



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

12.01.2025



Єфімік Є.О.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і  
виробництва  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 02 » вересня 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Єфіміку Єгору Олександровичу  
(шифр і назва)

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розроблення автоматизованої системи керування  
мобільним роботом з комбінованими рушіями

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ 22.11.2024 №1231Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 17.01.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Керування через модуль Bluetooth; 3.2 Висота  
кліренсу не більше 30см

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз  
сучасних мобільних роботів для переміщення у важкодоступних місцях;  
4.3 Розробка концепту комбінованої системи мобільного робота для  
переміщення у важкодоступних місцях; 4.4 Вибір апаратних модулів та  
виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом;  
4.5 Дослідження системи на стійкість; 4.6 Розробка схеми підключення;  
4.7 Розробка 3D моделей деталей мобільного робота та 3D друк; 4.8 Збірка  
експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою  
двигунів для переміщення у важкодоступних місцях; 4.9 Розробка загального  
алгоритму системи керування мобільним роботом; 4.10 Програмна реалізація  
функцій керування мобільним роботом; 4.11 Експериментальні дослідження  
та аналіз отриманих результатів; 4.12 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 – 10-15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних мобільних роботів для переміщення у важкодоступних місцях	12.09.2024-22.09.2024	виконано
2	Розробка концепту комбінованої системи мобільного робота	23.09.2024-01.10.2024	виконано
3	Вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом	02.10.2024-09.10.2024	виконано
4	Дослідження системи на стійкість	10.10.2024-11.10.2024	виконано
5	Розробка схеми підключення	25.10.2024-07.11.2024	виконано
6	Розробка 3D моделей деталей мобільного робота та 3D друк	08.11.2024-13.11.2024	виконано
7	Збірка експериментального макету МР	14.11.2024-21.11.2024	виконано
8	Розробка загального алгоритму системи керування мобільним роботом	22.11.2024-03.12.2024	виконано
9	Програмна реалізація функцій керування мобільним роботом	04.12.2024-17.12.2024	виконано
10	Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів	18.12.2024-27.12.2024	виконано

Дата видачі завдання 2 вересня 2024р.

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

Єфімік Є.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Євсєєв В.В.

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 7 табл., 20 рис., 3 дод., 39 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ДВИГУНІВ,  
МАНЕВРЕНІСТЬ, ПЕРЕШКОДИ, СТАБІЛЬНІСТЬ РУХУ,  
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ARDUINO.

Мета дослідження – підвищення ефективності керування мобільним роботом у складних умовах за рахунок удосконалення конструкції двигителів.

Об’єкт дослідження – процес керування переміщенням мобільного робота.

Предмет дослідження – методи, моделі, апаратне та програмне забезпечення переміщення робота у ваажкодоступних місцях.

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз класифікації МР за типом рушіїв, огляд конструкцій сучасних МР. Проаналізовано особливості керування мобільними роботами у важкодоступних місцях та тенденції розвитку мобільних роботів для складних умов. Розроблено концепт комбінованої системи мобільного робота, вибрано апаратні модулі та виконавчі пристрої для реалізації системи керування МР. Було досліджено систему на стійкість, розроблено схему підключення, 3D моделі деталей МР, проведено 3D друк та зірано експериментальний макет мобільного робота. Проведено обґрунтування та вибір середовища розробки, розроблено загальний алгоритм системи керування МР, програмно реалізовано функції керування МР та проведено експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів. Отримані результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4.

## ABSTRACT

Explanatory note: 89 pages, 7 tables, 20 figures, 3 app, 39 sources.

MOBILE ROBOT, COMBINED MOTOR SYSTEM, MANEUVERABILITY, OBSTACLES, MOTION STABILITY, ENERGY CONSUMPTION, OPTIMIZATION, ARDUINO.

The purpose of the study is to increase the efficiency of controlling a mobile robot in difficult conditions by improving the design of the actuators.

The object of the study is the process of controlling the movement of a mobile robot.

The subject of the study is methods, models, hardware and software for moving a robot in difficult-to-reach places.

The qualification work analyzes the classification of MR by type of actuators, reviews the designs of modern MRs. The features of controlling mobile robots in difficult-to-reach places and trends in the development of mobile robots for difficult conditions are analyzed. The concept of a combined mobile robot system is developed, hardware modules and actuators are selected for implementing the MR control system. The system was tested for stability, a connection diagram was developed, 3D models of MR parts were developed, 3D printing was carried out and an experimental model of a mobile robot was tested. The justification and selection of the development environment were carried out, the general algorithm of the MR control system was developed, the MR control functions were implemented in software, and experimental research and analysis of the results were carried out. The obtained results of the qualification work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely 9.4.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних мобільних роботів для переміщення у важкодоступних місцях.....	12
1.1 Аналіз класифікації мобільних роботів за типом рушіїв.....	12
1.2 Огляд конструкцій сучасних мобільний роботів.....	14
1.3 Аналіз особливостей керування мобільними роботами у важкодоступних місцях .....	16
1.4 Аналіз тенденцій розвитку мобільних роботів для складних умов.....	17
1.5 Постановка задач дослідження .....	19
2 Розробка експериментального макету мобільного роботу.....	21
2.1 Розробка концепту комбінованої системи мобільного робота для переміщення у важкодоступних місцях.....	21
2.2 Вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом.....	24
2.3 Дослідження системи на стійкість .....	33
2.4 Розробка схеми підключення.....	41
2.5 Розробка 3D моделей деталей мобільного робота та 3D друк .....	43
2.6 Збірка експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях .....	45
2.7 Висновки до 2 розділу .....	48
3 Розробка програми керування мобільним роботом.....	50
3.1 Обґрунтування та вибір середовища розробки .....	50
3.2 Розробка загального алгоритму системи керування мобільним роботом.....	51
3.3 Програмна реалізація функцій керування мобільним роботом .....	54

3.4 Проведення експерименту та аналіз отриманих результатів .....	58
3.5 Охорона праці.....	63
3.6 Висновки до 3 розділу .....	64
Висновки .....	66
Перелік джерел посилання .....	68
Додаток А Код програми.....	74
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень .....	79
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	88

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Кд – кандели;

Лк – люкси;

МР – мобільні роботи.

## ВСТУП

В умовах швидкого розвитку технологій робототехніки та автоматизації зростає попит на роботи, здатні ефективно виконувати завдання в різноманітних середовищах: від міських вулиць до промислових та екстремальних зон. Актуальність теми дослідження обумовлена потребою в підвищенні ефективності мобільних роботів, особливо в складних та важкодоступних умовах, де традиційні методи керування та конструкції рушіїв не завжди здатні забезпечити достатній рівень маневреності та стабільності.

Враховуючи важливість застосування таких роботів у різних сферах (від рятувальних операцій до промислових та дослідницьких задач), проблема розробки систем керування для мобільних роботів з комбінованими рушіями набуває особливої актуальності. Удосконалення конструкції рушіїв і методів керування переміщенням робота дозволяє значно розширити діапазон можливих застосувань таких роботів, зокрема в умовах важкодоступних місць, де звичайні методи керування не дають належного результату. Рішення цієї проблеми дозволить не тільки покращити технічні характеристики роботів, а й знизити ризики та витрати на їх експлуатацію та обслуговування.

Мета дослідження – підвищення ефективності керування мобільним роботом у складних умовах за рахунок удосконалення конструкції двигателів.

Об'єкт дослідження – процес керування переміщенням мобільного робота.

Предмет дослідження – методи, моделі, апаратне та програмне забезпечення переміщення робота у важкодоступних місцях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз класифікації мобільних роботів за типом рушіїв;
- провести огляд конструкцій сучасних мобільних роботів;
- провести аналіз особливостей керування мобільними роботами у важкодоступних місцях;
- провести аналіз тенденцій розвитку мобільних роботів для складних умов;
- розробити концепт комбінованої системи мобільного робота для переміщення у важкодоступних місцях;
- провести вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом;
- провести дослідження системи на стійкість;
- розробити схему підключення;
- розробити 3D моделі деталей мобільного робота та провести 3D друк;
- провести збірку експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях;
- провести обґрунтування та вибір середовища розробки;
- розробити загальний алгоритм системи керування мобільним роботом;
- програмно реалізувати функції керування мобільним роботом;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.

Кваліфікаційна робота виконана згідно [1-3]. Результати кваліфікаційної роботи отримали апробацію на наукових конференціях [4].

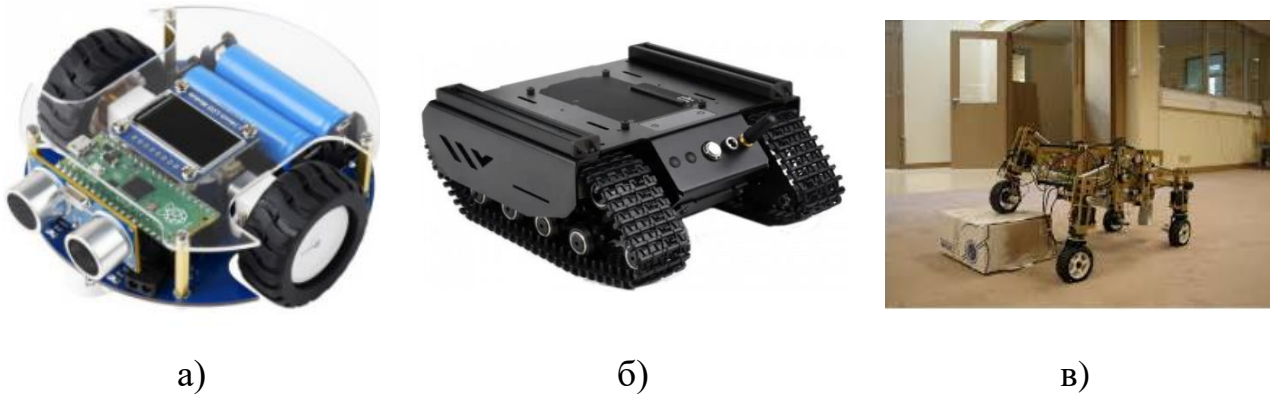
# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ У ВАЖКОДОСТУПНИХ МІСЦЯХ

## 1.1 Аналіз класифікації мобільних роботів за типом рушіїв

Мобільні роботи (МР) широко застосовуються для виконання завдань у важкодоступних місцях, де традиційні методи можуть бути недостатньо ефективними. Основною характеристикою мобільного робота є його рушії, які визначають можливості переміщення в різних умовах. Розглянемо чотири основні типи рушіїв: колісні, гусеничні, крокуючі та комбіновані [5].

Колісні рушії є найпростішими за конструкцією і широко використовуються у відносно рівних умовах. Їх основними перевагами є висока швидкість, енергоефективність і простота реалізації системи керування. Проте їх недоліком є обмежена прохідність на нерівних поверхнях та в умовах значних перешкод. Гусеничні рушії, на відміну від колісних, забезпечують значно вищу прохідність завдяки більшій площі контакту з поверхнею. Вони чудово підходять для пересування по м'якому ґрунту, піску або снігу. Недоліками цього типу є більша складність конструкції, підвищений рівень зношування та витрати енергії. Крокуючі рушії імітують рухи живих істот, що дозволяє їм легко долати нерівності, сходи та інші складні перешкоди. Головними перевагами є висока маневровість і можливість переміщення практично в будь-якому середовищі. Однак ці рушії мають складну конструкцію, високу вартість і низьку швидкість руху порівняно з іншими типами. Комбіновані рушії об'єднують переваги кількох попередніх типів. Наприклад, робот може мати як колеса для швидкого переміщення, так і гусениці для подолання складних ділянок. Це забезпечує універсальність і адаптивність до різних умов. Основним недоліком таких рушіїв є висока складність конструкції та програмного

забезпечення, а також значні витрати на розробку [6]. Нижче представимо приклади МР, реалізованих на різних типах ходових систем, а порівняний аналіз типів ходових систем для малогабаритних МР, оформимо у вигляді таблиці 1.1.



а)

б)

в)

а) PicoGo колісний робот [7];

б) Гусенична робоплатформа Off-Road UGV-01 [8];

в) Mobility rovers [9]

Рисунок 1.1 – Приклад МР, реалізованих на різних типах ходових систем

Таблиця 1.1 – Порівняний аналіз типів ходових систем для малогабаритних МР

Тип рушія	Переваги	Недоліки
Колісні	Висока швидкість на рівних поверхнях, простота конструкції	Обмежена прохідність на складних поверхнях
Гусеничні	Висока прохідність, стабільність на нерівних поверхнях	Низька швидкість, складність конструкції
Крокуючі	Маневреність, здатність долати перешкоди	Складність конструкції, низька швидкість
Комбіновані	Гнучкість, висока прохідність в складних умовах	Складність конструкції та управління

Проведений аналіз показує, що вибір типу рушіїв для мобільного робота залежить від умов його експлуатації та конкретних завдань. Колісні

рушії ефективні у рівних середовищах, де потрібна швидкість і енергоефективність. Гусеничні та крокуючі рушії краще підходять для складних умов, таких як нерівна місцевість або наявність перешкод. Комбіновані рушії є перспективним напрямом, який дозволяє отримати переваги різних систем, однак вони вимагають високих витрат на розробку. У підсумку, вибір рушіїв для мобільного робота є компромісом між вимогами до його функціональності, складністю реалізації та вартістю. Подальші дослідження бути спрямовані на вдосконалення конструкцій комбінованих рушіїв, що дозволить підвищити ефективність мобільних роботів у важкодоступних місцях [10].

## 1.2 Огляд конструкцій сучасних мобільний роботів

Сучасні мобільні роботи відрізняються різноманіттям конструкцій, які визначають їх здатність до переміщення у різних умовах. Кожна конструкція розробляється з урахуванням специфічних завдань, середовища експлуатації та обмежень. У цьому підрозділі аналізуються найпоширеніші конструктивні рішення, застосовувані у мобільних роботах.

Одним із прикладів є колісні роботи, які найчастіше використовуються для логістичних задач у закритих приміщеннях, таких як склади або заводи. Вони мають просту конструкцію з мінімальною кількістю рухомих частин, що знижує ризик поломки, деякі з них обладнані кількома незалежними колесами, що дозволяє досягати високої маневровості. Гусеничні роботи, у свою чергу, є стандартом для застосувань у складних польових умовах, таких як військові операції чи рятувальні місії. Їх конструкція часто включає підсилені гусениці, здатні витримувати великі навантаження та протидіяти пошкодженням. Такі роботи часто оснащуються датчиками для аналізу поверхні та навігації. Крокуючі роботи є технічним досягненням, що імітує біологічні рухи, їх конструкція зазвичай складається з кількох суглобів, що

дозволяє адаптуватися до нерівностей поверхні. Наприклад, роботи типу Boston Dynamics демонструють виняткову стабільність і здатність пересуватися як по рівних, так і по складних ландшафтах [11].

Серед комбінованих роботів особливої уваги заслуговують моделі, що поєднують колісні та крокуючі рушії. Їх конструкція передбачає автоматичне перемикання між типами рушіїв залежно від умов середовища, що дозволяє значно підвищити їх універсальність і ефективність. Ще одним прикладом є роботи з гібридною конструкцією, які оснащені не тільки колесами чи гусеницями, але й додатковими маніпуляторами або крилами. Це забезпечує можливість виконання додаткових функцій, таких як перевезення вантажів чи здійснення польотів на короткі відстані. Також існують роботи, які використовують модульну конструкцію, що дозволяє змінювати конфігурацію роботи залежно від конкретних завдань. Наприклад, можна додати додаткові сенсори чи змінити тип рушіїв для адаптації до нових умов.

Розвиток конструкцій мобільних роботів також охоплює впровадження легких і міцних матеріалів. Карбонові волокна, титанові сплави та інші сучасні матеріали дозволяють знижувати вагу роботів, збільшуючи при цьому їх міцність і довговічність [12].

Іншою важливою тенденцією є інтеграція автономних систем живлення, таких як сонячні батареї або паливні елементи., це значно збільшує тривалість роботи роботів без необхідності зовнішньої підзарядки, що особливо важливо у віддалених районах. Можна підсумувати, що проведений огляд сучасних конструкцій мобільних роботів свідчить про постійний розвиток у напрямку підвищення універсальності, адаптивності та автономності. Кожна конструкція має свої сильні та слабкі сторони, що визначають її доцільність у тих чи інших умовах експлуатації [13].

### 1.3 Аналіз особливостей керування мобільними роботами у важкодоступних місцях

Керування мобільними роботами у важкодоступних місцях є складним завданням, що вимагає застосування передових технологій та алгоритмів. Це зумовлено різноманітністю умов, з якими стикаються роботи, таких як нерівна місцевість, обмежений простір або відсутність стабільного зв'язку.

Перш за все, для забезпечення ефективного керування роботами використовуються системи локалізації та навігації, сучасні роботи оснащуються сенсорами, такими як LIDAR, камери, ультразвукові датчики та GPS-модулі, що дозволяють отримувати інформацію про оточення та визначати точне місцезнаходження робота.

Автономні системи керування є невід'ємною частиною мобільних роботів. Вони базуються на алгоритмах штучного інтелекту, що дозволяють приймати рішення в реальному часі. Наприклад, системи комп'ютерного зору аналізують зображення для виявлення перешкод, а нейронні мережі прогнозують оптимальний маршрут переміщення. Особливу увагу приділяють енергозбереженню, оскільки у важкодоступних місцях часто немає можливості швидко зарядити робот, в такому випадку, енергоефективні алгоритми планування маршрутів та розподілу завдань дозволяють мінімізувати витрати енергії без зниження продуктивності [14].

У багатьох випадках роботи використовують комбіновані системи керування, що об'єднують автоматичний і ручний режими. Це забезпечує додаткову гнучкість, тобто оператор може втрутитися у разі виникнення критичної ситуації, тоді як у звичайних умовах робот працює автономно.

Так як робота у важкодоступних місцях потребує високої надійності зв'язку, використовуються технології, такі як Wi-Fi, мобільні мережі 4G/5G, а також спеціалізовані протоколи зв'язку, розроблені для роботи у складних умовах, а в деяких випадках роботи здатні створювати власні мережі для

обміну даними між собою. Для аналізу даних, зібраних роботами, використовуються хмарні технології та обчислення на периферії, що дозволяє оперативно обробляти великі обсяги інформації та передавати результати у центральну систему для прийняття рішень [15-16].

#### 1.4 Аналіз тенденцій розвитку мобільних роботів для складних умов

У сучасному світі розвиток технологій мобільних роботів у важкодоступних місцях набуває нових форм та перспектив. Інженери та дослідники зосереджують увагу на розробці рішень, які забезпечують високу ефективність, адаптивність та автономність роботів у складних умовах. Це обумовлено потребами у використанні таких роботів у військовій, рятувальній, індустріальній та дослідницькій сферах [17-18].

Одним із напрямів розвитку є впровадження інтелектуальних алгоритмів керування. Використання штучного інтелекту та методів машинного навчання дозволяє мобільним роботам самостійно адаптуватися до змінних умов середовища. Це особливо важливо у випадках, коли прямий контроль оператора неможливий або небезпечний. Також, розвиваються технології комунікації між роботами та іншими пристроями. Інтеграція систем зв'язку 5G забезпечує високу швидкість передачі даних та мінімальну затримку, що дозволяє роботам ефективніше координувати свої дії, обмінюватися інформацією та працювати у команді.

Значна увага приділяється зменшенню ваги та підвищенню міцності конструкцій роботів. Використання легких і водночас міцних матеріалів, таких як композити та титан, дозволяє створювати роботів, здатних працювати у складних умовах, зберігаючи їхню маневреність та енергоефективність. Ще, спостерігається тенденція до інтеграції багатоцільового функціоналу в конструкцію одного робота. Наприклад, сучасні роботи можуть одночасно виконувати функції дослідження,

транспортування та рятувальних операцій. Це зменшує потребу у використанні кількох окремих пристроїв і підвищує економічну ефективність. Впровадження технологій модульності дає змогу змінювати конфігурацію роботів залежно від задачі. Це дозволяє використовувати одного робота для виконання різноманітних завдань, таких як перевезення вантажів, обстеження території або рятувальні операції [19-20].

Немалий розвиток отримують технології енергозабезпечення мобільних роботів. Сучасні акумулятори на основі літій-іонних технологій поступово вдосконалюються, з'являються альтернативні джерела енергії, такі як водневі паливні елементи, які забезпечують тривалу автономну роботу роботів у важкодоступних умовах.

Покращення сенсорних систем мобільних роботів є ще одним актуальним напрямком. Сучасні сенсори дозволяють створювати тривимірні карти навколишнього середовища, виявляти перешкоди та оцінювати умови роботи. Використання сенсорів на основі LIDAR, інфрачервоного випромінювання та ультразвуку забезпечує точність і надійність роботи [19].

Розробка роботів зі здатністю працювати у складних кліматичних умовах також є важливою тенденцією, це включає роботи, які можуть витримувати екстремальні температури, високу вологість, пил або агресивні хімічні середовища. Завдяки цьому розширюються можливості застосування роботів у різних галузях. Важливу роль відіграють також й етичні аспекти використання мобільних роботів, все більше уваги приділяється розробці стандартів безпеки та правил експлуатації, які мінімізують ризики для людей та навколишнього середовища, так як ці аспекти стають важливим критерієм у проектуванні нових моделей роботів [21-22].

Інтеграція віртуальної реальності у процес керування мобільними роботами дозволяє операторам отримувати деталізоване уявлення про умови роботи. Це сприяє більш точному прийняттю рішень, особливо у випадках складних або небезпечних операцій. Таким чином, тенденції розвитку

мобільних роботів спрямовані на підвищення їхньої автономності, надійності та універсальності. Інтеграція сучасних технологій дозволяє вирішувати дедалі складніші завдання, що робить мобільні роботи незамінними інструментами у важкодоступних умовах [23-24].

### 1.5 Постановка задач дослідження

В першому розділі кваліфікаційної роботи, в ході проведеного аналізу було виявлено, що тема дослідження є актуальною. Метою дослідження є підвищення ефективності керування мобільним роботом у складних умовах за рахунок удосконалення конструкції двигателів. Об'єктом дослідження є процес керування переміщенням мобільного робота. Предметом дослідження є методи, моделі, апаратне та програмне забезпечення переміщення робота у важкодоступних місцях.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити концепт комбінованої системи мобільного робота для переміщення у важкодоступних місцях;
- провести вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом;
- провести дослідження системи на стійкість;
- розробити схему підключення;
- розробити 3D моделі деталей мобільного робота та провести 3D друк;
- провести збірку експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях;
- провести обґрунтування та вибір середовища розробки;
- розробити загальний алгоритм системи керування мобільним роботом;

- програмно реалізувати функції керування мобільним роботом;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.

## 2 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТУ МОБІЛЬНОГО РОБОТУ

2.1 Розробка концепту комбінованої системи мобільного робота для переміщення у важкодоступних місцях

При розробці концепту комбінованої системи переміщення для мобільного робота, що призначений для роботи у важкодоступних місцях, необхідно звернути увагу на декілька ключових аспектів. Перш за все, важливо врахувати різноманітність рельєфів, з якими робот може зіштовхнутися, включаючи сходи, нерівності, слизькі поверхні та водойми. Комбінована система повинна забезпечувати високу прохідність та стабільність на різних типах поверхонь. Використання гусеничних механізмів у поєднанні з колесами може забезпечити кращу адаптивність до різних умов. Важливо також вибрати відповідні серводвигуни, які забезпечать достатню потужність і точність руху [4]. Існують наступні типи ходових систем, аналіз їх переваг та недоліків приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняний аналіз типів ходових систем для малогабаритних мобільних роботів

Типи ходових	Застосування	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Колісна система	Колесні системи підходять для роботи на рівних поверхнях та шляхах	Велика швидкість на рівних ділянках, ефективність енергоспоживання	Обмежена прохідність в умовах нерівностей
Гусенична система	Гусеничні системи ідеально підходять для нерівних, м'яких або умовно прохідних поверхонь	Висока прохідність, стабільність на нерівних ділянках, здатність до маневрування	Може бути менш ефективною на гладких або твердих поверхнях

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Нога з шестиподібною ходовою системою	Імітує природні рухи тварин, дозволяє роботам подолати непрохідність у складних умовах	Гнучкість, здатність пристосовуватися до різних умов рельєфу	Складніша конструкція та управління, менша швидкість
Нелегкий аеростатичний апарат (нелегкий дрефтуєчий робот)	Здатний плавати поверхнею та переміщатися за рахунок аеростатичної підтримки	Може легко подолати перешкоди водою або нерівності	Залежить від атмосферних умов, обмежена точність управління
Комбінована ходова система	Використовує комбінацію коліс, гусениць або інших елементів для покращення універсальності та ефективності в різних умовах	Комбінуює переваги різних систем для оптимального використання в конкретних сценаріях	Може бути складнішою та важчою, ніж інші системи

Як можна бачити, використання комбінованої ходової системи для мобільного робота має декілька переваг, оскільки вона об'єднує різні типи ходових механізмів для оптимальної ефективності в різних умовах та завданнях. Внаслідок чого, вони мають наступні переваги:

- універсальність, комбінована ходова система дозволяє роботу пристосовуватися до різних типів поверхонь та умов роботи. Наприклад, вона може використовувати колеса для швидкого переміщення на рівних поверхнях і гусениці для подолання нерівностей чи м'яких ділянок;

- ефективність у різних середовищах, комбінування різних ходових систем дозволяє роботу працювати в різних середовищах, таких як міська інфраструктура, непрохідні території чи виробничі приміщення, забезпечуючи оптимальні умови для різноманітних завдань;

- підвищена прохідність, комбіновані системи можуть подолати перешкоди та нерівності, які можуть бути складними для інших типів ходових систем. Це робить їх ефективними у важкодоступних місцях;
- оптимальне використання ресурсів, використання різних ходових механізмів за потреби дозволяє економити енергію та підвищує витрату ресурсів, забезпечуючи оптимальну продуктивність у конкретних сценаріях;
- маневреність, комбіновані системи можуть бути конструйовані для забезпечення високої маневреності та точності руху, що робить їх ефективними для виконання завдань у складних умовах та обмежених просторах. Узагальнюючи, комбіновані ходові системи мобільних роботів можуть бути оптимальним вибором для тих сценаріїв, де необхідно поєднати переваги різних типів ходових механізмів для ефективного виконання різноманітних завдань [4].

Виходячи з проведеного аналізу в рамках даного дослідження пропонується використовувати комбіновану схему системи ходової. Концепт реалізації комбінованої схеми системи ходової для малогабаритного мобільного робота представлено на рисунку 2.1.

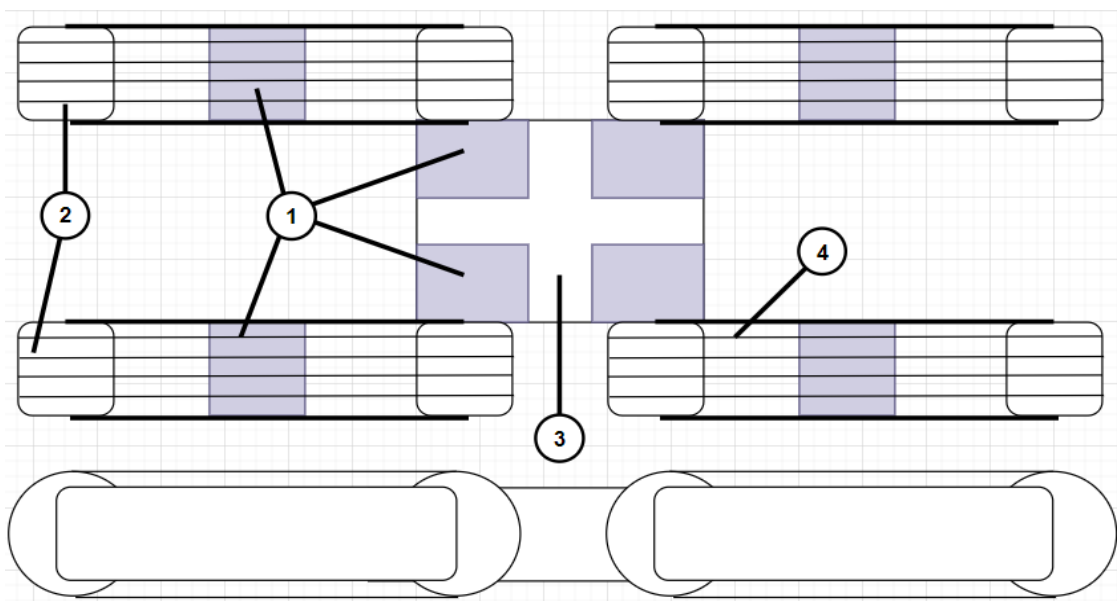
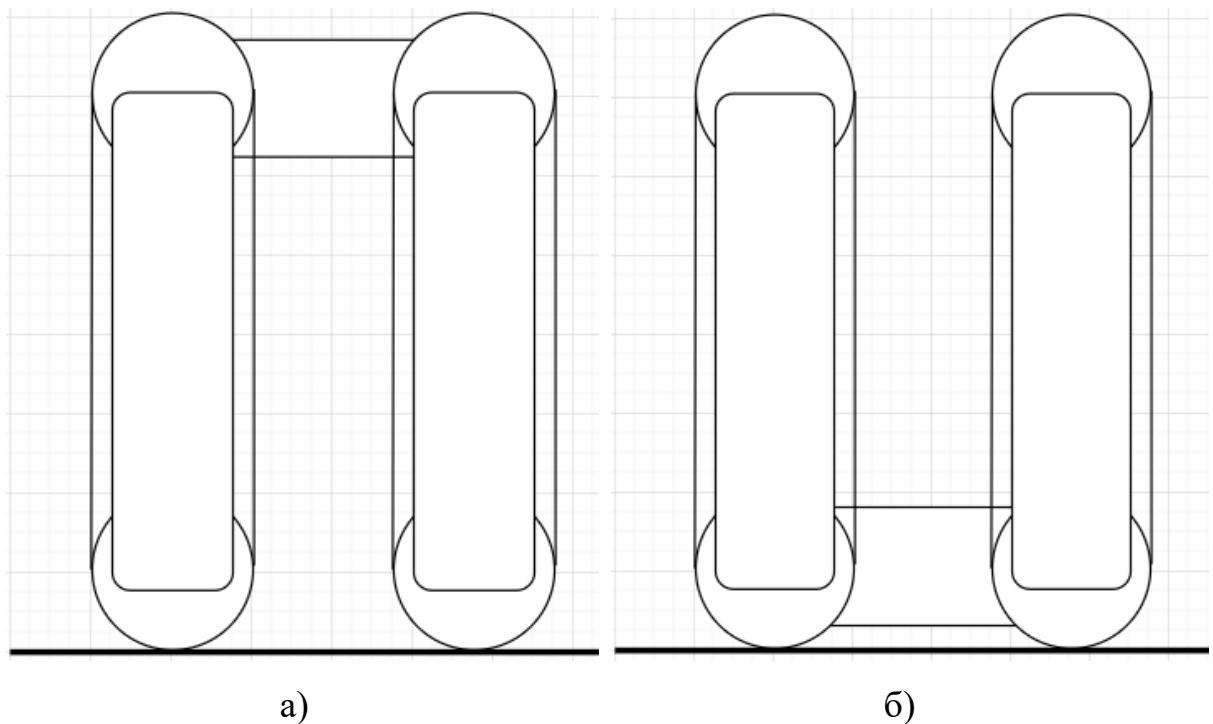


Рисунок 2.1 – Концепт реалізації комбінованої схеми системи ходової для малогабаритного мобільного робота

Опис базових елементів мобільного робота, представлених на рисунку 2.1 такі: 1 – серводвигуни; 2 – колеса; 3 – корпус мобільного робота; 4 – кільця ущільнювачів Caterpillar (товщина ~ 3 мм, діаметром ~ 60 мм та ~ 124 мм). Відповідно до розробленої концепції, робот має наступні можливості переміщення, коли корпус знаходиться зверху (рис. 2.2, а) та знизу (рис. 2.2, б). Також дає можливість незалежно керувати кутом кожної ходової.



- а) корпус мобільного робота знаходиться зверху;  
 б) корпус мобільного робота знаходиться знизу

Рисунок 2.2 – Концепт реалізації комбінованої схеми системи ходової для малогабаритного мобільного робота

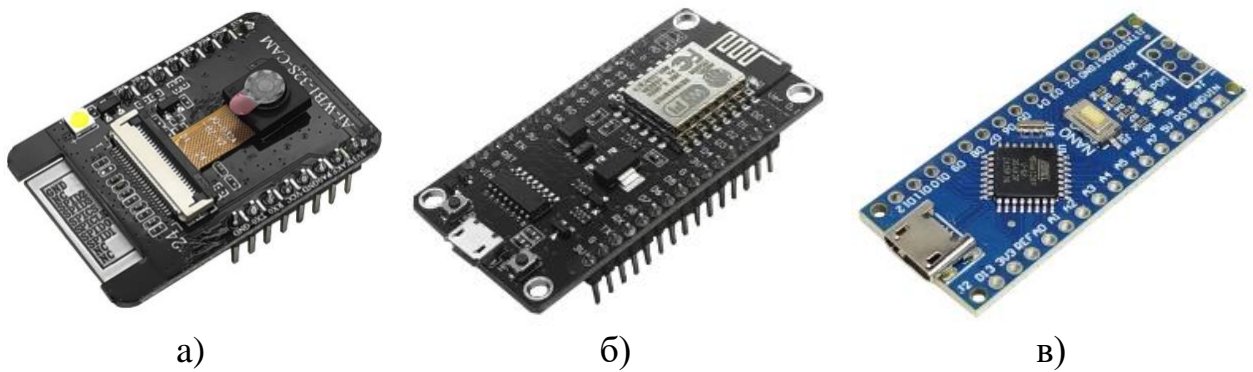
## 2.2 Вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування мобільним роботом

Відповідно до розробленого концепту комбінованої схеми системи ходової для малогабаритного мобільного робота та керування переміщенням

та швидкістю обертів двигунами та кутом підйому необхідно обрати апаратні модулі.

При виборі апаратних модулів для реалізації макета мобільного робота з комбінованою схемою системи ходової, слід звернути увагу на декілька важливих критеріїв. По-перше, потужність і тип двигунів є критично важливими, адже вони визначають здатність робота долати різноманітні перешкоди. Рекомендується використовувати серводвигуни типу MG995 Tower Pro або аналогічні, які забезпечують високий момент сили та точність. По-друге, необхідно обрати відповідні гусеничні механізми та колеса, що забезпечать надійність та прохідність на різних типах поверхонь. Ще одним важливим критерієм є вибір системи управління, яка повинна підтримувати роботу з датчиками для оцінки навколишнього середовища. Це можуть бути ультразвукові датчики, камери або інші сенсори, що дозволять роботу ефективно орієнтуватися в просторі. Важливим є також наявність надійного зв'язку між роботом та оператором, наприклад, за допомогою модулів Wi-Fi або Bluetooth. Енергетична ефективність теж має значення, тому акумулятори повинні забезпечувати достатній запас енергії для тривалої роботи, а також мати можливість швидкого заряджання. Крім того, важливо забезпечити модульність конструкції, щоб полегшити заміну або оновлення компонентів. Вибір матеріалів для корпусу та ущільнень повинен враховувати можливість роботи в екстремальних умовах, таких як високі або низькі температури, пил і волога. Нарешті, програмне забезпечення для управління роботом повинно бути гнучким і підтримувати обробку даних в реальному часі для прийняття рішень на основі інформації з датчиків.

Виходячи з вище перерахованих критеріїв для реалізації системи керування мобільним роботом пропонується обрати з наступних модулів, які приведено на рисунку 2.3.



а)

б)

в)

а) ESP32-CAM [25];

б) ESP 8266 [26];

в) Arduino Nano V3 microUSB [27]

Рисунок 2.3 – Модулі для реалізації системи керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів

Проведемо порівняльний аналіз технічних характеристик апаратних модулів (рис. 2.3), який представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння технічних характеристик апаратних модулів керування

Характеристика	Апаратні модулі на базі мікропроцесору		
	ESP32-CAM	ESP8266	Arduino Nano V3
1	2	3	4
Процесор	32-бітний 2-ядерний Tensilica LX6	32-бітний 1-ядерний Tensilica L106	8-бітний ATmega328P
Частота процесора	До 240 МГц	До 160 МГц	16 МГц
Оперативна пам'ять (RAM)	520 КБ	160 КБ	2КБ
Пам'ять для зберігання (Flash)	4 МБ (вбудована)	До 4 МБ (вбудована)	32 КБ
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	-
Bluetooth	BLE 4.2, класичний Bluetooth	-	-

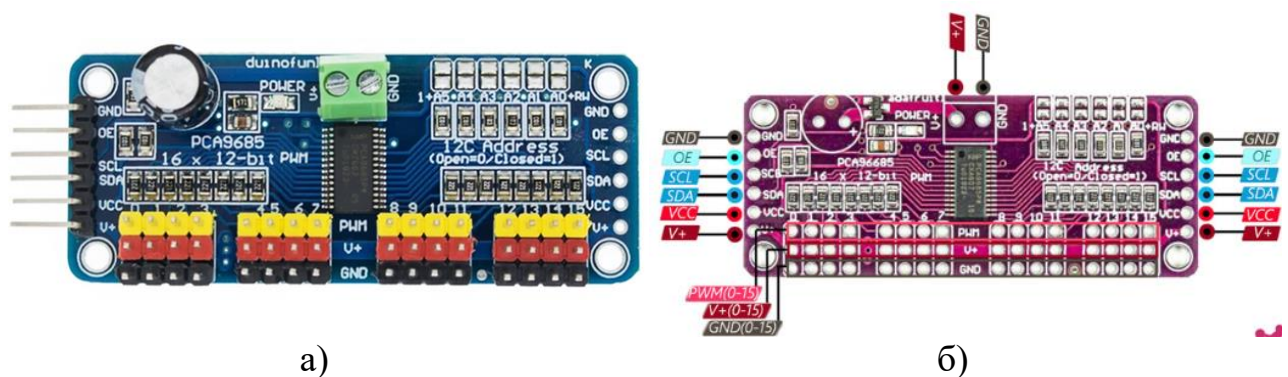
Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
Інтерфейси	I2C, SPI, UART, PWM, ADC, DAC, GPIO	I2C, SPI, UART, PWM, ADC, GPIO	I2C, SPI, UART, PWM, ADC, GPIO
Камера	Підтримує камеру OV2640 (2 МП)	-	-
Відео	Передача відео через Wi-Fi	-	-
Живлення	5 В	3,3 В	5 В
Розміри (мм)	40,5 x 27 x 4,5	24,75 x 14,5 x 3,8	45 x 18 x 4,3
Вартість	Від 9 \$	Від 3 \$	Від 5 \$

Arduino Nano V3 був обраний в якості системи керування завдяки своїй простоті у використанні, широкій сумісності з різноманітними датчиками та модулями, а також достатньому набору інтерфейсів для підключення необхідного обладнання. Його 8-бітний мікроконтролер ATmega328P забезпечує надійну роботу для базових і середніх завдань керування. Використання Bluetooth модуля дозволяє створити бездротовий зв'язок між роботом та оператором, що спрощує процес управління та моніторингу. Хоча Arduino Nano V3 не має вбудованих Wi-Fi або відео можливостей, його доступність, низька вартість та можливість легко інтегруватися з іншими компонентами робить його ідеальним вибором для проектів, де необхідна стабільна та економічно ефективна система керування.

Модуль PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver був обраний для керування серводвигунами в експериментальному макеті мобільного робота з комбінованою системою двигунів через його високу точність та ефективність. Завдяки 12-бітній роздільній здатності, він забезпечує плавне та точне управління положенням серводвигунів, що є критично важливим для досягнення високої маневреності та стабільності робота у важкодоступних місцях. Модуль підтримує до 16 каналів, що дозволяє одночасно контролювати кілька двигунів, необхідних для складних рухів і комбінованих систем переміщення. Використання цього драйвера значно

спрощує процес керування, оскільки він знімає навантаження з мікроконтролера, надаючи можливість більш точного та синхронізованого управління серводвигунами. Підключення через I2C інтерфейс дозволяє легко інтегрувати його з основною платою управління, забезпечуючи стабільний та надійний зв'язок. Також модуль PCA9685 має низьке енергоспоживання, що є важливим для мобільних роботів, яким потрібна тривала автономна робота. Загальний вид модуля представлено на рисунку 2.4, а його технічні характеристики приведені в таблиці 2.3.



а) загальний вид модуля PCA9685 16-channel [28];

б) призначення пінів підключення модуля PCA9685 16-channel [29]

Рисунок 2.4 – Загальний вид модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver

Характеристика	Опис
1	2
Кількість каналів	16
Роздільна здатність	12 біт (4096 кроків)
Інтерфейс	I2C
Робоча напруга	2,3 В – 5,5 В
Робочий струм	10 мА (типовий)
Максимальний вихідний струм	25 мА на канал при 5В
Частота ШІМ	Програмована до 1,6 кГц
Вихідна напруга	0 В – 5,5 В
Підтримка адрес I2C	До 62 модулів на одній шині I2C (6-бітний адресний простір)

Продовження таблиці 2.3

1	2
Тактова частота I2C	До 1 МГц
Робочий температурний діапазон	-40 °С до + 85 °С
Розміри	25 мм x 60 мм
Вартість	Від \$ 9

При розробці малогабаритного мобільного робота до серводвигунів висуваються кілька ключових вимог. По-перше, вони повинні мати високу точність позиціонування, що забезпечує точне керування рухами робота. По-друге, необхідний високий момент сили для подолання різних перешкод та переміщення по нерівних поверхнях.

Серводвигуни повинні мати швидку реакцію на команди для забезпечення маневреності та швидкості руху. Важливою є також стабільна робота при різних умовах навколишнього середовища, зокрема при різних температурах і вологості. Компактні розміри та мала вага серводвигунів є критичними для збереження загальної легкості та маневреності робота. Енергетична ефективність має велике значення для забезпечення тривалої автономної роботи робота. Надійність та довговічність конструкції серводвигунів гарантують безперебійну роботу в умовах інтенсивної експлуатації, крім того вони повинні бути сумісні з модулем PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver.

Виходячи з вище перерахованих вимог, були розглянуті наступні моделі серводвигунів, загальний вид яких переставлено на рисунку 2.5, а їх технічні характеристики приведено в таблиці 2.4.



а)

б)

а) MG995 Tower Pro 360° [30];

б) Futaba 3003 [31]

Рисунок 2.5 – Загальний вид серводвигунів

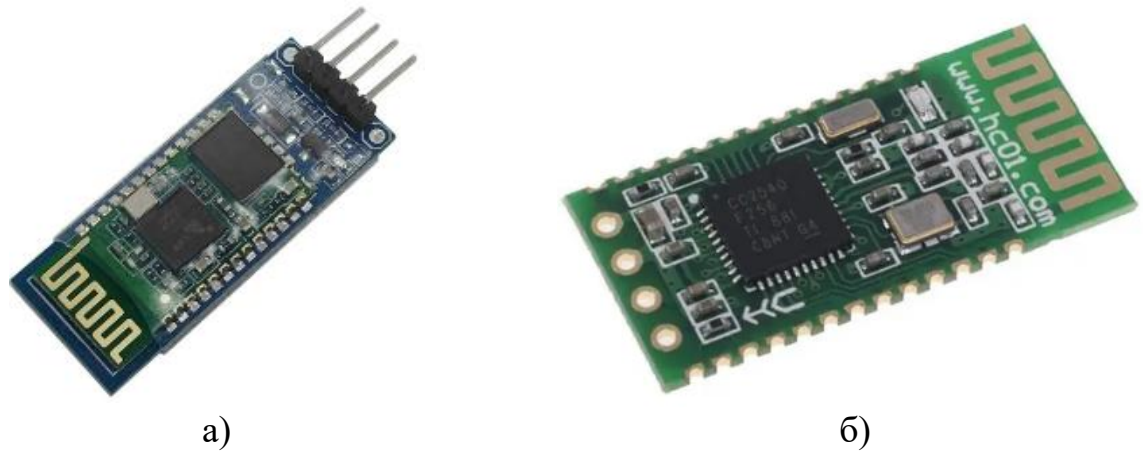
Таблиця 2.4 – Порівняння технічних характеристик серводвигунів MG995 Tower Pro 360° та Futaba 3003

Характеристика	MG995 Tower Pro 360°	Futaba 3003
Кут обертання	360 °	60 ° - 90 °
Робоча напруга	4,8 В – 7,2 В	4,8 В – 6,0 В
Швидкість (4,8 В)	0,20 сек / 60 °	0,23 сек / 60 °
Швидкість (6,0 В)	0,16 сек / 60 °	0,19 сек / 60 °
Момент сили (4,8 В)	10 кг·см	3,2 кг·см
Момент сили (6,0 В)	12 кг·см	4,1 кг·см
Тип мотору	Вуглецевий	Вуглецевий
Вага	55 г	37,2 г
Тип підшипника	Подвійний шарикопідшипник	Немає (звичайні підшипники)
Матеріал шестерень	Металеві	Нейлонові
Розміри (мм)	40,7 x 19,7 x 42,9	40,4 x 19,8 x 36,0
Вартість	~ 5 \$	~ 12 \$

Серводвигуни MG995 Tower Pro 360° були обрані для проекту малогабаритного мобільного робота завдяки їх високому моменту сили та широкому куту обертання, що забезпечує підвищену маневреність та здатність долати складні перешкоди. Ці серводвигуни також відрізняються високою швидкістю реакції, що дозволяє роботу швидко змінювати напрямом

руху. Їх металеві шестерні гарантують надійність та довговічність, особливо в умовах інтенсивного використання. Подвійні шарикопідшипники сприяють плавності роботи та знижують знос механізмів. Крім того, MG995 Tower Pro мають ширший діапазон робочої напруги, що забезпечує гнучкість у виборі джерел живлення. Завдяки цим перевагам, MG995 Tower Pro 360° забезпечують високу продуктивність та надійність, що робить їх ідеальним вибором для малогабаритного мобільного робота, який потребує точного та потужного керування.

Вибір модуля Bluetooth для керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів обґрунтовується його здатністю забезпечити стабільний та надійний бездротовий зв'язок між роботом і оператором. Bluetooth модуль дозволяє здійснювати керування роботом у режимі реального часу на відстані без необхідності використання дротів, що особливо важливо при роботі у важкодоступних місцях. Крім того, Bluetooth має низьке енергоспоживання, що сприяє продовженню автономної роботи робота. Легкість інтеграції з мікроконтролерами, такими як Arduino Nano V3, спрощує процес налаштування та експлуатації системи керування. Завдяки широкій підтримці Bluetooth на різних платформах, оператор може використовувати звичайні мобільні пристрої для керування роботом, що робить систему більш гнучкою та зручною у використанні. В майбутньому можливо буде використовувати не Bluetooth модуль з Arduino Nano V3 microUSB, а більш новий мікроконтролерний модуль такої як: ESP32-Cam або Raspberry pi W. Загальний вид Bluetooth модулів для Arduino представлено на рисунку 2.6, а їх технічні характеристики приведено в таблиці 2.5.



а) модуль Bluetooth HC-06 [32];

б) модуль Bluetooth HC-08 [33]

Рисунок 2.6 – Загальний вид Bluetooth модулів для Arduino

Таблиця 2.5 – Порівняння технічних характеристик модулів Bluetooth HC-06 та Bluetooth HC-08

Характеристика	Модуль Bluetooth HC-06	Модуль Bluetooth HC-08
Версія Bluetooth	2.0	4.0 BLE
Робоча напруга	3,6 В – 6 В	2 В – 3,6 В
Інтерфейс	UART (3,3 В рівень)	UART (3,3 В рівень)
Швидкість передачі даних	1200 - 1382400 біт/с	4800 - 115200 біт/с
Робочий струм	30 мА (робота), 1 мА (режим очікування)	8,5 мА (робота), 0,4 мА (режим очікування)
Дальність передачі	До 10 метрів	До 60 метрів
Підтримка протоколів	SPP (Serial Port Profile)	BLE (Bluetooth Low Energy)
Розміри (мм)	27 x 13 x 2	28 x 13 x 2,3
Вартість	~ 4 \$	~ 8 \$

Модуль Bluetooth HC-06 був обраний для керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів завдяки своїй надійності та простоті використання. HC-06 підтримує версію Bluetooth 2.0, яка забезпечує стабільний зв'язок на відстані до 10 метрів, достатній для багатьох робочих умов. Його швидкість передачі даних до 1382400 біт/с дозволяє оперативно обмінюватися командами та

даними між роботом і оператором. Крім того, модуль має невисоке енергоспоживання, що важливо для автономної роботи робота. Простота інтеграції з мікроконтролерами та широке поширення роблять НС-06 зручним вибором для реалізації системи керування, забезпечуючи надійний та ефективний зв'язок.

### 2.3 Дослідження системи на стійкість

Проведення дослідження системи керування мобільного робота на стійкість на базі теорій автоматичного керування є необхідним для забезпечення надійної та безпечної роботи робота в різних умовах. Стійкість системи керування гарантує, що робот зможе адекватно реагувати на зміни зовнішнього середовища та виконувати задані завдання без втрати контролю. Відсутність стійкості може призвести до некоректної роботи або навіть до аварійних ситуацій, що особливо критично при роботі у важкодоступних місцях. Теорії автоматичного керування надають інструменти для аналізу та синтезу стійких систем, що дозволяє виявити потенційні проблеми на етапі проектування та внести необхідні коригування. Таким чином, дослідження стійкості допоможе створити ефективну систему керування, яка забезпечить стабільну роботу мобільного робота, підвищуючи його надійність та безпеку експлуатації. Базуючись на обраних апаратних модулях в підрозділі 2.2, проведемо дослідження системи керування експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях з використанням теорій автоматичного керування, що дає можливість провести моделювання поведінки запропонованої системи при різних зовнішніх впливах. Структурну схему керування експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях представлено на рисунку 2.7.

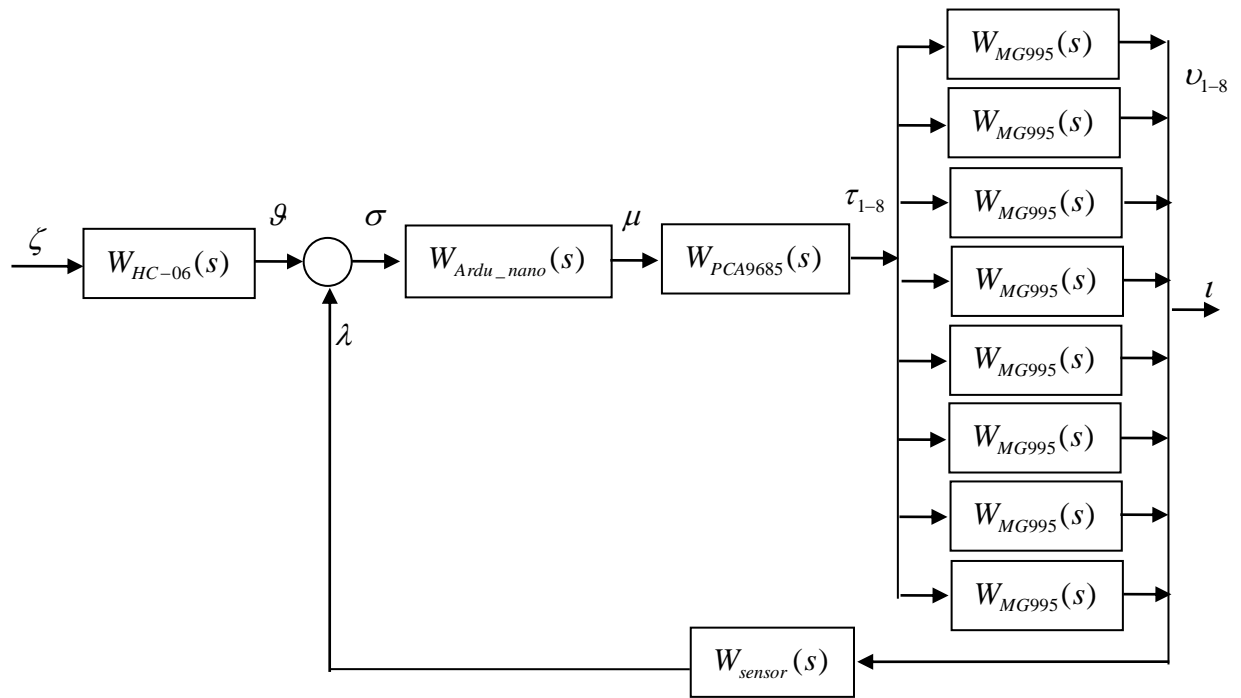


Рисунок 2.7 – Структурна схема керування мобільним роботом

Опишемо призначення кожного блоку розробленої структурної схеми керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів:

- $W_{HC-06}(s)$  – передаточна функція Bluetooth HC-06;
- $W_{Ardu\_nano}(s)$  – передаточна функція Arduino Nano V3 microUSB;
- $W_{PCA9685}(s)$  – передаточна функція модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver;
- $W_{MG995}(s)$  – передаточна функція серводвигуна MG995 Tower Pro 360°;
- $W_{sensor}(s)$  – передаточна функція датчика, в даному дослідженні використовуватиметься потенціометр, який знаходиться всередині серводвигуна MG995 Tower Pro 360°;
- $\zeta$  – керуючий вплив оператора, через програму керування на мобільному пристрої на модуль Bluetooth HC-06, який описується наступною передаточною функцією  $W_{HC-06}(s)$ ;

- $\sigma$  – сигнал керування, який передається на  $W_{Ardu\_nano}(s)$ , та складається з різниці  $\sigma = \vartheta - \lambda$ , що робить негативний суматор, це дозволяє зробити зворотній зв'язок для керування мобільним роботом;
- $\mu$  – сигнал, що поступає по інтерфейсу I2C з Arduino Nano V3 microUSB на модуль PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver;
- $\tau_{1-8}$  – сигнал керування серводвигуна MG995 Tower Pro 360° ( $W_{MG995}(s)$ ), для кожного серводвигуна сигнал  $\mu$  буде індивідуальним з використанням PWM;
- $\lambda$  – сигнали з потенціометрів MG995 Tower Pro 360° ( $W_{MG995}(s)$ ), які поступають на суматор, для покращення керування мобільним роботом;
- $l$  – вихідний сигнал з системи керування.

Опишемо кожен функцію з рисунку 2.7, у вигляді передаточних функцій першого або другого порядку, використовуючи теорію автоматичного керування [34].

Модуль керування на базі Arduino Nano V3 microUSB, вхідний вплив від  $W_{HC-06}(s)$ , вихідним є сигнал керування для  $W_{MG995}(s)$ , можна представити у вигляді передаточної функції першого порядку:

$$W_{Ardu\_nano}(s) = \frac{K_{Ardu\_nano}}{T_{Ardu\_nano}s + 1}, \quad (2.1)$$

де  $K_{Ardu\_nano}$  – коефіцієнт підсилення контролера Arduino Nano V3 microUSB;

$T_{Ardu\_nano}$  – стала часу контролера Arduino Nano V3 microUSB.

Модуль PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver, на вхід подається сигнал від контролера Arduino Nano V3 microUSB, вихід – це PWM сигнал на серводвигуни MG995 Tower Pro 360°, можна теж представити у вигляді передаточної функції першого порядку:

$$W_{PCA9685}(s) = \frac{K_{PCA9685}}{T_{PCA9685}s + 1}, \quad (2.2)$$

де  $K_{PCA9685}$  – коефіцієнт підсилення модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver;

$T_{PCA9685}$  – стала часу модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver.

Серводвигуни MG995 Tower Pro 360°, опишемо у вигляді передаточної функції другого порядку, вхідний сигнал від модуля PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver, вихідний сигнал кутове положення редуктора, передаточна функція буде мати наступний вигляд:

$$W_{MG995}(s) = \frac{\omega_n^2 K_{MG995}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (2.3)$$

де  $\omega_n$  – натуральна частота серводвигуна;

$\zeta$  – коефіцієнт загасання серводвигуна;

$K_{MG995}$  – коефіцієнт підсилення серводвигуна.

Модуль Bluetooth HC-06 ( $W_{HC-06}(s)$ ) можна представити у вигляді передаточної функції першого порядку, на вхід якої подаються команди оператора, а на виході це управляючі сигнали для контролера Arduino Nano V3 microUSB, передаточна функція буде мати наступний вигляд:

$$W_{HC-06}(s) = \frac{K_{HC-06}}{T_{HC-06}s + 1}, \quad (2.4)$$

де  $K_{HC-06}$  – коефіцієнт підсилення модуля Bluetooth HC-06;

$T_{HC-06}$  – стала часу модуля Bluetooth HC-06.

Передаточна функція датчика ( $W_{sensor}(s)$ ), в даному дослідженні використовуватиметься потенціометр, який знаходиться всередині серводвигуна MG995 Tower Pro 360°, можна представити у вигляді передаточної функції першого порядку, на вхід якої подається фізична величина (кут нахилу), а вихідний сигнал подається на передаточну функцію контролера  $W_{Ardu\_nano}(s)$ , через негативний суматор. Передаточну функцію  $W_{sensor}(s)$  можна представити в наступному вигляді:

$$W_{sensor}(s) = \frac{K_{sensor}}{T_{sensor}s + 1}, \tag{2.5}$$

де  $K_{sensor}$  – коефіцієнт підсилення датчика;

$T_{sensor}$  – стала часу датчика.

Для отримання схеми керування мобільним роботом у вигляді розроблених передаточних функцій, блоки передаточних функцій (2.1)-(2.5) з рисунку 2.7, додаємо в рисунок 2.8. Схема керування мобільним роботом з використанням передаточних функцій приведена на рисунку 2.8.

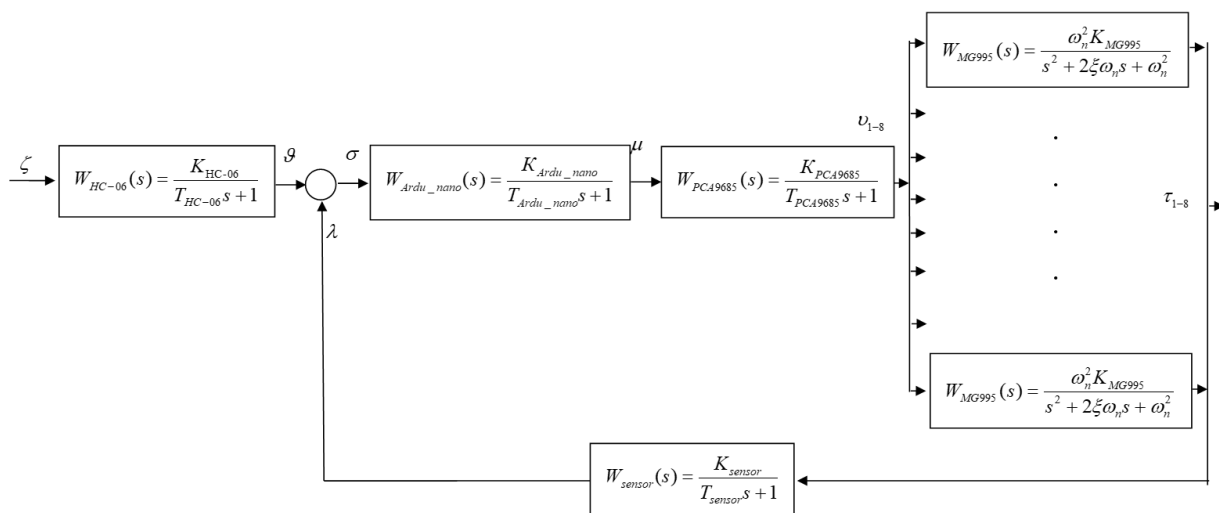


Рисунок 2.8 – Структурна схема керування мобільним роботом

Перевірка розробленої структурної схеми керування мобільним роботом, пропонується розробити програму на базі мови Python в середовищі PyCharm2022.2.3 з використанням бібліотеки matplotlib та control. Обґрунтуванням даного рішення є можливість динамічного налаштування параметрів розробленої системи відповідно до конкретних вимог та використовуваних компонентів у мобільному роботі. Приклад розробленої програми для моделювання передаточних функцій та їх об'єднання в загальну систему керування представлено нижче [35].

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import control as ctrl # Модуль для аналізу автоматичного керування

# Параметри системи
K_c = 1.0
tau_c = 0.1

K_PWM = 1.0
tau_PWM = 0.01

K_servo = 1.0
omega_n = 5.0
zeta = 0.7

K_BT = 1.0
tau_BT = 0.05

# Передаточна функція контролера
H_c = ctrl.TransferFunction([K_c], [tau_c, 1])
```

```

# Передаточна функція модуля PCA9685
H_PWM = ctrl.TransferFunction([K_PWM], [tau_PWM, 1])

# Передаточна функція серводвигуна
H_servo = ctrl.TransferFunction([omega_n**2 * K_servo], [1,
2*zeta*omega_n, omega_n**2])

# Передаточна функція Bluetooth модуля
H_BT = ctrl.TransferFunction([K_BT], [tau_BT, 1])

# Загальна передаточна функція системи
H_system = H_c * H_PWM * H_servo * H_BT

# Аналіз стійкості системи
t, y = ctrl.step_response(H_system)

# Побудова графіка стійкості
plt.figure()
plt.plot(t, y)
plt.title('Графік стійкості системи керування')
plt.xlabel('Час (с)')
plt.ylabel('Відгук системи')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Результат роботи програми моделювання стійкості розробленої системи керування експериментальним макетом мобільного роботу з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях, приведено на рисунку 2.9.

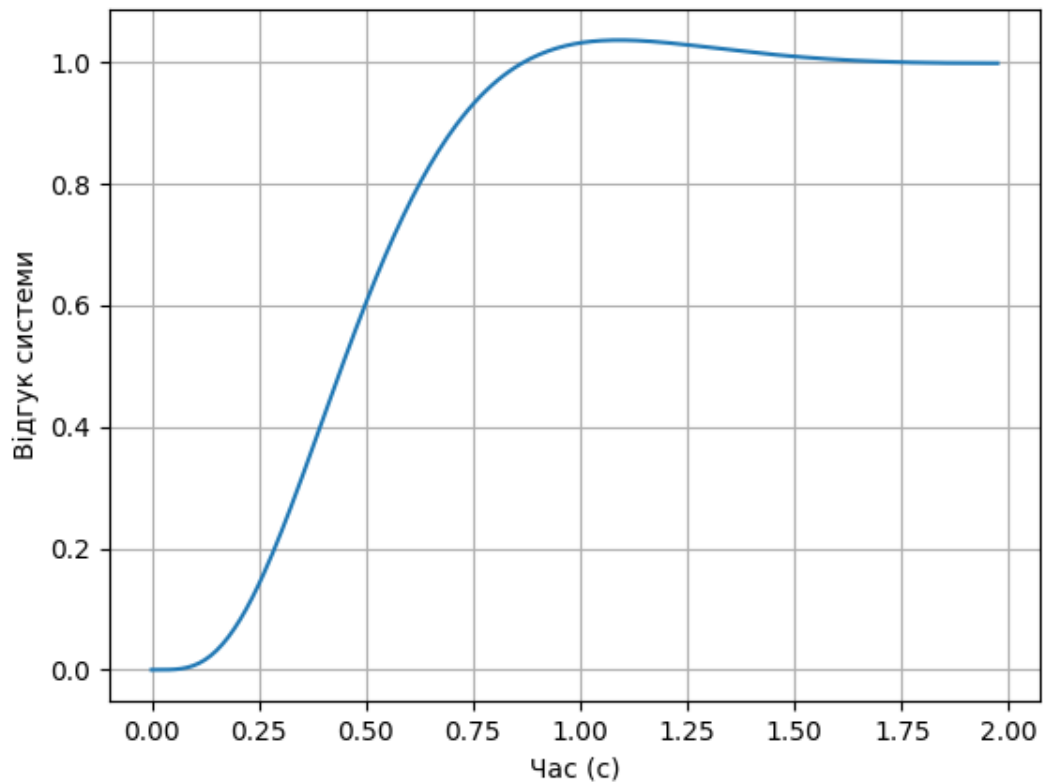


Рисунок 2.9 – Перехідна характеристика розробленої системи керування експериментальним макетом мобільного роботу з комбінованою системою двигунів

Графік відгуку системи на одиничний стрибок (step response) (рис. 2.9) демонструє поведінку системи керування у часі при раптовій зміні вхідного сигналу. Аналізуючи графік (рис. 2.9), можна зробити висновок, що система має адекватну реакцію на одиничний стрибок, показуючи стабільне зростання до встановленого значення без значних коливань або затримок. Це свідчить про високу стійкість системи та її здатність швидко адаптуватися до змін вхідного сигналу. Відсутність осциляцій та перехідних процесів вказує на добре налаштовані параметри контролера та серводвигунів. Система досягає сталого стану за короткий проміжок часу, що є бажаним для забезпечення надійного та ефективного керування мобільним роботом у важкодоступних місцях. Таким чином, можна зробити висновок, що обрана система керування відповідає вимогам стійкості та забезпечує стабільну роботу в різних умовах експлуатації.

## 2.4 Розробка схеми підключення

Розробка схеми підключення керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів включає інтеграцію Arduino Nano V3 microUSB, модуля PCA9685 16-channel, восьми MG995 Tower Pro 360° та керування через модуль Bluetooth HC-06. Arduino Nano V3 слугує головним контролером системи, забезпечуючи взаємодію між різними компонентами. Модуль PCA9685 підключається до Arduino через інтерфейс I2C, що дозволяє розширити кількість каналів PWM для керування всіма вісьмома серводвигунами. MG995 Tower Pro 360° підключаються до виходів модуля PCA9685, що забезпечує точний контроль кожного двигуна.

Модуль Bluetooth HC-06 підключається до Arduino через UART, дозволяючи оператору надсилати команди бездротово з мобільного пристрою. Для стабільної роботи важливо правильно з'єднати всі компоненти, враховуючи спільне заземлення та живлення від відповідного джерела напруги. Забезпечення коректної роботи всіх елементів також вимагає налаштування програмного забезпечення на Arduino, яке керуватиме PWM сигналами для двигунів через PCA9685 та оброблятиме команди, отримані від Bluetooth модуля.

Це забезпечить синхронну та точну роботу всіх компонентів, дозволяючи роботу ефективно пересуватися у важкодоступних місцях. Розроблену схему підключення приведено на рисунку 2.10.

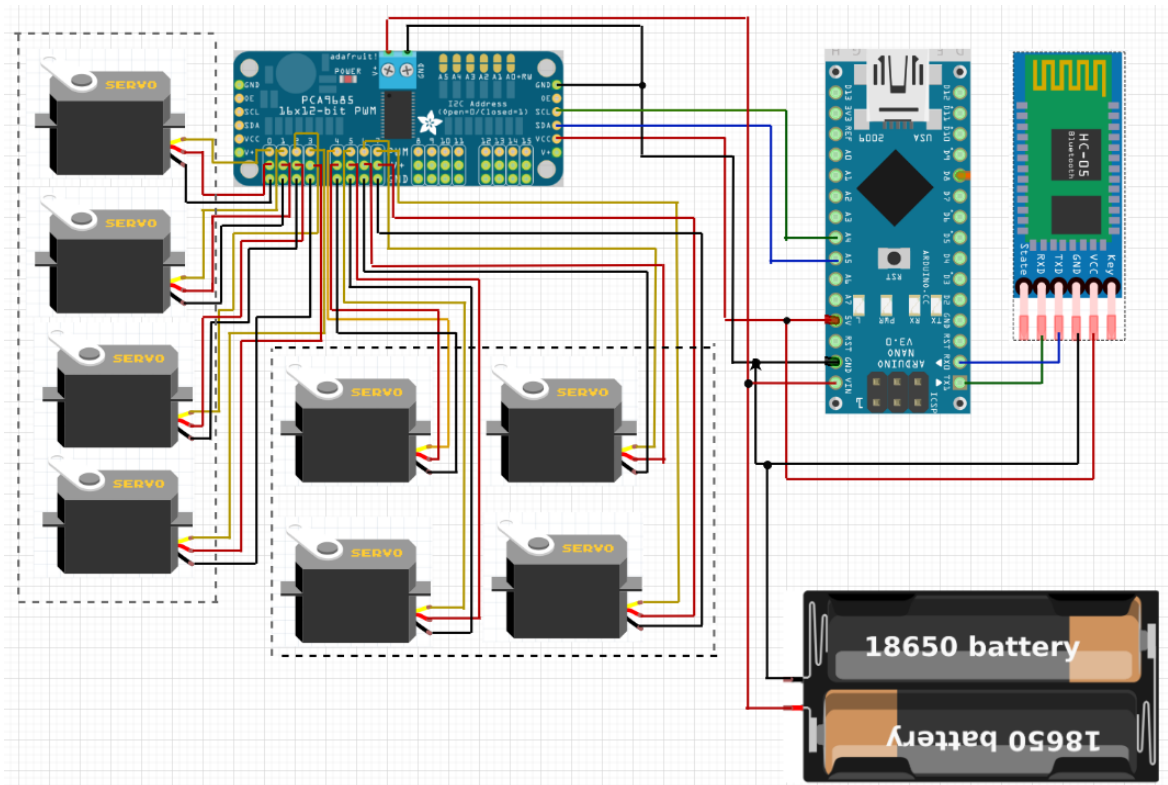


Рисунок 2.10 – Схема підключення апаратних модулів керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів

Відповідно до рисунку 2.10, схеми підключення Arduino Nano V3 microUSB, модуля PCA9685 16-channel, восьми MG995 Tower Pro 360°, модуля Bluetooth HC-05 і двох батарей 18650 необхідно врахувати особливості кожного компонента та вибір відповідних інтерфейсів підключення. Arduino Nano V3 слугує головним контролером і підключається до модуля PCA9685 через інтерфейс I2C, використовуючи пін SDA (A4) і SCL (A5) на Arduino для передачі сигналів керування PWM до двигунів. Живлення PCA9685 здійснюється від батарей 18650 через регулятор напруги, який забезпечує стабільну напругу 5 В для всіх компонентів.

Модуль PCA9685 має 16 каналів PWM, з яких вісім використовуються для підключення серводвигунів MG995 Tower Pro 360°. Кожен двигун підключається до виходів PWM на модулі PCA9685, забезпечуючи точний контроль позиції та обертання. Для живлення серводвигунів

використовується напруга 6 В, що постачається від батарей 18650 через відповідний регулятор.

Модуль Bluetooth HC-06 підключається до Arduino через UART інтерфейс, використовуючи пін RX (підключений до TX на HC-06) і TX (підключений до RX на HC-06), а також спільний GND. Це дозволяє здійснювати бездротове керування роботом за допомогою мобільного пристрою або комп'ютера.

Живлення Arduino Nano V3 також забезпечується від батарей 18650 через його microUSB порт або пін VIN, який може приймати напругу від 7 В до 12 В. З'єднання батарей 18650 послідовно забезпечує необхідну напругу для всіх компонентів системи.


Ця схема підключення дозволяє оптимально використовувати можливості кожного компонента, забезпечуючи стабільну роботу мобільного робота з можливістю бездротового керування та ефективним управлінням серводвигунами через PCA9685.

## 2.5 Розробка 3D моделей деталей мобільного робота та 3D друк

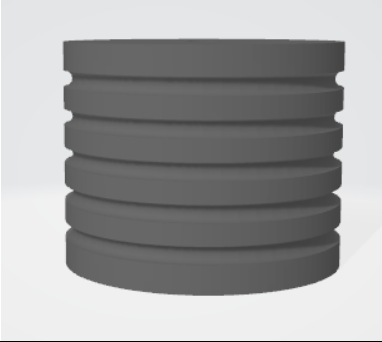

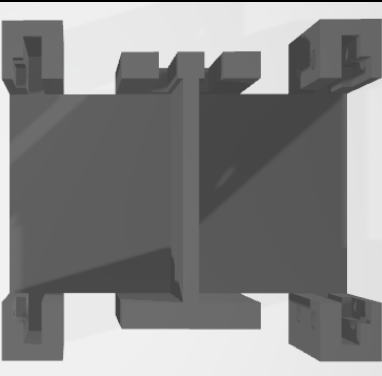
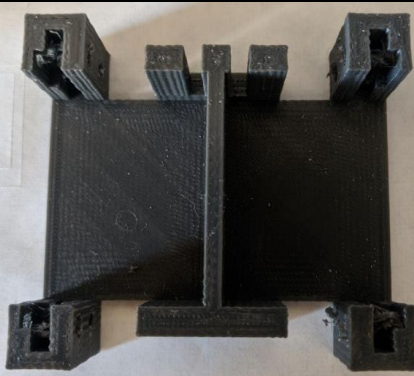
Autodesk Fusion 360 був обраний для розробки 3D моделі експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів завдяки своїм потужним інструментам для моделювання та аналізу. Цей програмний продукт забезпечує інтеграцію параметричного та прямого моделювання, що дозволяє швидко та точно створювати складні конструкції. Fusion 360 також підтримує функції симуляції та аналізу навантажень, що є критично важливими для перевірки надійності та працездатності моделі робота у важкодоступних місцях. Інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий, що значно полегшує процес навчання та використання навіть для новачків у сфері 3D моделювання. Крім того, Fusion 360 надає можливість спільної роботи в режимі реального часу, що дозволяє кільком інженерам одночасно

працювати над проектом і обмінюватися ідеями. Потужні інструменти рендерингу дозволяють створювати високоякісні візуалізації моделі, що сприяє кращому розумінню її конструкції та функціональності. Вбудовані можливості для створення креслень та документації спрощують процес підготовки до виробництва. Завдяки хмарному зберіганню, всі дані проекту доступні з будь-якого пристрою, що забезпечує гнучкість та мобільність роботи. Fusion 360 також підтримує експорт моделей у різні формати для подальшого використання у виробництві або аналізі, що робить його універсальним інструментом для розробки мобільних роботів. Приклад розроблених 3D деталей експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів та надруковані на 3D принтері приведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Приклад розроблених 3D деталей експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів та надруковані на 3D принтері

3D деталі робота розроблені в Autodesk Fusion 360	Надруковані на 3D принтері
1	2
	
	

## Продовження таблиці 2.6

1	2
	
	

## 2.6 Збірка експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях

У цьому підрозділі представимо процес збірки експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів, призначеного для переміщення у важкодоступних місцях. Створення такого робота вимагає ретельного підбору та інтеграції різних апаратних компонентів, включаючи Arduino Nano V3, модуль PCA9685 для керування серводвигунами, та Bluetooth модуль HC-06 для бездротового зв'язку. Процес зборки передбачає не лише фізичне з'єднання компонентів, але й налаштування програмного забезпечення для забезпечення узгодженої роботи всіх систем. Цей підхід дозволяє створити надійного та функціонального робота, здатного виконувати складні завдання у обмежених умовах. Послідовність збірки двигунів розробленого експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів представлено на рисунках 2.11-2.13.

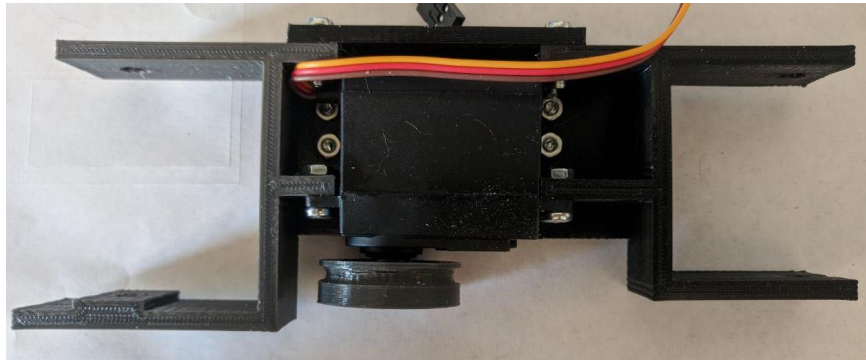


Рисунок 2.11 – Збірка двіжителя мобільного робота

Установка ведучих і ведених движків на несучу конструкцію експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів, представлено на рисунку 2.12.

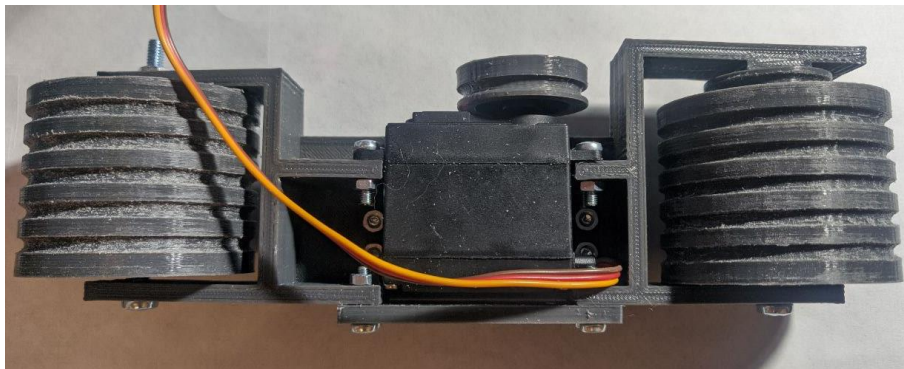


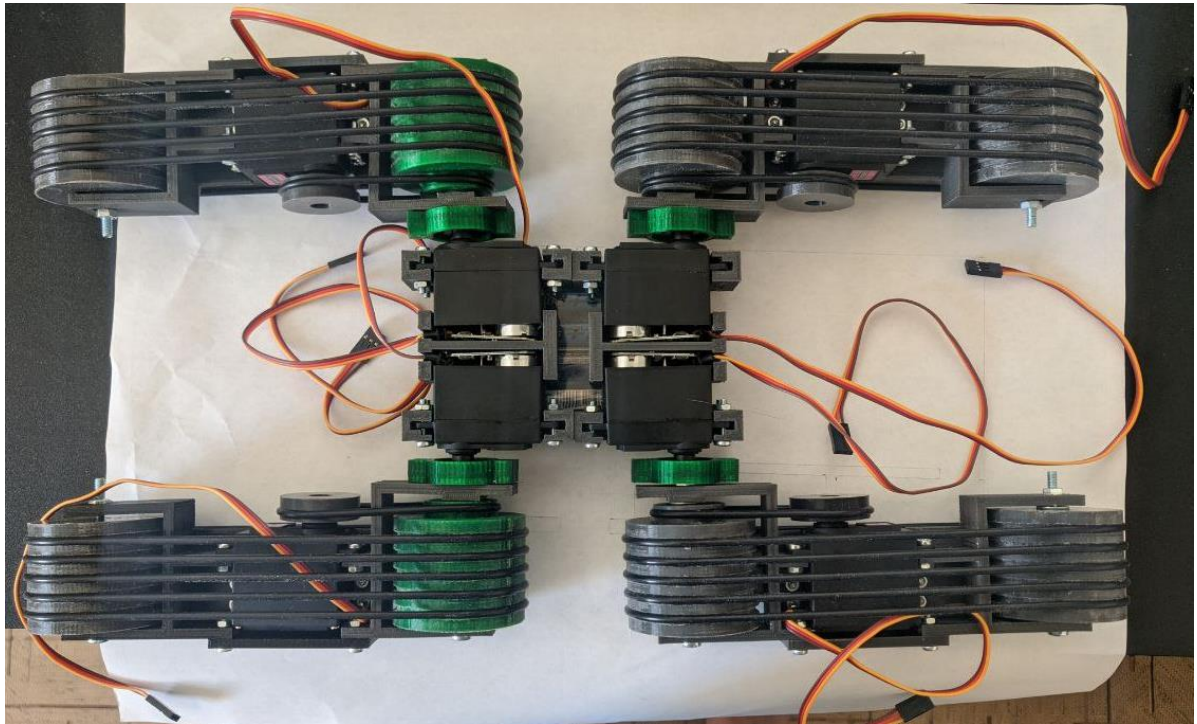
Рисунок 2.12 – Установка ведучих та ведених колес

Встановлення системи передачі рухів в розробленій комбінованій системі представлено на рисунку 2.13.

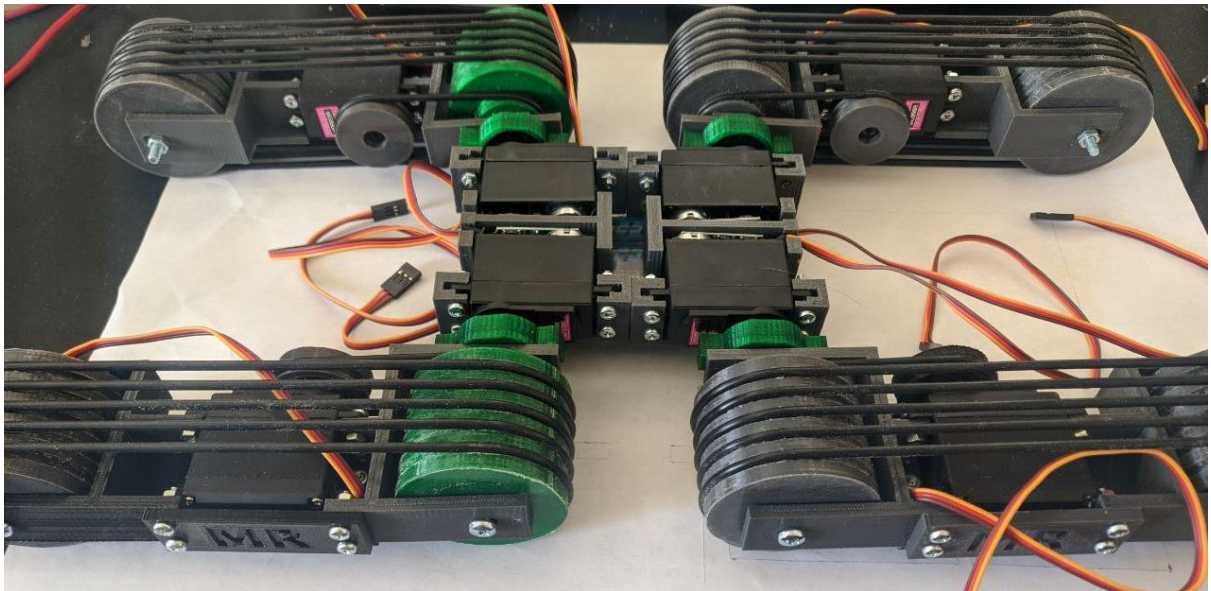


Рисунок 2.13 – Двигун мобільного робота в зборі

Зібраний експериментальний макет мобільного робота з комбінованою системою двигунів, без системи керування, представлено на рисунку 2.14.



а)



б)

а) вид зверху;

б) вид збоку

Рисунок 2.14 – Загальний вид зібраного макета мобільного робота з комбінованою системою двигунів

Розроблена конструкція експериментального макета мобільного робота з комбінованою системою двигунів має кілька важливих переваг. По-перше, комбінована система двигунів дозволяє роботу ефективно пересуватися як по рівних, так і по нерівних поверхнях, що значно розширює можливості його використання в різних умовах. Завдяки наявності восьми серводвигунів, чотири з яких відповідають за підйом корпусу, робот може легко адаптуватися до змін рельєфу та долати перешкоди, піднімаючи корпус для збільшення прохідності. Це особливо важливо для роботи у важкодоступних місцях або на пересіченій місцевості. Додатково, інші чотири серводвигуни, які відповідають за рух вперед, назад та повороти, забезпечують високу маневреність та точність керування роботом. Використання модуля PCA9685 для керування серводвигунами дозволяє ефективно контролювати їх роботу та забезпечує плавний рух. Bluetooth-модуль HC-06 дає можливість бездротового керування роботом, що спрощує його експлуатацію та робить його більш зручним для користувача. Завдяки використанню Arduino Nano V3, система є легкою у програмуванні та налаштуванні, що дозволяє швидко адаптувати робота до нових завдань та умов. Загальна компактність та модульність конструкції сприяє легкому транспортуванню та можливості подальшої модернізації. Усі ці характеристики роблять даний макет універсальним інструментом для дослідження й експериментів у галузі робототехніки, дозволяючи проводити різноманітні тести та вдосконалювати алгоритми керування рухом.

## 2.7 Висновки до 2 розділу

В ході виконання другого розділу кваліфікаційної роботи було розглянуто кілька ключових аспектів, які є важливими для забезпечення ефективності роботи робота в різноманітних умовах, зокрема, було визначено необхідність використання комбінованої ходової системи, яка

поєднує гусеничні механізми та колеса для забезпечення універсальності, підвищеної прохідності та ефективності на різних поверхнях, що дозволяє роботу адаптуватися до змінних умов, таких як нерівності, сходи чи слизькі поверхні.

У виборі апаратних модулів для реалізації цієї системи було звернено увагу на такі фактори, як потужність двигунів, точність рухів та енергетична ефективність. Для забезпечення високої маневреності та стабільності робота в умовах нерівного рельєфу обрано серводвигуни типу MG995 Tower Pro, які характеризуються високим моментом сили та точністю позиціонування. Також, було обрано мікроконтролер Arduino Nano V3, який відрізняється зручністю в інтеграції з іншими модулями та економічністю. Для керування серводвигунами було використано модуль PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver, який забезпечує високу точність і ефективність у управлінні кількома двигунами одночасно, що дозволяє досягти плавного та точного контролю за рухами робота, забезпечуючи йому маневреність і стабільність.

Після дослідження системи на стійкість можна зробити висновок, що обрана система керування відповідає вимогам стійкості та забезпечує стабільну роботу в різних умовах експлуатації. Розроблена схема підключення дозволяє оптимально використовувати можливості кожного компонента, забезпечуючи стабільну роботу мобільного робота з можливістю бездротового керування та ефективним управлінням серводвигунами через PCA9685. Заключним етапом даного розділу було розроблено 3D моделі деталей мобільного робота, роздруковано їх та зібрано експериментальний макет мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступних місцях.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

### 3.1 Обґрунтування та вибір середовища розробки

Обґрунтування вибору середовища розробки для керування експериментальним макетом мобільного робота з комбінованою системою двигунів ґрунтується на аналізі існуючих середовищ розробки та їх відповідності вимогам проекту. Середовища розробки, такі як Arduino IDE, PlatformIO, та Visual Studio Code, мають різні переваги і недоліки. Arduino IDE відрізняється простотою використання та широкою підтримкою апаратних модулів, що робить його оптимальним вибором для початківців та швидкого прототипування. Це середовище підтримує всі необхідні бібліотеки для роботи з Arduino Nano V3, модулем PCA9685, серводвигунами MG995 Tower Pro 360° та Bluetooth модулем HC-06, що дозволяє легко інтегрувати ці компоненти в одну систему.

PlatformIO та Visual Studio Code пропонують більш просунуті функції, такі як вбудоване управління версіями, інтеграція з системами контролю версій та більш гнучкі налаштування проєктів. Однак, ці середовища можуть бути складнішими у налаштуванні та вимагають більшого досвіду від розробника. Враховуючи цілі проекту, що передбачають створення експериментального макету з акцентом на швидку розробку та тестування, Arduino IDE є оптимальним вибором. Воно забезпечує простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, швидкий доступ до великої кількості бібліотек та прикладів, а також активну спільноту користувачів, яка може надати підтримку та допомогу у разі виникнення проблем.

Таким чином, вибір Arduino IDE для розробки програмного забезпечення керування мобільним роботом є виправданим завдяки його зручності, широкій підтримці апаратних модулів та активній спільноті

користувачів. Це середовище дозволить ефективно реалізувати та протестувати всі необхідні функції системи керування, забезпечуючи стабільну та надійну роботу мобільного робота [36].

### 3.2 Розробка загального алгоритму системи керування мобільним роботом

Розробка загального алгоритму системи керування мобільним роботом обґрунтовується потребою в ефективному та точному керуванні рухом робота з використанням сучасних компонентів та технологій. Визначення оптимального алгоритму дозволяє забезпечити стабільність роботи в різних умовах, включаючи нерівні поверхні та змінні умови середовища. Включення 16-канального модуля PCA9685 і 8 сервомоторів MG995 дає можливість для реалізації різних функцій, від маневрів до підйому корпусу, що робить алгоритм універсальним і адаптивним до різних завдань. Особлива увага приділяється програмному керуванню через Arduino Nano V3 і використанню Bluetooth для бездротового зв'язку, що забезпечує зручне та ефективне управління роботом з віддаленого пристрою.

Загальний алгоритм системи керування мобільним роботом можна описати наступним чином:

- ініціалізуємо з'єднання з Arduino Nano через USB для програмування та живлення;
- підключаємо PCA9685 до Arduino через I2C для керування сервомоторами;
- налаштуємо модуль Bluetooth HC-06 для зв'язку з віддаленим пристроєм, наприклад, смартфоном.

Налаштування сервомоторів:

- конфігуруємо PCA9685 для керування 8 сервомоторами MG995;

- встановлюємо параметри середніх позицій сервомоторів для забезпечення нульових значень (наприклад, 90 градусів) для руху.

Обробка команд через Bluetooth:

- встановлюємо зв'язок із Bluetooth HC-06 на Arduino для отримання команд від оператора;

- програмуємо алгоритм обробки команд, отриманих через Bluetooth, для керування рухом робота.

Функції керування рухом:

- підйом або прижимання корпусу. Використовуємо 4 сервомотори для підйому і прижимання корпусу робота до поверхні. Кожен сервомотор налаштовується для відповідної позиції: піднято чи прижато;

- рух вперед, назад та повороти. Ще 4 сервомотори відповідають за рух вперед, назад та повороти вправо і вліво. Кожен з цих сервомоторів регулюється для відповідної позиції, щоб забезпечити рух робота у вибраному напрямку.

Робота в циклі:

- в основному циклі програми Arduino зчитуємо команди через Bluetooth;

- викликаємо відповідні функції для обробки отриманих команд і керування сервомоторами відповідно до вимог оператора.

Цей алгоритм дозволяє створити функціональну систему керування для мобільного робота, яка забезпечує ефективний і точний рух, а також можливість дистанційного керування через Bluetooth з використанням сучасних компонентів і технологій.

Для кращого розуміння представимо загальний алгоритм керування експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступним місцях у вигляді рисунка 3.1.

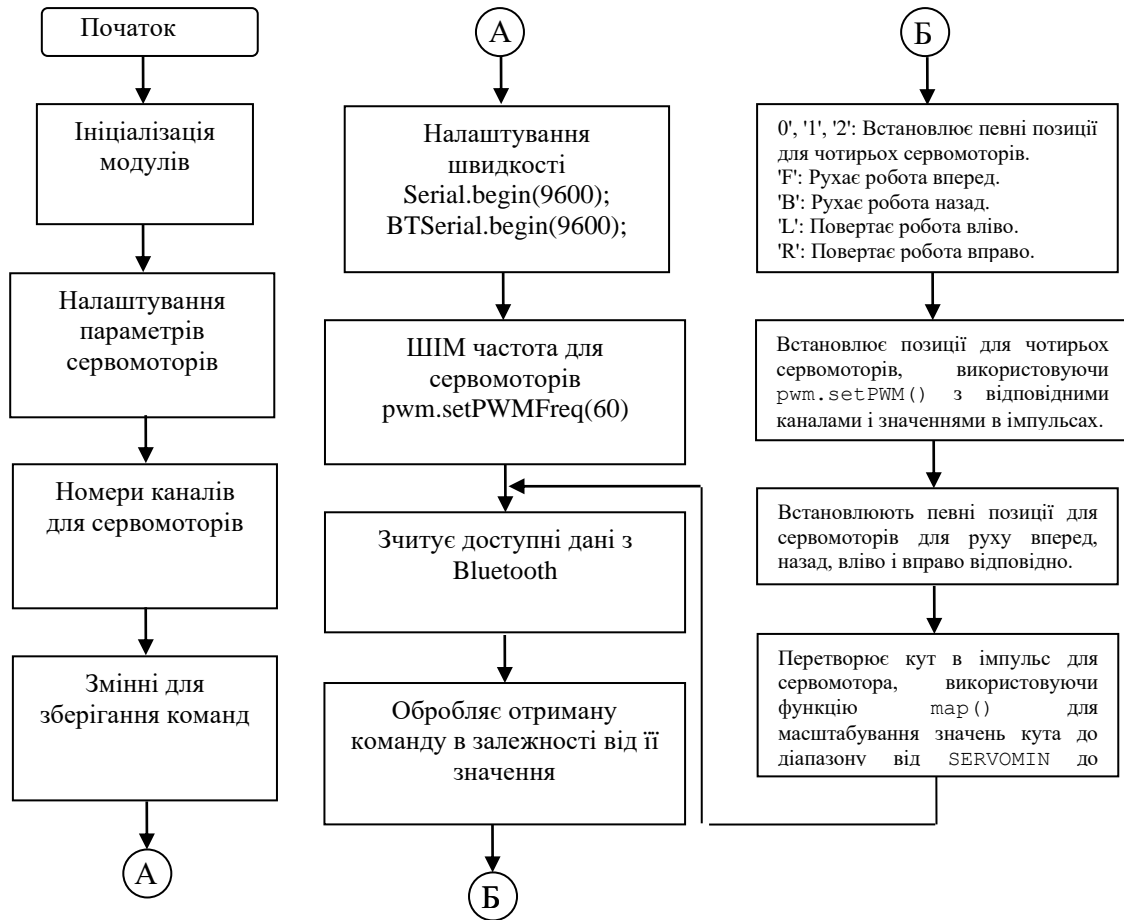


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм керування експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів для переміщення у важкодоступним місцях

Розроблений загальний алгоритм керування експериментального макету мобільного робота з комбінованою системою двигунів має кілька важливих переваг. По-перше, він забезпечує високу маневреність і точність руху, що особливо важливо для переміщення у важкодоступних місцях. По-друге, використання 8 сервомоторів MG995 дозволяє роботу адаптуватися до нерівних поверхонь, піднімаючи або прижимаючи корпус, що підвищує його стабільність. Крім того, бездротове керування через Bluetooth робить управління роботом зручним і ефективним на великих відстанях. Програмування на базі Arduino Nano V3 забезпечує гнучкість у налаштуванні алгоритму та його подальшому вдосконаленні. Це дозволяє легко інтегрувати

нові функції та розширювати можливості робота, роблячи його придатним для різних експериментальних і практичних завдань.

### 3.3 Програмна реалізація функцій керування мобільним роботом

Підключення бібліотек Wire, Adafruit\_PWMServoDriver і SoftwareSerial та ініціалізація об'єктів Adafruit\_PWMServoDriver для керування серводвигунами і SoftwareSerial для зчитування команд по Bluetooth.

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
```

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
// Ініціалізація модулів
```

```
Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();
```

```
SoftwareSerial BTSerial(2, 3); // RX, TX
```

// Налаштування параметрів сервомоторів. SERVOMIN та SERVOMAX встановлюють мінімальні та максимальні значення для використання серводвигунів. servoChannels містить номери каналів для керування серводвигунами на платі.

```
#define SERVOMIN 150 // Мінімальне значення для 0 градусів
```

```
#define SERVOMAX 600 // Максимальне значення для 180 градусів
```

```
// Номери каналів для сервомоторів
```

```
const int servoChannels[8] = {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7};
```

```
// Змінні для зберігання команд
```

```
char command;
```

Проводимо ініціалізацію UART для зчитування і запису через Bluetooth із швидкістю 9600 біт/с та ініціалізує об'єкт Adafruit\_PWMServoDriver і встановлює частоту PWM на 60 Гц. Виводимо повідомлення про ініціалізацію програми:

```
void setup() {
```

```

Serial.begin(9600);
BTSerial.begin(9600);
pwm.begin();
pwm.setPWMFreq(60); // ШИМ частота для сервомоторів
Serial.println("Bluetooth Remote Control for Mobile Robot Initialized");
}

```

Зчитує доступні дані з Bluetooth. Якщо дані доступні, читає команду і викликає функцію `handleCommand()` для обробки команди.

```

void loop() {
  if (BTSerial.available()) {
    command = BTSerial.read();
    handleCommand(command);
  }
}

```

Обробляє отриману команду в залежності від її значення:

- '0', '1', '2': Встановлює певні позиції для чотирьох сервомоторів;
- 'F': Рухає робота вперед;
- 'B': Рухає робота назад;
- 'L': Повертає робота вліво;
- 'R': Повертає робота вправо.

```

void handleCommand(char command) {
  switch (command) {
    case '0':
      setServoPositions(0, 90, 180, 90);
      break;
    case '1':
      setServoPositions(90, 0, 90, 180);
      break;
    case '2':

```

```
    setServoPositions(180, 90, 0, 90);  
    break;  
case 'F':  
    moveForward();  
    break;  
case 'B':  
    moveBackward();  
    break;  
case 'L':  
    turnLeft();  
    break;  
case 'R':  
    turnRight();  
    break;  
default:  
    Serial.println("Unknown command");  
    break;  
}  
}
```

Встановлює позиції для чотирьох серводвигунів, використовуючи `pwm.setPWM()` з відповідними каналами і значеннями в імпульсах.

```
void setServoPositions(int pos1, int pos2, int pos3, int pos4) {  
    pwm.setPWM(servoChannels[0], 0, degreeToPulse(pos1));  
    pwm.setPWM(servoChannels[1], 0, degreeToPulse(pos2));  
    pwm.setPWM(servoChannels[2], 0, degreeToPulse(pos3));  
    pwm.setPWM(servoChannels[3], 0, degreeToPulse(pos4));  
}
```

Встановлюють певні позиції для сервомоторів для руху вперед, назад, вліво і вправо відповідно.

```
void moveForward() {  
    pwm.setPWM(servoChannels[4], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[5], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[6], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[7], 0, SERVOMAX);  
}
```

```
void moveBackward() {  
    pwm.setPWM(servoChannels[4], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[5], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[6], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[7], 0, SERVOMIN);  
}
```

```
void turnLeft() {  
    pwm.setPWM(servoChannels[4], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[5], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[6], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[7], 0, SERVOMAX);  
}
```

```
void turnRight() {  
    pwm.setPWM(servoChannels[4], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[5], 0, SERVOMAX);  
    pwm.setPWM(servoChannels[6], 0, SERVOMIN);  
    pwm.setPWM(servoChannels[7], 0, SERVOMIN);  
}
```

Перетворює кут в імпульс для сервомотора, використовуючи функцію `map()` для масштабування значень кута до діапазону від `SERVOMIN` до `SERVOMAX`.

```
int degreeToPulse(int degree) {
    return map(degree, 0, 180, SERVOMIN, SERVOMAX);
}
```

Ця програма для керування мобільним роботом через Bluetooth має кілька переваг: простота інтеграції з використанням простих компонентів, гнучкість у керуванні рухом, можливість налаштування точності руху через сервомотори, зручність використання завдяки Bluetooth для бездротового зв'язку, і масштабованість для майбутнього розвитку та вдосконалення функціоналу.

### 3.4 Проведення експерименту та аналіз отриманих результатів

Мета експерименту: визначити ефективність та маневреність експериментального макету мобільного робота у важкодоступних місцях.

Матеріали та обладнання:

- експериментальний макет мобільного робота з комбінованою системою двигунів (8 сервомоторів MG995);
- платформа керування Arduino Nano V3;
- 16-канальний модуль PCA9685;
- модуль Bluetooth HC-06 для бездротового керування;
- складні поверхні та перешкоди (нерівні поверхні, вузькі проходи, різнорівневі платформи);
- віддалений пристрій для керування (смартфон або комп'ютер);
- вимірювальні інструменти (лінійка, секундомір);
- камера для фіксації руху робота.

#### Процедура експерименту:

- налаштуйте мобільного робота на стартовій позиції перед важкодоступною ділянкою з перешкодами;
- підключіть робота до віддаленого пристрою через Bluetooth і переконайтеся в правильності з'єднання;
- відправте команду на підйом корпусу робота для адаптації до нерівностей поверхні;
- запустіть робота і почніть фіксацію часу його руху через перешкоди;
- спостерігайте та записуйте його поведінку на різних ділянках траси, звертаючи увагу на маневреність і стабільність;
- повторіть експеримент кілька разів з різними умовами та перешкодами для отримання середніх результатів;
- виміряйте та запишіть час проходження траси, кількість зіткнень з перешкодами, і стабільність руху.

#### Очікувані результати:

- графік часу проходження траси, порівняння часу, витраченого на подолання різних ділянок траси з нерівностями і без них;
- графік кількості зіткнень з перешкодами, порівняння кількості зіткнень робота з перешкодами при різних налаштуваннях підйому корпусу;
- графік стабільності руху, порівняння стабільності руху робота при різних умовах, виражене через кількість необхідних корекцій для підтримки прямого руху;
- графік енергоспоживання, порівняння енергоспоживання робота при руху по рівній та нерівній поверхні для визначення ефективності використання енергії.

Графік кількості зіткнень з перешкодами, порівняння кількості зіткнень робота з перешкодами при різних налаштуваннях підйому корпусу, приведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Графік кількості зіткнень з перешкодами, порівняння кількості зіткнень робота з перешкодами при різних налаштуваннях підйому корпусу

Графік (рис. 3.2), який показує кількість зіткнень робота з перешкодами при різних налаштуваннях підйому корпусу. Графік порівнює кількість зіткнень при максимальному підйомі корпусу на 15 см та мінімальному підйомі на 3 см. Як видно з графіка, кількість зіткнень значно менша при максимальному підйомі, що свідчить про кращу маневреність і здатність долати перешкоди. Графік часу проходження траси, порівняння часу, витраченого на подолання різних ділянок траси з нерівностями і без них, переставлено на рисунку 3.3.

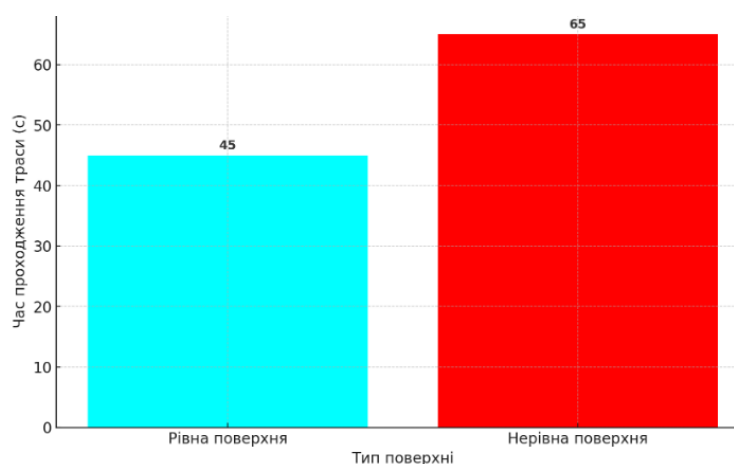


Рисунок 3.3 – Графік часу проходження траси, порівняння часу, витраченого на подолання різних ділянок траси з нерівностями і без них

Графік (рис. 3.3), який показує порівняння часу, витраченого на подолання різних ділянок траси з нерівностями і без них. Як видно з графіка, час проходження траси на нерівній поверхні значно більший порівняно з рівною поверхнею, що свідчить про вплив типу поверхні на ефективність руху робота.

Графік стабільності руху, порівняння стабільності руху робота при різних умовах, виражене через кількість необхідних корекцій для підтримки прямого руху, представлений на рисунку 3.4.

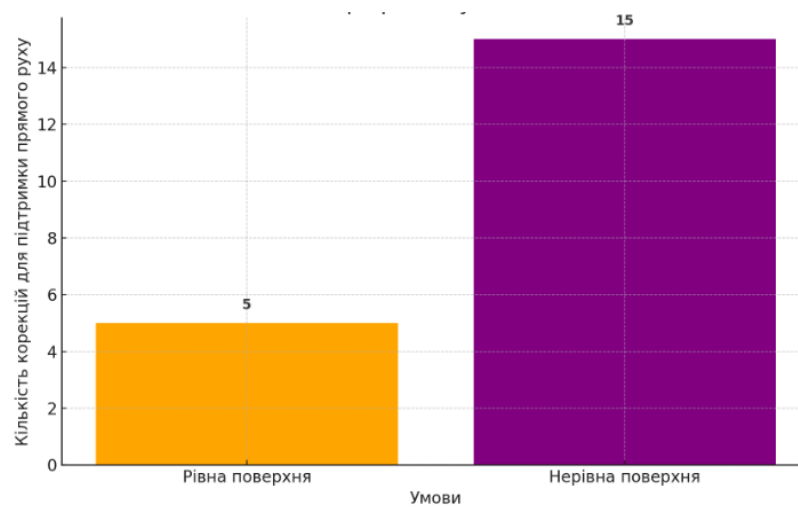


Рисунок 3.4 – Графік стабільності руху, порівняння стабільності руху робота при різних умовах

Графік (рис 3.4) показує порівняння стабільності руху робота при різних умовах, виражене через кількість необхідних корекцій для підтримки прямого руху. Як видно з графіка, на нерівній поверхні потрібно значно більше корекцій для підтримки прямого руху, ніж на рівній поверхні, що свідчить про вплив нерівностей на стабільність робота.

Графік енергоспоживання, порівняння енергоспоживання робота при руху по рівній та нерівній поверхні для визначення ефективності використання енергії, представлений на рисунку 3.5.

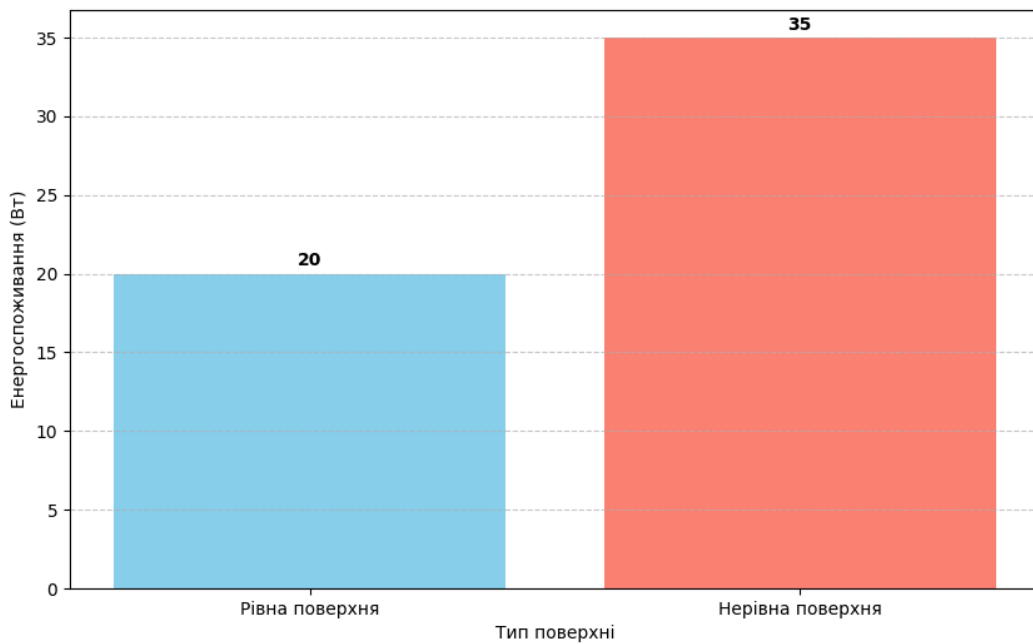


Рисунок 3.5 – Графік енергоспоживання, порівняння енергоспоживання робота при русі по рівній та нерівній поверхні для визначення ефективності використання енергії

На основі графіка енергоспоживання робота при русі по різних типах поверхні (рис. 3.5) можна зробити наступні висновки. По-перше, енергоспоживання робота значно вище при русі по нерівній поверхні порівняно з рівною поверхнею. Це свідчить про те, що нерівна поверхня створює додаткові навантаження на двигуни та інші компоненти робота, що призводить до збільшення витрат енергії. По-друге, підвищене енергоспоживання на нерівній поверхні може вплинути на тривалість роботи робота від одного заряду акумулятора. Це важливо враховувати при плануванні завдань для робота у важкодоступних місцях, де може бути необхідно оптимізувати маршрут або періодично підзаряджати акумулятор. Таким чином, для ефективного використання енергії та продовження тривалості роботи робота важливо враховувати тип поверхні, по якій він буде рухатись, і оптимізувати його рух для зменшення енергоспоживання.

### 3.5 Охорона праці

Одним із важливих аспектів охорони праці є забезпечення належного рівня освітленості в приміщеннях, де працюють люди. Недостатнє освітлення може призвести до зниження продуктивності праці, перевтоми, а також до виникнення очних захворювань, що безпосередньо впливають на здоров'я працівників. Для забезпечення комфортних умов роботи, необхідно правильно розраховувати рівень освітленості.

Для різних типів приміщень і робочих зон існують певні норми освітленості, що визначаються в люксах (лк). Наприклад, для загальних робочих зон – 300-500 лк, для робочих місць, що потребують підвищеної точності (наприклад, для роботи з точними приладами) – 1000-1500 лк, Для робочих місць із низькими вимогами до освітленості – 100-150 лк. Освітленість ( $E$ ) в точці на поверхні розраховується за допомогою наступної формули:

$$E = (I \cdot \cos\alpha) / d^2, \quad (3.1)$$

де  $E$  – освітленість (лк);

$I$  – сила світла джерела в канделах (кд);

$\alpha$  – кут падіння світла на поверхню;

$d$  – відстань від джерела світла до точки вимірювання освітленості (м).

Нехай необхідно розрахувати освітленість робочого місця в приміщенні, де встановлено світильник, що має силу світла 1200 кд, а відстань від світильника до робочого місця становить 5 м. Кут падіння світла  $\alpha=0^\circ$  (світло падає вертикально вниз). Далі підставимо числові значення до (3.1) та отримаємо:

$$E = (1200 \cdot \cos 0^\circ) / 5^2,$$

$$E = 1200 \cdot 1 / 25 = 48 \text{ лк.}$$

Це означає, що освітленість на робочому місці становить 48 лк. Оскільки для загальних робочих зон норма освітленості становить не менше 300 лк, в даному випадку необхідно збільшити кількість світильників або вибрати світильники з більшою силою світла, щоб забезпечити належний рівень освітленості.

Правильний розрахунок освітленості в робочих приміщеннях є критичним для забезпечення комфортних умов праці та збереження здоров'я працівників. У даному прикладі розрахунки показали, що освітленість на робочому місці недостатня, і для досягнення належного рівня освітленості необхідно використовувати більш потужні світильники або збільшити їх кількість [37-38].

### 3.6 Висновки до 3 розділу

В ході виконання третього розділу кваліфікаційної роботи було здійснено вибір середовища розробки та обґрунтовано застосування Arduino IDE для реалізації програмного забезпечення. Arduino IDE було обрано завдяки його простоті, зручності у використанні, а також широкій підтримці апаратних модулів, що дозволяє швидко інтегрувати компоненти, такі як Arduino Nano V3, серводвигуни MG995, модуль PCA9685 і Bluetooth модуль HC-06.

Розроблений алгоритм керування мобільним роботом забезпечує високу маневреність і точність руху, що дозволяє роботу адаптуватися до різних умов, зокрема до нерівних поверхонь та важкодоступних місць. Використання сервомоторів MG995 для підйому та маневрування робить систему більш стабільною, а бездротове керування через Bluetooth додає зручності в експлуатації. Програмна реалізація включає функції, які

дозволяють здійснювати рухи вперед, назад, а також повороти вліво і вправо, з налаштуванням точності руху завдяки сервомоторам. Програмне забезпечення, побудоване на платформі Arduino, забезпечує гнучкість налаштувань та можливість подальшого вдосконалення системи, що є важливим для практичного застосування робота в складних умовах.

У результаті проведених експериментальних досліджень було визначено ефективність та маневреність мобільного робота з комбінованою системою двигунів у складних умовах важкодоступних місць. Аналіз графіків показав, що при максимальному підйомі корпусу робота (15 см) кількість зіткнень з перешкодами значно зменшилась, що свідчить про кращу маневреність у складних умовах. Час проходження траси на нерівній поверхні виявився значно більшим порівняно з рівною, що вказує на вплив типу поверхні на ефективність руху робота. Для стабільності руху на нерівній поверхні потрібно більше корекцій для підтримки прямого руху, що вказує на необхідність більш точного управління роботом в таких умовах. Крім того, енергоспоживання робота на нерівній поверхні було значно вищим, що може впливати на тривалість роботи від одного заряду, що підкреслює важливість оптимізації маршруту та використання енергії для забезпечення ефективної роботи робота у важкодоступних місцях.

## ВИСНОВКИ

В ході написання кваліфікаційної роботи, в результаті проведеного аналізу класифікації мобільних роботів за типом рушіїв, а також огляду сучасних конструкцій мобільних роботів, були визначені основні типи рушіїв, що використовуються в різних моделях роботів. Це дозволило виокремити їхні переваги та недоліки для застосування в умовах важкодоступних місць, де традиційні системи руху не можуть забезпечити необхідну маневреність і стабільність. Також було проаналізовано сучасні тенденції розвитку мобільних роботів для складних умов, що дозволяє прогнозувати напрямки вдосконалення технологій у цій галузі та визначити необхідність розробки комбінованих рушіїв для покращення ефективності руху в таких середовищах.

На основі проведеного дослідження розроблено концепт комбінованої системи мобільного робота, що включає вибір апаратних модулів та виконавчих пристроїв для реалізації системи керування. Було досліджено стійкість системи, розроблено схему підключення та 3D моделі деталей мобільного робота. Також проведено 3D друк і створено експериментальний макет, що підтвердив працездатність концепту. Розробка загального алгоритму системи керування та програмна реалізація функцій управління дозволили провести експериментальні дослідження, що довели ефективність запропонованої системи в реальних умовах. Аналіз отриманих результатів показав високий рівень точності та надійності керування мобільним роботом в умовах складного середовища.

Отримані результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних

секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» [39].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennjavchenoiradi-universitetu.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennjavchenoiradi-universitetu.pdf).
3. 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, 2023. 49 с.
4. Єфімік Є. Розроблення концепт макету малогабаритного мобільного робота підвищеної прохідності / Є. Єфімік // Автоматизація та Приладобудування = Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2023) : збірник студентських наукових статей, 2023. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – С. 44-48.
5. Nodehi, S.E.; Bruzzone, L.; Fanghella, P. SnakeTrack, A Bio-inspired, Single Track Mobile Robot with Compliant Vertebral Column for Surveillance and Inspection. Mech. Mach. Sci. 2022, 120, 513–520.
6. Attar, H., & et al.. (2022). Control System Development and Implementation of a CNC Laser Engraver for Environmental Use with Remote

Imaging. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 9140156, <https://doi.org/10.1155/2022/9140156>.

7. Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.

8. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) PP. 61-64. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906.

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

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

11. Mykhailo Akopov, Svitlana Maksymova, & Vladyslav Yevsieiev. (2023). Choosing a Camera for 3D Mapping. Journal of Universal Science Research, 1(11), 28–38. Retrieved from <https://universalpublishings.com/index.php/jusr/article/view/2486>.

12. Nevliudov Igor, Maksymova Svitlana, Yevsieiev Vladyslav, & Klymenko Oleksandr. (2023). Using Mecanum Wheels for Radio Shuttle. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 182–187.

13. Yevsieiev V. Some aspects of the development of the BEAM robot control scheme / V. Yevsieiev // In IV International Scientific and Theoretical Conference, Singapore, Republic of Singapore. - P. 79-81.

14. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D.

Gurin // In the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. Chicago, USA. P.92-94.

15. Yevsieiev, V. ., & Gurin, D. . (2023). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BASIC METHODS USED IN INDUSTRY 4.0 AND INDUSTRY 5.0. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (September 29, 2023; Bologna, Italy), 113–115. <https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023.31>.

16. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Scientific Collection «InterConf», (140), P. 648-651.

17. Yevsieiev V. (2023) Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / Yevsieiev V., Starodubcev N. // Scientific Collection «InterConf», (141), P. 331-334.

18. A Small-Scale Manipulation Robot a Laboratory Layout Development / Yevsieiev V., Starodubcev N., Maksymova S., Stetsenko K. // International independent scientific journal, №47, 2023. P.18-28.

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

20. Nevliudov, I., & et al. (2022). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), IEEE, 61-64.

21. P. Beresnev, A. Kurkin, A. Kuzin, A. Myakinkov, E. Pelinovsky, A. Ryndyk, S. Shabalin. (2020) Journal of Tsunami Society International. Volume 39, Number 3. ISSN 8755-6839.

22. Bruzzone, Luca, Shahab Edin Nodehi, and Pietro Fanghella. 2022. "Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review" *Machines* 10, no. 8: 648. <https://doi.org/10.3390/machines10080648>.
23. Sun, Z.; Yang, H.; Ma, Y.; Wang, X.; Mo, Y.; Li, H.; Jiang, Z. BIT-DMR: A Humanoid Dual-Arm Mobile Robot for Complex Rescue Operations. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2022, 7, 802–809.
24. Nagatani, K.; Kiribayashi, S.; Okada, Y.; Tadokoro, S.; Nishimura, T.; Yoshida, T. Redesign of Rescue Mobile Robot Quince—Toward Emergency Response to the Nuclear Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011. In *Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Kyoto, Japan, 1–5 November 2011; pp. 13–18.
25. ESP32-CAM // Arduino.ua, 2024. URL: [https://arduino.ua/prod3458-modylwifiesp32skameri2mp?srsltid=AfmBOorVuwrh1zNvrS68C0fjJTFAUFIF0cLMt-Zub\\_vKVodyh6wy3DR3](https://arduino.ua/prod3458-modylwifiesp32skameri2mp?srsltid=AfmBOorVuwrh1zNvrS68C0fjJTFAUFIF0cLMt-Zub_vKVodyh6wy3DR3) (дата звернення: 07.11.2024).
26. ESP 8266 // Arduino.ua, 2024. URL: <https://arduino.ua/ru/cat122-esp8266?srsltid=AfmBOopdKoeHZ965dKgCuAvLnKB1ZsKXZvQ47sd791XDGDMbNH2J8a0o> (дата звернення: 07.11.2024).
27. Arduino Nano V3 microUSB // Arduino.ua, 2024. URL: <https://arduino.ua/ru/prod2432arduinonanov3atmega328ch340gneraspayannayami crousbotrobotdyn?srsltid=AfmBOoqlLPknPfGHQke5BJdfsHPljmaHl2jAQexE7bq95yuURcnZjDZ0> (дата звернення: 07.11.2024).
28. 16-канальный 12-bit PWM/Servo модуль с I2C интерфейсом на PCA9685 // Arduino.ua, 2024. URL: [https://arduino.ua/ru/prod1442-16-kanalnii-12bitpwmservomodylsi2cinterfeisomnapca9685?srsltid=AfmBOor7otc7Q\\_xu0DW2q7nDdAfz3rBomxrzveByb1BAF11LPwNDbfwQ](https://arduino.ua/ru/prod1442-16-kanalnii-12bitpwmservomodylsi2cinterfeisomnapca9685?srsltid=AfmBOor7otc7Q_xu0DW2q7nDdAfz3rBomxrzveByb1BAF11LPwNDbfwQ) (дата звернення: 08.11.2024).
29. Interfacing PCA9685 16 Channel 12-bit PWM/Servo Driver with Arduino // Electropeak, 2024. URL: <https://electropeak.com/learn/interfacing-pca9685-16-channel-12-bit-pwm-servo-driver-with-arduino/> (дата звернення: 08.11.2024).

30. MG995 Tower Pro 360° // Arduino.ua, 2024. URL: [https://arduino.ua/ru/prod5605servoprivodtowerpromg995360?srsltid=AfmBOoqS lh40zEO9c\\_WmYjpVT7e1nQGs\\_PHdnHwyGuNIIUi6P5V22LUm](https://arduino.ua/ru/prod5605servoprivodtowerpromg995360?srsltid=AfmBOoqS lh40zEO9c_WmYjpVT7e1nQGs_PHdnHwyGuNIIUi6P5V22LUm) (дата звернення: 09.11.2024).

31. Futaba 3003 // Arduino.ua, 2024. URL: <https://arduino.ua/ru/prod668-servoprivod-futaba-s3003?srsltid=AfmBOorbjK6EG1p-E-lEhGArnG05u85em-Y-7Oy13zg0allICoghbflli> (дата звернення: 09.11.2024).

32. Модуль Bluetooth HC-06 // Arduino.ua, 2024. URL: [https://arduino.ua/ru/prod241bluetoothmodylhc06?srsltid=AfmBOorxgWjhJ7JOO dUUnC0h\\_ku6VAzgXuCsqLabmz1vxER\\_nvFqw8u](https://arduino.ua/ru/prod241bluetoothmodylhc06?srsltid=AfmBOorxgWjhJ7JOO dUUnC0h_ku6VAzgXuCsqLabmz1vxER_nvFqw8u) (дата звернення: 10.11.2024).

33. Модуль Bluetooth HC-08 // Arduino.ua, 2024. URL: <https://arduino.ua/ru/prod1595-bluetooth-hc-08?srsltid=AfmBOooriPr2ARI3h4-fXhvUe3ADUSCBKPMwz0Z9rLh6Et17QYuuNF> (дата звернення: 10.11.2024).

34. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

35. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(10), 7465-7473.

36. Arduino IDE // Arduino.cc, 2024. URL: <https://www.arduino.cc/en/software> (дата звернення: 22.11.2024).

37. Охорона праці на виробництві // Сайт GCC, 2024. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-pracivofisivimogidorobochogomiscyaofisnogopracivnika/> (дата звернення: 06.12.2024).

38. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О.

Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. – 332 с.

39. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // Diia business, 2024. URL: [https://business.diia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil\\_9\\_promislovist\\_innovaciyi\\_ta\\_infrastruktura](https://business.diia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura) (дата звернення: 13.12.2024).