного з модулів, необхідно використати різні засоби розробки.

Спершу, було розглянуто засоби розробки для програмування мікроконтролерів (рис. 3.5).



а)

б)



в)

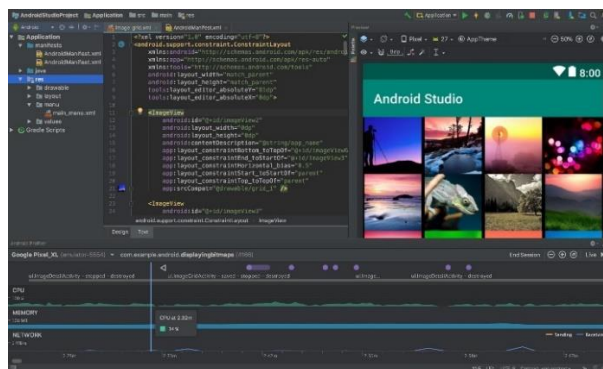
а) Arduino IDE [54, 55]; б) VisualMicro [56, 57]; в) PlatformIO [58].

Рисунок 3.5 – Засоби розробки для програмування мікроконтролерів

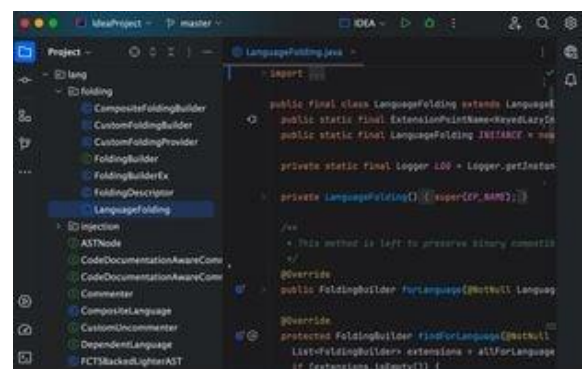
Найбільш поширеним є Arduino IDE через простий інтерфейс порівняно з конкурентами. Втім, дане середовище розробки не має деяких функцій відлагодження, тестування, керування розробкою [59], засобів перегляду пам'яті та інше. Через це, використовують надбудови VisualMicro для Microsoft Visual Studio та PlatformIO для Microsoft Visual Studio Code. Перший має найбільше функцій розробника, але підтримує обмежений набір контролерів та є платним. Натомість, відповідно до [58] PlatformIO підтримує широкий набір плат розробки та є безкоштовним.

Для розробки робота достатньо функціональних можливостей Arduino IDE, тож було вибрано його.

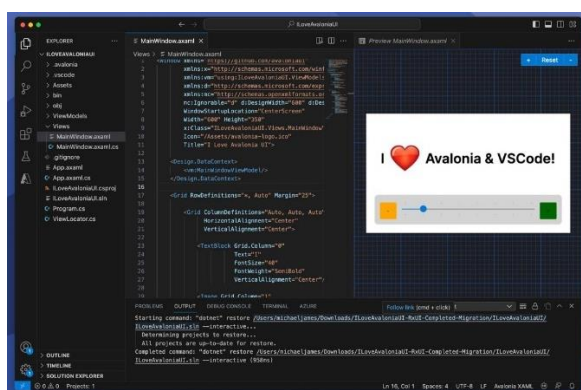
Далі, необхідно вибрати середовище розробки мобільного додатку (рис. 3.6).



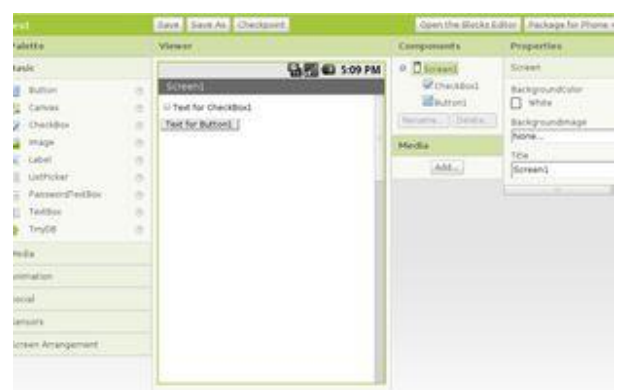
а)



б)



в)



г)

а) Android Studio [60]; б) Flutter [60]; в) Avalonia UI [61]; г) MIT App Inventor [60].

Рисунок 3.6 – Засоби розробки мобільних додатків

Як правило, для розробки застосунків для Android використовують відповідне програмне забезпечення на кшталт Android Studio або Flutter, втім для розробки додатків на даних платформах необхідно знати мови програмування Java, Kotlin або Dart, часу на вивчення яких недостатньо для своєчасного виконання даної роботи.

З іншого боку, можна використати засіб розроблення Avalonia UI, що підтримує мову програмування C#. Написані в даному середовищі розробки застосунки є швидкими, втім час їх розробки є тривалим через складнощі з побудовою переходами між формами. Тому, для початкової версії робота краще вибрати MIT App Inventor: інтуїтивно зрозуміле середовище для швидкої розробки.

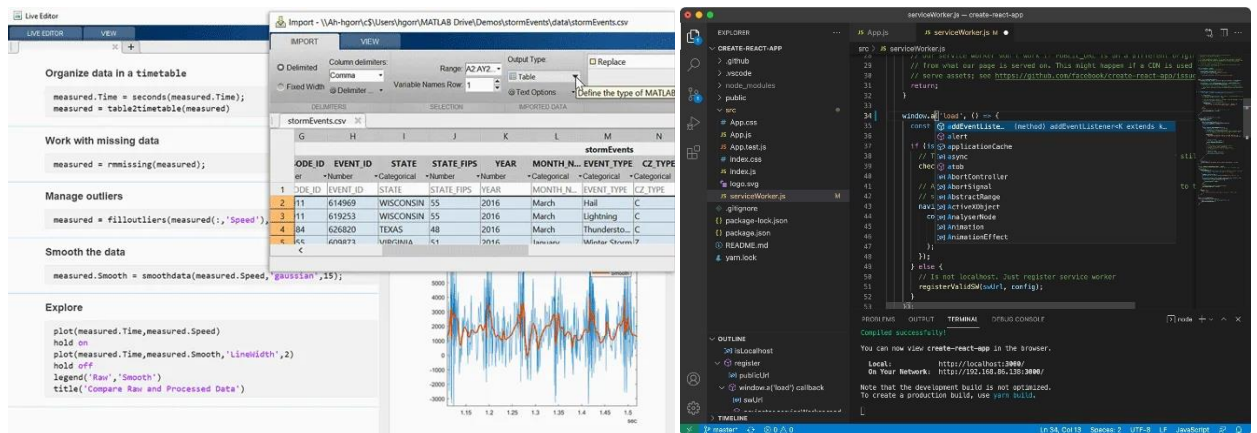
Далі, необхідно вибрати середовище тренування нейронної мережі. В документації YOLOv8 [62] було використано Google Colab: середовище на основі Jupiter Notebook, що дозволяє використовувати технологію хмарних обчислень для тренування мереж. Так як на персональному комп'ютера розробника немає потужних відеокарт, було вирішено скористатися безкоштовним планом Google Colab.

Наостанок, необхідно вибрати середовище розробки для обробки зображення (рис. 3.7).

MATLAB – пакет прикладних програм широкого призначення, в тому числі обробки зображень: в одному з пакетів є інструменти для сегментації зображень, виконання морфологічних операцій на двійковими масками, аналізу областей двійкових масок, інструменти для глибокого машинного навчання та інше. Втім навіть якщо можливо знайти спосіб підключити бібліотеку Ultralytics для обробки зображення моделлю YOLOv8, дане середовище розробки є повільним, що не є найкращим для пристроїв реального часу.

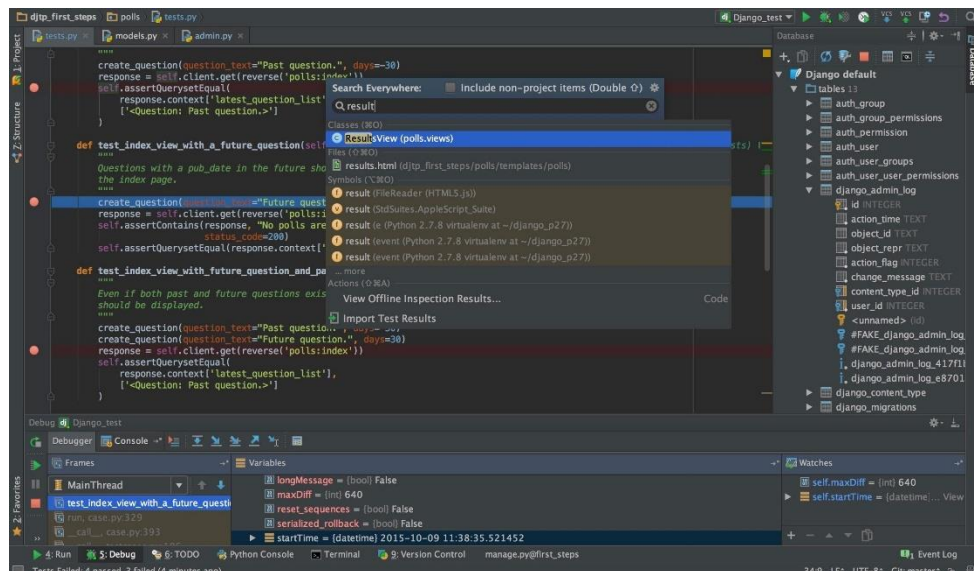
Таким чином, краще вибрати Visual Studio Code або PyCharm: два середовища розробки, що підтримують мову програмування Python разом з бібліотекою OpenCV, що уможливорює обробку зображень. Серед двох

середовищ краще вибрати PyCharm, бо дане середовище розроблене для Python-а, і отже є оптимізованим для нього.



а)

б)



в)

а) MATLAB [63]; б) Visual Studio Code [64]; в) PyCharm [65].

Рисунок 3.7 – Засоби розробки програм для обробки зображень

Таким чином, для розробки програмної частини макету буде використано Arduino IDE для програмування контролерів, MIT App Inventor для розробки мобільного додатку, Google Collab для тренування нейронної мережі та PyCharm для обробки зображення.

### 3.4 Розробка системи керування рухом мобільного робота

Для системи керування необхідно створити мобільний додаток для надсилання команд керування до контролера робота. Результат проектування зображено на рисунку Г.1.

До макету інтерфейсу користувача було додано декілька блоків (рис. Г.1, а). Найвищий складається з надпису “Available devices” (доступні пристрої) та кнопки “Show device” (відобразити пристрої для підключення) та необхідний для вибору Bluetooth-пристрою, до якого підключено додаток. Нижче розташовано інформаційний блок для відображення стану підключення (“Connection status”), надісланої команди (“Sending command”) та заряду батареї (“Battery charge”). Хоч значення заряду наразі не визначається роботом, в майбутніх версіях робота планується додати відповідну систему. В найнижчому блоці розташовано кнопки керування рухом робота: темно-сірі для руху платформи та темно-зелені для керування серводвигуном камери.

В кодї програми (рис. Г.1, б), змінна `command` зберігає команду керування мобільним роботом. До вибору пристрою підключення, кнопка “Show device” має відобразити перелік можливих підключень. Після вибору пристрою, додаток підключається до нього, а в разі отримання помилки, додаток відключається від модулю.

Кожні 100 мс, спрацьовує таймер `Clock1`, що призводить до оновлення стану надісланої команди в інформаційному блоці інтерфейсу користувача, а також до одної з двох подій: якщо підключення встановлено, то додаток надсилає команду на пристрій, а індикатор стану підключення горить синім, інакше індикатор горить червоним, а індикатор заряду батареї змінюється на “--”.

Далі, було розроблено код прошивки контролера (рис. Д.1). В ньому, для керування двигунами було використано 8-бітні змінні, де значення в кожному біті збігається з рухом певного колеса вперед або назад. Після виклику функції `Motor`, дані змінні записуються до регістра зсуву та виводяться на драйвери

двигунів L293D. Щодо інших особливостей коду, то їх було зазначено в коментарях рисунка Д.1.

### 3.5 Розробка системи обробки зображення

Для обробки зображення з нейронної мережі, необхідно спершу надіслати зображення на веб-сторінку. Для цього було використано код з [66], що збігається з рисунком Е.1. Пояснення до коду зазначені на тому ж рисунку.

Далі, необхідно було натренувати нейронну мережу моделі YOLOv8. Для цього, було використано джерело [67]: спочатку, на платформі Roboflow Universe було знайдено набір даних для тренування, що складається з 11 класів: авіаційна ракета (402 зображення), артилерійський снаряд (251 зображень), БПЛА (335 зображень), граната (264 зображень), протипіхотна міна (553 зображень), протитанкова міна (543 зображень), лепесток (141 зображень), мінометний снаряд (241 зображень), уламки металевих об'єктів (113 зображень), снаряд реактивної системи залпового вогню (РСЗВ, 203 зображень) та вибухівка-розтяжка (127 зображень).

Набір даних було завантажено разом з файлом .yaml файлом опису моделі та завантажено до хмарного сховища Google Drive [68]. В результаті, на диску сховища було організовано файли відповідно до рисунка 3.8.

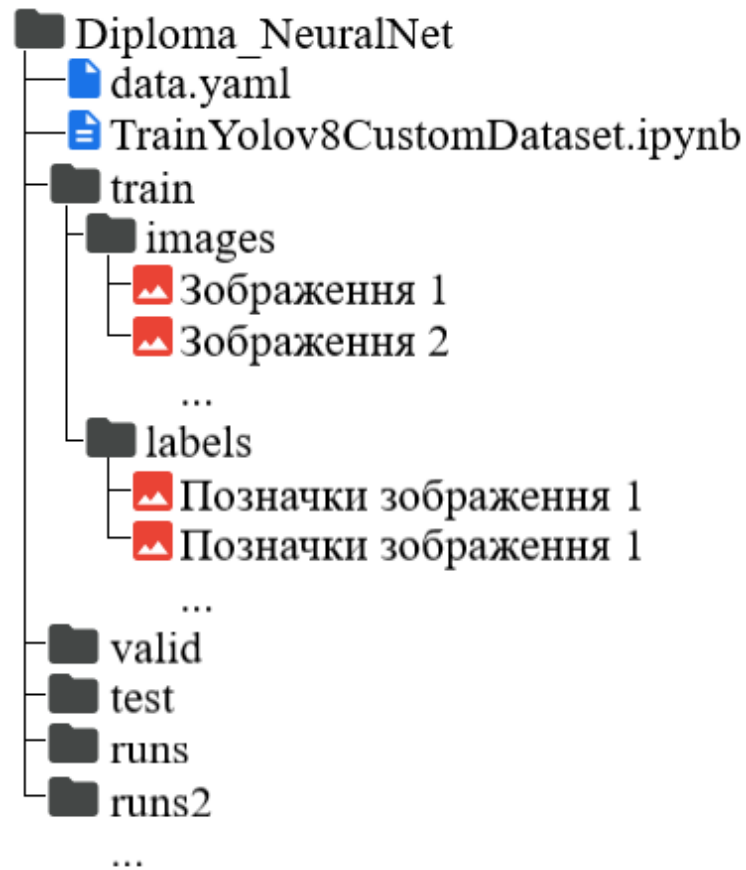


Рисунок 3.8 – Структура файлів на Google Drive для тренування нейронної мережі

Файл `data.yaml` необхідний для опису даних для тренування, а саме шляху до них у файловій системі, кількості класів та їх назви, а також метадані на кшталт ліцензії (рис. 3.9).

Файл `TrainYolov8CustomDataset` зберігає код для тренування моделі, про який буде зазначено пізніше.

Папки `train`, `valid` та `test` зберігають дані для тренування, перехресної перевірки та тестування моделі відповідно. Кожна із зазначених папок побудовані схожим чином: вони зберігають паки `images` із зображеннями та `labels` для даних зображень. Як приклад, для зображення `зображення1.jpg` у папці `images` дані для тренування зберігатимуться у файлі `зображення1.txt` у папці `labels`.

```

1  train: /content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet/train/images
2  val: /content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet/valid/images
3  test: /content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet/test/images
4
5  nc: 11
6  names: ['air missile', 'artillery shell', 'bpla', 'granade', 'landmine soldier',
7         'landmine tank', 'lepestok', 'mortar launcher', 'pieces', 'rszv', 'trip wire']
8
9  roboflow:
10     workspace: trashsorting-gg1jy
11     project: demining-rpd9q
12     version: 5
13     license: CC BY 4.0
14     url: https://universe.roboflow.com/trashsorting-gg1jy/demining-rpd9q/dataset/5

```

Рисунок 3.9 – Вміст файлу data.yaml

Файли labels зберігають п'ять чисел: номер класу зображення та координати рамки, що охоплює об'єкт.

Папки runs призначені для збереження результатів тренування.

Після організації файлів відповідно до рисунка 3.8, було створено код у файлі TrainYolov8CustomDataset, що збігається з рисунком 3.10 [69]. Пояснення до роботи коду зазначено в коментарях цього ж рисунка.

```

from google.colab import drive
drive.mount('/content/gdrive') # Підключення файлової системи Google Drive для тренування мережі

ROOT_DIR = '/content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet' # Вказання папки з даними для тренування

!pip install ultralytics

import os
from ultralytics import YOLO

# model = YOLO(model = yolo8n.yaml) # Вказати вид моделі для тренування
# results = model.train(data = os.path.join(ROOT_DIR, "data.yaml"), epochs = 100) # Розпочати тренування зі 100 епох

model = YOLO("/content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet/runs2/runs/detect/train/weights/best.pt") # Вказати вид моделі для тренування
model.resume = True # Продовжити тренування моделі

results = model.train(epochs=120) # Продовжити тренувати модель протягом 120-и епох

import locale
locale.getpreferredencoding = lambda: "UTF-8" # Встановити кодування символів виду UTF-8
!scp -r /content/runs /content/gdrive/My Drive/Diploma_NeuralNet/runs3 # Вивантажити результати тренування до runs3

```

Рисунок 3.10 – Код для тренування нейронної мережі

Далі було виконано тренування моделі до моменту, коли зазначені у вихідних даних параметри не досягли бажаних значень.

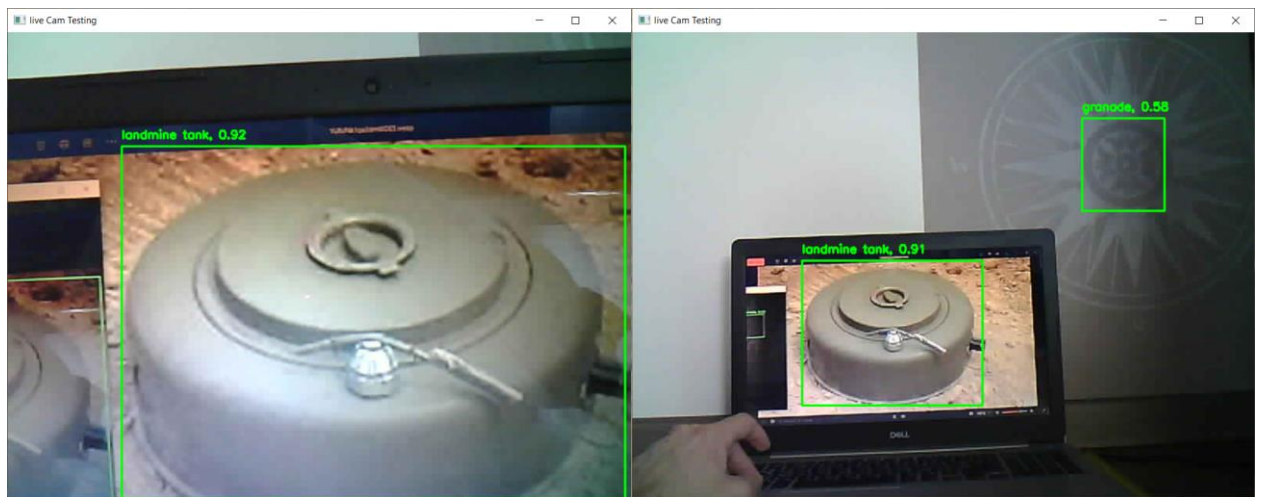
Після тренування, було отримано файл з коефіцієнтами “last.pt”, що дозволяє використати натреновану модель для виявлення предметів на

довільних зображеннях. Для цього було створено код рисунка Ж.1 із зазначенням пояснень в коментарях коду.

### 3.6 Тестування роботи системи комп'ютерного зору

Після створення програмної частини мобільного робота, необхідно було виконати тестування його руху та системи розпізнавання. В реальних умовах, роботу здебільше можуть заважати такі природні умови, як далека відстань до об'єкту та низька освітленість приміщення, тож проведені тести мають бути відповідними.

Відповідно до рисунка 3.11, система комп'ютерного зору може розпізнавати протитанкові міни на відстані до 160-и сантиметрів. Також система помилково розпізнає деякі предмети як вибухонебезпечні, втім це не є суттєвим недоліком порівняно з помилковим розпізнаванням вибухівки як безпечний предмет.

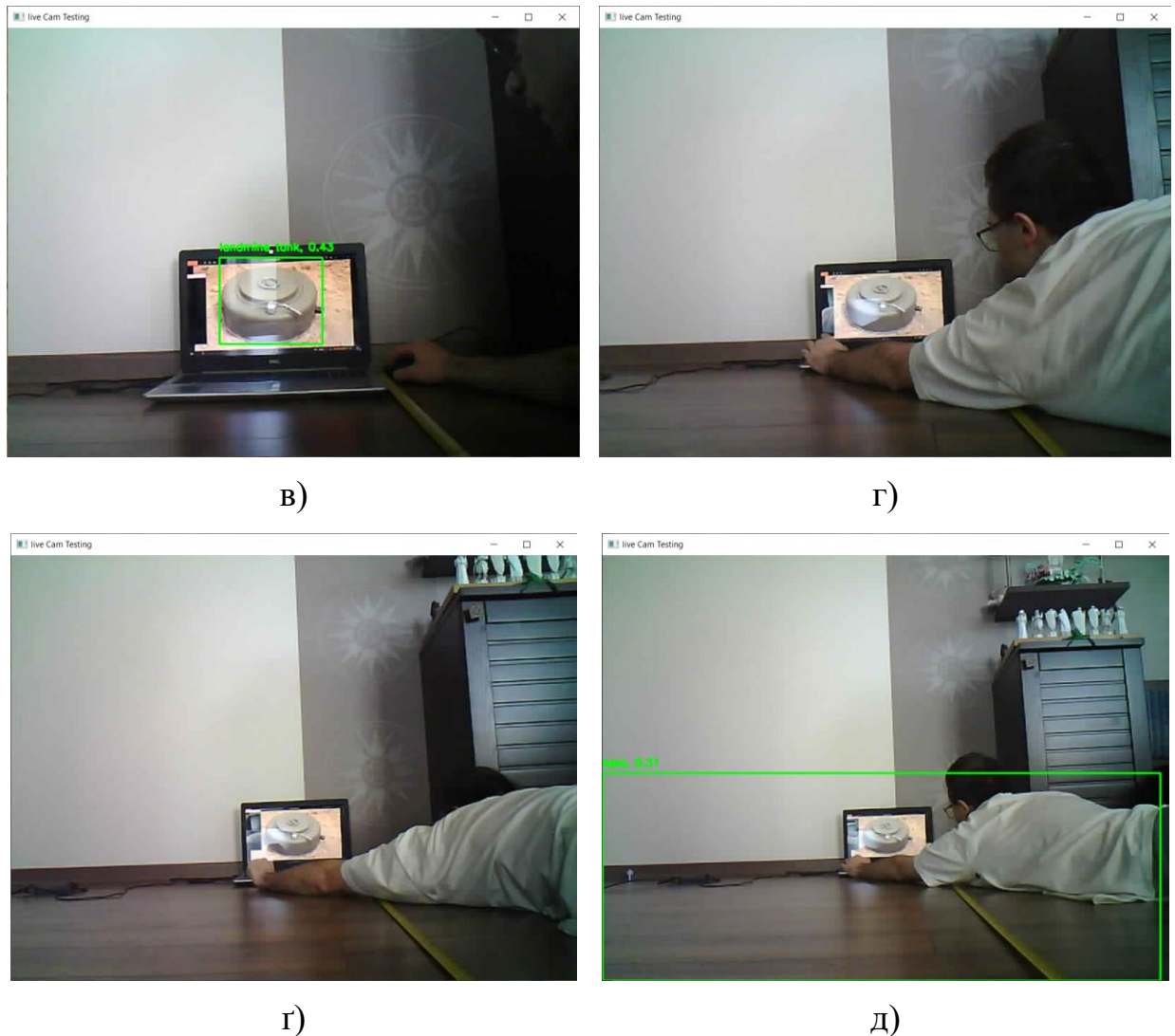


а)

б)

а) 40 см; б) 80 см.

Рисунок 3.11 – Результати тестування системи комп'ютерного зору для різних відстаней до предмета

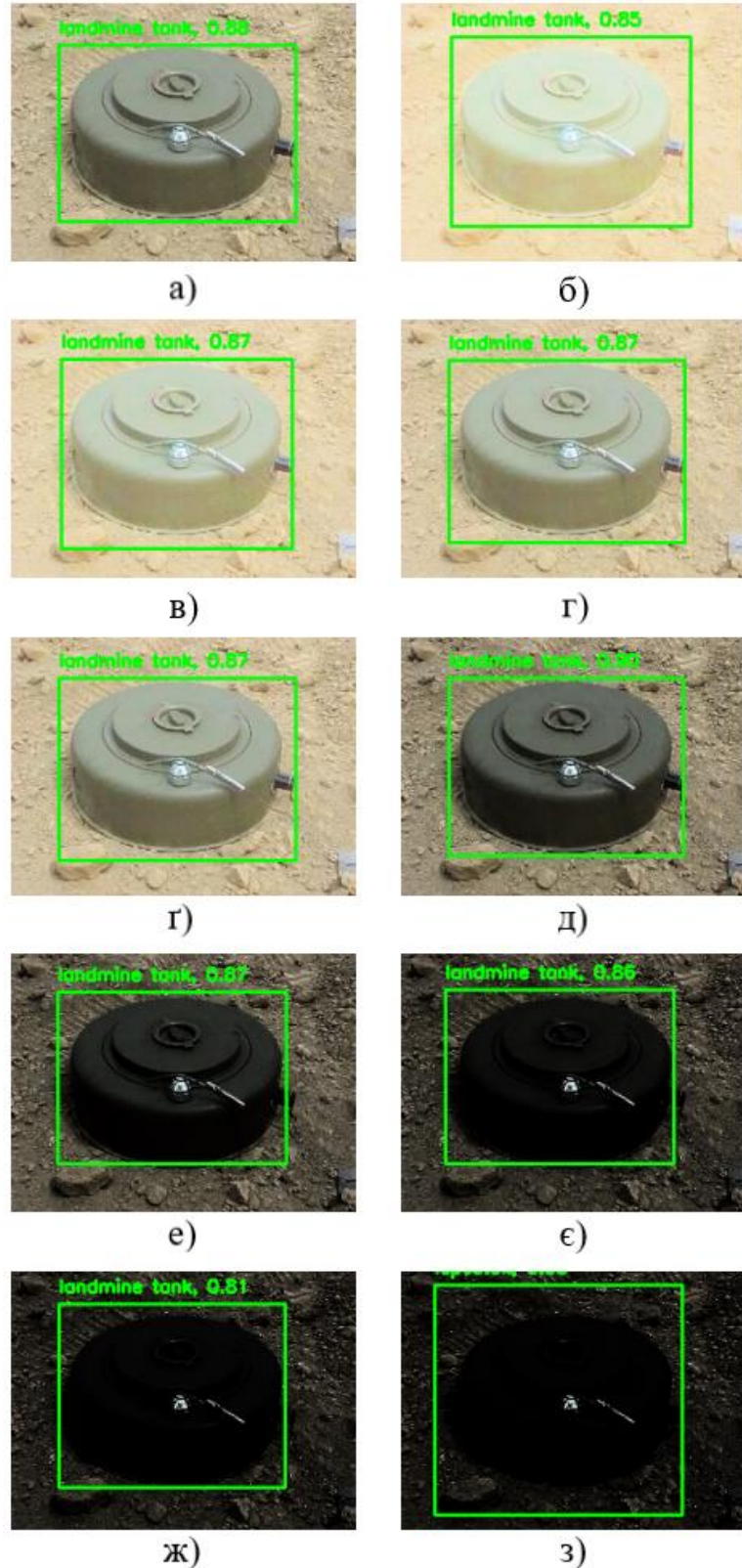


в) 120 см; г) 160 см; г) 200 см; д) 240 см.

Рисунок 3.11, аркуш 2

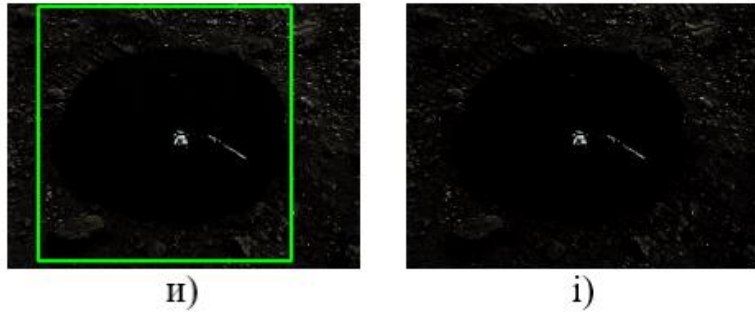
Далі, необхідно було виконати тестування макету для різних рівнів освітленості. В найкращому випадку, необхідно було б освітити макет вибухівки світлом різної яскравості, втім для цього необхідно мати зазначений макет та джерело змінної освітленості. Тому, було вирішено створити копії тестового зображення з різними рівнями яскравості, після чого застосувати коефіцієнти моделі на кожному з них.

Для цього було створено програму в середовищі PyCharm (рис. И.1), та отримано результати розпізнавання, що збігаються з рисунком 3.12. На основі отриманих результатів було також побудовано графік рисунка 3.13.



а) оригінальне зображення, б)  $\gamma = \frac{1}{0.2}$ ; в)  $\gamma = \frac{1}{0.4}$ ; г)  $\gamma = \frac{1}{0.6}$ ; і)  $\gamma = \frac{1}{0.8}$ ;  
 д)  $\gamma = \frac{1}{2}$ ; е)  $\gamma = \frac{1}{4}$ ; є)  $\gamma = \frac{1}{6}$ ; ж)  $\gamma = \frac{1}{8}$ ; з)  $\gamma = \frac{1}{10}$ .

Рисунок 3.12 – Результати тестування системи комп'ютерного зору на зображеннях, затемнених різними коефіцієнтами гамма-корекції



$$\text{ii) } \gamma = \frac{1}{12}; \text{ i) } \gamma = \frac{1}{14}.$$

Рисунок 3.12, аркуш 2

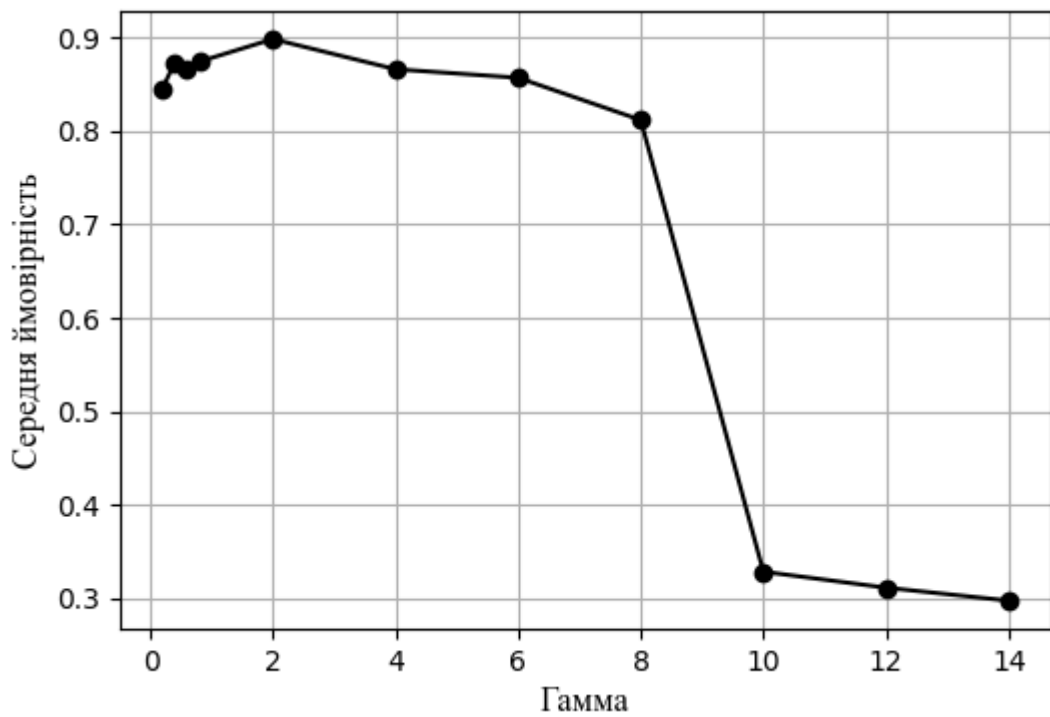


Рисунок 3.13 – Залежність середньої ймовірності розпізнавання предметів на зображенні від значення гамма відповідної корекції

Таким чином, модель здебільше схильна до помилок, пов'язаних з формою предмета.

### 3.7 Розрахунок показників ергономічності робочого простору оператора ПК

Згідно з [70], робоче місце оператора має бути обладнане відповідно до правил, що зменшують об'єм зусиль на додаткові рухи на кшталт перенесення вантажу. Також, для оператора мають бути створені умови, за яких рівень його здоров'я погіршиться найменше.

Найбільш вразливими підсистемами організму оператора є опорно-рухова через тривале сидіння перед монітором та сенсорна через тривалий перегляд зображень на однаковій відстані. Тому в першу чергу було розраховано показники, що впливають на зручність сидіння оператора, та на навантаження його очей. Зазначені показники було розраховано відповідно до ISO 9241-5 [71] та ДБН В.2.2-40:2018 [72].

Для зручності сидіння за комп'ютером, висота столу має становити (3.1)

$$h_{\text{ст}} = 0.25 \cdot h_{\text{оп}} + 0.3, \quad (3.1)$$

де  $h_{\text{ст}}$  – висота столу, м;

$h_{\text{оп}}$  – зріст оператора, м.

Для оператора зростом 186 см висота столу має становити 76.5 см. В реальному випадку, висота столу становить 75.8 см, що є близьким до бажаного значення.

Щодо висоти стільця, то вона має забезпечувати згин колін оператора в 90 градусів, тобто становити приблизно (3.2)

$$h_{\text{сид}} = 0.245 \cdot h_{\text{оп}}, \quad (3.2)$$

де  $h_{\text{сид}}$  – висота сидіння, м.

Для оператора зазначеного росту оптимальна висота сидіння має становити 45.57 см, в той час як реальна висота становить 46 см.

Щодо зручності для зору, то відстань від монітора до очей оператора має становити (3.3)

$$l_{\text{екр}} = D \cdot k, \quad (3.3)$$

де  $l_{\text{екр}}$  – відстань від монітора до очей оператора, м;

$D$  – діагональ екрана комп'ютера, м;

$k = 1.5..2.5$ .

Згідно з [73], діагональ екрана оператора становить 41,9 см, отже відстань до екрана має становити від 62,85 см до 104, 75 см. В реальних умовах, оператор рухав монітор в межах від 67 см до 89 см, що знаходиться в межах дозволеної відстані.

Отже, всім вимогам до ергономічності робочого простору було задовільнено.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи було виконано перелік дій, необхідних для створення мобільного робота з системою комп'ютерного зору для розпізнавання вибухонебезпечних предметів: було проаналізовано конструкції існуючих аналогів, як найбільш поширених, так і вартих уваги лабораторних розробок; було проаналізовано види систем керування роботами залежно від кількості оброблених контролером робота даних та наявності зворотного зв'язку в системі керування; було проаналізовано методи пошуку вибухонебезпечних предметів з метою аргументувати актуальність використання систем комп'ютерного зору.

Також, було розроблено мобільного робота з системою розпізнавання вибухонебезпечних предметів: було сформовано вимоги до системи та на їх основі побудовано загальну структурну схему, вибрано апаратні модулі серед аналогів, у тому числі з виконанням статичного аналізу тіла робота для вибору двигунів руху коліс та зрушення робота з місця та його досягнення швидкості, більшої за 0,0125 м/с. Також, було виконано аналіз стійкості системи керування серводвигуном руху камери.

Далі було створено програмне забезпечення: побудовано алгоритм роботи контролера руху, камери, мобільного додатку та системи обробки зображення. Для кожної із зазначених складових було вибрано середовище розробки та створено код програм. Також було вибрано модель нейронної мережі для розпізнавання вибухонебезпечних предметів та натреновано її до рівня задовільнення вимог, зазначених у вихідних даних до роботи: зменшено класові помилки тренування та хресної перевірки до значень 0,4973 та 0,9426 відповідно, помилки рамок тренування та хресної перевірки до значень 0,60303 та 1,01067 відповідно та збільшено показник повноти моделі до рівня 0,71774. Наостанок, було виконано тестування системи комп'ютерного зору за

різних відстаней до предмета та його освітленостей, а також підсистеми руху на здатність виконувати команди оператора.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шелепко В. Україна – найбільш замінована країна світу. У Міндовкіллі розповіли, скільки років треба для розмінування. *Суспільне новини*. URL: <https://suspilne.media/695270-ukraina-najbils-zaminovana-kraina-svitu-u-mindovkilli-rozpovili-skilki-rokiv-treba-dla-rozminuvanna/> (дата звернення: 10.04.2025).
2. Протипіхотні міни: скільки жертв в Україні та світі. *Слово і Діло*. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2023/11/16/infografika/suspilstvo/protypixotni-miny-skilky-zhertv-ukrayini-ta-sviti> (дата звернення: 10.04.2025).
3. Додатковий протокол до Женевських конвенцій від 12 серпня 1949 року, що стосується захисту жертв міжнародних збройних конфліктів (Протокол I), від 8 червня 1977 року (укр/рос) : Протокол Орг. Об'єдн. Націй від 08.06.1977 : станом на 8 груд. 2005 р. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_199#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_199#Text) (дата звернення: 10.04.2025).
4. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.
5. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.
6. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

7. A review on design and characteristics of landmine detection robot / Vikas Singh Panwar та ін. *Evergreen*. 2024. Т. 11, № 2. С. 900–912. doi: <https://doi.org/10.5109/7183373>.

8. DOK-ING | міношукачі україна. *Міношукачі Україна*. URL: <https://minoshukach.com.ua/wiki/texnika-dlya-rozminuvannya/dok-ing/> (дата звернення: 11.04.2025).

9. TrackReitar CleanField - LeoTronics Robotics. Autonomous mobile robots - LeoTronics Robotics. URL: <https://leotronics.eu/en/tracked-robots/trackreitar-cleanfield> (дата звернення: 10.04.2025).

10. Karpenko A. Overview at modern mine detecting robots. Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2024 Part 2 (Key infrastructure 2024) - Kharkiv/ The Editorial.: Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2024. – 290p with. pp 181 – 185.

11. Hydraulically actuated hexapod robots / К. Nonami та ін. Tokyo : Springer Japan, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54349-7>.

12. F. Fukushima E., Freese M., Matsuzawa T. Humanitarian demining robot gryphon current status and an objective evaluation. *International journal on smart sensing and intelligent systems*. 2008. Т. 1, № 3. С. 735–753. doi: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-317>.

13. Springer handbook of robotics / ред.: В. Siciliano, О. Khatib. Cham : Springer International Publishing, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>.

14. How metal detectors work. *Explain that Stuff*. URL: <https://www.explainthatstuff.com/metaldetectors.html> (дата звернення: 17.04.2025).

15. Inductive proximity sensor working principle. URL: <https://robu.in/inductive-proximity-sensor-working-principle/> (дата звернення: 17.04.2025).
16. Basic Principles – GPG 0.0.1 documentation. *Geophysics for Practicing Geoscientists – GPG 0.0.1 documentation*. URL: [https://gpg.geosci.xyz/content/GPR/GPR\\_fundamental\\_principles.html](https://gpg.geosci.xyz/content/GPR/GPR_fundamental_principles.html) (дата звернення: 17.04.2025).
17. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
18. Невлюдов І., Андрусевич А., Євсєєв В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (raspberry pi и мови python 3.6). Харків, 2020. 257 с.
19. Kunichik O., Tereshchenko V. Determining the effectiveness of using three-dimensional printing to train computer vision systems for landmine detection. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2024. Т. 5, № 1 (131). С. 17–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311602>.
20. Купити камера raspberry pi camera board з безкоштовною доставкою по Україні! - [evo.net.ua](http://evo.net.ua). *Інтернет магазин мікрокомп'ютерів та аксесуарів*. URL: <https://evo.net.ua/raspberry-pi-camera-board/> (дата звернення: 14.04.2025).
21. Модуль ESP32-CAM з камерою OV2640 2MP з адаптером CH340 - Купити в Україні, Харків. *Iwire.com.ua*. URL: <https://1wire.com.ua/module-esp32-cam-s-kameroj-ov2640-2mp-ch340.html> (дата звернення: 14.04.2025).
22. Arducam for raspberry pi camera, 8MP IMX219 auto focus camera module. URL: <https://can.ua/arducam-8mp-imx219-auto-focus-camera-module-for-raspberry-pi-4b-3bplus-zero-zero-2w-b0393/p379412/> (дата звернення: 14.04.2025).

23. M5Stack ESP32 Timer Camera X with 8 MB PSRAM. URL: <https://raspberry.com.ua/p/m5stack-esp32-timer-camera-x-with-8-mb-psram/#!prettyPhoto> (дата звернення: 14.04.2025).
24. Xiao esp32s3 sense. *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/xiao-esp32s3-sense\\_206081.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/xiao-esp32s3-sense_206081.html) (дата звернення: 14.04.2025).
25. Мікродвигун з редуктором 6V 100 RPM купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod3384-mikromotor-s-reduktorom-6v-100-grm> (дата звернення: 15.04.2025).
26. Двигун з редуктором 1:48 (одно-осьовий) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod3195-motor-s-reduktorom-148-odno-osevoi> (дата звернення: 15.04.2025).
27. DC мотор 370 6В. URL: <https://uamper.com/dc-motors/DC-мотор-370-12-24В> (дата звернення: 15.04.2025).
28. Мотори (двигуни). *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/catalog/motory-dvyhuny/597> (дата звернення: 15.04.2025).
29. HC-05 wireless bluetooth RF transceiver module serial RS232 TTL. *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/hc-05-wireless-bluetooth-rf-transceiver-module-serial-rs232-ttl\\_84538.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/hc-05-wireless-bluetooth-rf-transceiver-module-serial-rs232-ttl_84538.html) (дата звернення: 15.04.2025).
30. Модуль Bluetooth HC-06 на друкованій платі. *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/modul-bluetooth-hc-06-na-drukovanii-plati\\_143416.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/modul-bluetooth-hc-06-na-drukovanii-plati_143416.html) (дата звернення: 15.04.2025).
31. HC-08 модуль. *PKC Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/hc-08-modul\\_145102.html](https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/hc-08-modul_145102.html) (дата звернення: 15.04.2025).
32. Сервопривід MG90S V2 (метал.редуктор) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod4318-servoprivod-mg90s-v2> (дата звернення: 18.04.2025).

33. Серводвигун SG90 2кг 180° купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod416-servoprivod-sg90-2kg> (дата звернення: 18.04.2025).
34. Серводвигун EMAX ES08A II (аналоговий, пластикові шестерні) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod1523-servoprivod-emax-es08a-ii-analogovii-plastikovie-shesterni> (дата звернення: 18.04.2025).
35. Сервопривід DS3218MG-180 метал. редуктор 20кг купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod5842-servoprivid-ds3218mg-180-metal-reduktor-20kg> (дата звернення: 18.04.2025).
36. Arduino UNO R3 (CH340/microUSB) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod7518-arduino-uno-r3-ch340> (дата звернення: 18.04.2025).
37. Arduino UNO R4 minima (chinese version) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod6587-arduino-uno-r4-minima-chinese-version> (дата звернення: 18.04.2025).
38. Контроллер arduino mega 2560 R3 (CH340) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/prod2611-arduino-mega2560-r3-ch340> (дата звернення: 18.04.2025).
39. Tscinbuny development board for arduino UNO R3. *TSCINBUNY*. URL: <https://tscinbuny.com/products/tscinbuny-development-board-for-arduino-uno-r3> (дата звернення: 18.04.2025).
40. Tscinbuny expansion board for arduino R3. *TSCINBUNY*. URL: <https://tscinbuny.com/products/tscinbuny-expansion-board-for-arduino-r3> (дата звернення: 18.04.2025).
41. Chassis kits without wheels for arduino robot car kit projects. *TSCINBUNY*. URL: <https://tscinbuny.com/products/chassis-kits-without-wheels-for-arduino-robot-car-kit-projects> (дата звернення: 23.04.2025).

42. Jantzen Lee. Feedback control of a DC servo motor (UM: episode 13), 2020. *YouTube*. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_S12Z86oQ5k](https://www.youtube.com/watch?v=_S12Z86oQ5k) (дата звернення: 02.05.2025).

43. *Components101 - Electronic Components Pinouts, Details & Datasheets*. URL: [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/MG90S-Datasheet.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/MG90S-Datasheet.pdf) (дата звернення: 02.05.2025).

44. Karpenko A. Design of mine-detecting robot using yolov8 object detection model. Collection of Students' Scientific Paper «Automation and Development Of Electronic Devices» ADED-2025 Part 1 (Key infrastructure 2025) - Kharkiv/ The Editorial.: Nevlyudov I.Sh. (head), that all. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2025. – 262p with. pp 62–68.

45. Viral Science - The home of Creativity. Arduino mecanum wheel robot car | all direction smartphone controlled, 2021. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SYtFCyF44h0> (date of access: 06.04.2025).

46. Srishti Robotics. Bluetooth controlled robot using arduino uno and MIT APP inventor, 2021. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=QC6TDIduhfg> (date of access: 06.04.2025).

47. Muhammad Ansar. Arduino Robot Car Control using HC-05 Bluetooth | mit app inventor for android apk, 2019. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=HBQIH98wmHs> (date of access: 06.04.2025).

48. Hui J. MAP (mean average precision) for object detection. *Medium*. URL: <https://jonathan-hui.medium.com/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173> (дата звернення: 24.04.2025).

49. COCO - common objects in context. *COCO - Common Objects in Context*. URL: <https://cocodataset.org/> (дата звернення: 24.04.2025).

50. Roboflow. Top object detection models in 2023 | model selection guide sponsored by intel, 2023. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dL9B9VUHkgQ> (дата звернення: 24.04.2025).

51. A review: object detection models / A. K. Shetty та ін. *2021 6th international conference for convergence in technology (I2CT)*, м. Maharashtra, India, 2–4 квіт. 2021 р. 2021. doi: <https://doi.org/10.1109/i2ct51068.2021.9417895>.
52. Comparative analysis of deep learning image detection algorithms / S. Srivastava та ін. *Journal of big data*. 2021. Т. 8, № 1. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00434-w>.
53. Joshi S. 10 best object detection models of 2025: reviewed & compared. *Hitech BPO*. URL: <https://www.hitechbpo.com/blog/top-object-detection-models.php> (дата звернення: 24.04.2025).
54. Installing - - - Arduino ESP32 latest documentation. *Technical Documents / Espressif Systems*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/installing.html> (дата звернення: 26.04.2025).
55. Software. *Arduino* - *Home*. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/> (дата звернення: 26.04.2025).
56. Visual micro. URL: <https://www.softpedia.com/get/Programming/Other-Programming-Files/Arduino-for-Visual-Studio.shtml> (дата звернення: 26.04.2025).
57. VisualMicro - arduino IDE for visual studio. *VisualMicro - Arduino IDE For Visual Studio*. URL: <https://www.visualmicro.com/> (дата звернення: 26.04.2025).
58. PlatformIO: your gateway to embedded software development excellence. *PlatformIO*. URL: <https://platformio.org/> (дата звернення: 26.04.2025).
59. Differences between arduino compatible ides. *VisualMicro - Arduino IDE For Visual Studio*. URL: <https://www.visualmicro.com/page/Differences-Between-Arduino-Compatible-IDEs.aspx> (дата звернення: 26.04.2025).
60. Android development tools. *AlternativeTo*. URL: <https://alternativeto.net/category/developer-tools/android-development/> (дата звернення: 26.04.2025).

61. Avalonia UI offers VS code tool in '(extremely) early build'. URL: <https://visualstudiomagazine.com/Articles/2023/08/03/avalonia-vs-code.aspx> (дата звернення: 26.04.2025).

62. Google colab. *Google Colab*. URL: <https://colab.research.google.com/github/roboflow-ai/notebooks/blob/main/notebooks/train-yolov8-object-detection-on-custom-dataset.ipynb> (дата звернення: 26.04.2025).

63. MathWorks - maker of MATLAB and simulink. URL: [https://www.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo) (дата звернення: 04.05.2025).

64. Microsoft. Visual studio code - code editing. redefined. Visual Studio Code - Code Editing. Redefined. URL: <https://code.visualstudio.com/> (дата звернення: 04.05.2025).

65. JetBrains. PyCharm: The only Python IDE you need. JetBrains. URL: <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (дата звернення: 04.05.2025).

66. Demining object detection dataset by trashsorting. *Roboflow*. URL: <https://universe.roboflow.com/trashsorting-gg1jy/demining-rpd9q> (дата звернення: 01.05.2025).

67. ESP32 CAM object detection & identification with opencv. *How To Electronics*. URL: <https://how2electronics.com/esp32-cam-based-object-detection-identification-with-opencv/> (дата звернення: 01.05.2025).

68. Google drive: share files online with secure cloud storage | google workspace. *Google Workspace*. URL: <https://drive.google.com/> (дата звернення: 01.05.2025).

69. Train-yolov8-custom-dataset-step-by-step-guide/google\_colab/Train Yolov8CustomDataset.ipynb at master · computervisioneng/train-yolov8-custom-dataset-step-by-step-guide. *GitHub*. URL: [https://github.com/computervisioneng/train-yolov8-custom-dataset-step-by-step-guide/blob/master/google\\_colab/Train Yolov8CustomDataset.ipynb](https://github.com/computervisioneng/train-yolov8-custom-dataset-step-by-step-guide/blob/master/google_colab/Train%20Yolov8CustomDataset.ipynb) (дата звернення: 01.05.2025).

70. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А.

Айвазов. Т. Є. Стищенко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с. – 1,81.

71. ISO 9241-5:1998(E). Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (vdts). Effective from 1998-10-01. Official edition. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/16877/c63fa5bf2d9c4b05a08e9432912c8751/ISO-9241-5-1998.pdf> (date of access: 01.06.2025).

72. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. Чинний від 2025-05-06. Вид. офіц. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3626580502787392825?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3626580502787392825?doc_type=2) (дата звернення: 01.06.2025).

73. InfoByIp.com. URL: <https://www.infobyip.com/detectdisplaysize.php> (дата звернення: 01.06.2025).