

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет систем управління літальних апаратів

Кафедра систем управління літальних апаратів

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

(освітній ступінь)

на тему «Дослідження системи управління рухом колісного робота на базі Raspberry Pi Compute Module у середовищі з перешкодами»

ХАІ.301.361.22О.272.00183015 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, групи 361

Галузь знань 27 «Транспорт»

Спеціальність

272 “Авіаційний транспорт”

Освітня програма

«Інтелектуальні транспортні системи»

Онопрієнко С.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник Дергачов К.Ю.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кочура В.О.

(прізвище та ініціали)

Харків – 2022

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет систем управління літальних апаратів

Кафедра систем управління літальних апаратів (301)

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 27 “Транспорт”

Спеціальність 272 “Авіаційний транспорт”

Освітня програма «Інтелектуальні транспортні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доц _____ К. Ю. Дергачов

“ _____ ” _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Онопрієнка Сергія Ігоровича _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Дослідження системи управління рухом колісного робота на базі Raspberry Pi Compute Module у середовищі з перешкодами»

керівник кваліфікаційної роботи к. т. н., доцент Дергачов Костянтин Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 17.11. 2022 року № 1602-уч

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи: 9 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: математична модель колісного робота, вимоги до функціонування системи, збурювальні впливи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Вступ, оцінка стану проблеми управління колісними роботами, опис об'єкту автоматичного управління, математичний опис об'єкту автоматичного управління, синтез системи автоматичного позиціонування, конструкторська частина, розробка технологічного процесу, експериментальна частина, економічна частина, заключення, список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу 10 плакатів : загальний опис колісного робота, вибір виконавчого та вимірювального приладів, математичний опис об'єкта управління, дослідження об'єкту управління, формування пристрою автоматичного управління, конструкторська частина, рух роботизованого комплексу, технологічна і експериментальна частини.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стан проблеми	Дергачов К.Ю.	19.09.2022	9.12.2022
Аналіз і синтез СУ	Дергачов К.Ю.	19.09.2022	9.12.2022
Конструктор. частина	Джуглаков В.Г.	19.09.2022	9.12.2022
Технологічна частина	Дергачов К.Ю.	19.09.2022	9.12.2022
Експ.-практ. частина	Дергачов К.Ю.	19.09.2022	9.12.2022
Економічне обґрунтування	Попов. О.С.	19.09.2022	9.12.2022

Нормоконтроль _____ к.т.н., доц., Дергачов К.Ю. 16.02.2022 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання _____ 19.09.2022 _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Початок переддипломної практики	12.09.2022	
2.	Формулювання теми роботи. Розробка технічного завдання	19.09.2022	
3.	Математичний опис системи управління. Аналіз і синтез системи управління. Проведення експериментальних досліджень	28.10.2022	Залік з переддипломної практики
4.	Конструкторська частина роботи. Дослідницька частина роботи. Експериментально-практична частина. Економічне обґрунтування розробки. Розробка питань охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях	28.11.2022	
5.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки і графічного матеріалу	09.12.2022	
6.	Попередній захист роботи. Рецензування роботи	16.12.2022	
7.	Захист роботи	19.12.2022	

Студент _____ Онопрієнко С.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Дергачов К.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
к. т. н., доцент

_____ К. Ю. Дергачов

« » _____ 2022 г.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Онопрієнка Сергія Ігоровича
(П.І.Б.)

1. Тема роботи: «Дослідження системи управління рухом колісного робота на базі Raspberry Pi Compute Module у середовищі з перешкодами»
затверджена наказом по університету від 17.11.2022 р., № 1602-уч.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи «9» грудня 2022 р.
3. Область застосування розробки: системи керування колісними роботам
4. Початкові дані для об'єкта управління
 - 4.1. Початкова математична модель об'єкта управління (див. додаток до технічного завдання)
 - 4.2. Збурювальні впливи: Момент створюваний при повороті колісним роботом
5. Технічні вимоги до системи управління
 - 5.1. Питання, що підлягають розробці
 - 5.1.1 В розрахунковій частині: виведення лінеаризованої математичної моделі об'єкта позиціонування, вибір виконавчого та вимірювального пристроїв, розробка функціональної і структурної схем системи автоматичного позиціонування, вибір типового закону управління, синтез пристрою автоматичної стабілізації та аналіз якості управління.
 - 5.1.2 В конструкторській частині: Опис усіх використовуваних компонентів у роботі
 - 5.1.3 В експериментальній частині: моделювання на реальному прототипі, оцінка отриманих результатів
 - 5.2. Режими роботи системи управління (автоматичний, напівавтоматичний, ручний, налагоджувальний і т. і.) напівавтоматичний
 - 5.3. Показники якості роботи системи: допустима стала помилка ($\varepsilon = 5\%$), час перехідного процесу ($t_{\text{пн}} < 1$ секунд), перерегулювання ($\sigma < 20\%$), запаси стійкості по фазі ($\varphi > 40$ градусів) та по амплітуді ($L_3 > 10$ дБ).
 - 5.4. Вимоги до приладового складу системи: Raspberry Pi Compute Module 4 32/4Gb, три6050, Raspberry Pi Cam (2 штуки), аккумулятори типорозміру 18650, BMS 2S
 - 5.5. Вимоги до взаємозамінності блоків: усі елементи конструкції повинні бути легкозамінними

6. Умови експлуатації системи.

6.1. Кліматичні умови (температура середовища, в якому буде працювати система управління, вологість середовища, ступінь запиленості, вміст хімічно активних компонентів і т. і.): температура 0°C..+57°C; вологість не більше 73%; ступінь запиленості 0.15 мг/м³, хімічно активні компоненти відсутні

6.2. Механічні вимоги (вібрація, тряска, можливі перекося, удари, нахили) можливі невеликі вібрація, удари, тряска

6.3. Наявність перешкод (електричні наводки, радіоперешкоди, магнітні впливи): штучні та природні перешкоди

6.4. Електричні параметри системи (напруга джерел живлення, потужність, стабільність, частота): акумулятори з максимальною напругою 4.15В та з током 2А, для стабільної роботи комплексу

6.5. Характер роботи системи (неперервний, циклічний, одноразової дії) безперервний

7. Додаткові функції, що реалізуються системою управління (сигналізація про несправності, реєстрація необхідної інформації, самоконтроль і т. і.): запис відеозображення на вбудовану пам'ять комп'ютера та вивід інформації у вигляді текстового документу

8. Обсяг робіт, що виконуються розробником

8.1. Етапи виконання роботи 1-й етап - Вербальний та математичний опис об'єкту управління. 2-й етап - Розрахунок системи позиціонування. 3-й етап - Експериментальне дослідження САП.

8.2. Обсяг розробки за кожним етапом :

1) Стан проблеми і постановка задачі проектування (2 ст)

2) Опис ОАУ (8 ст)

3) Математичний опис ОАУ (15 ст)

4) Синтез САП (9 ст)

5) Конструкторська частина (25 ст)

6) Розробка технологічного процесу (9 ст)

7) Експериментальна частина (5 ст)

8) Економічна частина (8 ст)

9. Параметри обладнання системи

9.1. Габарити: розміри визначаються у процесі проектування

9.2. Маса: визначається згідно використовуємих компонентів у процесі проектування

9.3. Вимоги до конструктивного виконання і розміщенню: визначаються у процесі проектування

9.4. Інші вимоги: не передбачаються

10. Вимоги безпеки: визначаються у процесі проектування

11. Технологічна частина

11.1. Розробка технологічного процесу: розробка технології монтажу контролера з периферійним обладнанням

11.2. Умови і вимоги: технологія перевірки апаратних засобів

11.3. Очікуваний результат: створення повністю працездатного та повнофункціонального роботу

12. Економічна частина

12.1. Розробити (розрахувати, отримати): розрахувати собівартість розробленої системи позиціонування

12.2. Умови і вимоги: одиничне виробництво, розрахунок проводиться за статтями калькуляції

12.3. Очікуваний результат: повна собівартість виробу грн. з урахуванням усіх витрат

13. Перелік графічних матеріалів та їх формат 10 плакатів : загальний опис колісного робота, вибір виконавчого та вимірювального приладів, математичний опис об'єкта управління, дослідження об'єкту управління, формування пристрою автоматичного управління, конструкторська частина, рух роботизованого комплексу, технологічна і експериментальна частини.

14. Мова підготовки пояснювальної записки (захисту) українська

Керівник роботи

Дергачов Костянтин Юрійович
(П. І. Б.)

« »
_____ 2022 р.

Прийняв до виконання

Онопрієнко Сергій Ігорович
(П. І. Б. студента)

« »
_____ 2022 г.

Узгоджено за питаннями:

конструкції

доц. Джулгаков В.Г.
(П. І. Б.)

« » _____ 2022 г.

технології

к.т.н., доц. Дергачов К.Ю.
(П. І. Б.)

« » _____ 2022 г.

економіки

доц. Попов О.С.
(П. І. Б.)

« » _____ 2022 г.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 107 ст. 55 рис. 16 табл. 2 додатків, 19 джерела.

Тема роботи: дослідження системи управління рухом колісного робота на базі Raspberry Pi Compute Module у середовищі з перешкодами

Мета роботи: дослідження системи управління рухом колісного робота на базі Raspberry Pi Compute Module у середовищі з перешкодами

Предмет роботи: система управління колісним роботом, яка дозволяє визначати дальність до перешкод та безпроблемно обходити перешкоди на шляху.

Унаслідок виконання дипломної роботи є розроблена система керування яка була перевірена у програмному забезпеченні Simulink. А також спроектована модель колісного робота та реалізована система об'їзду перешкоди,

МОБІЛЬНИЙ РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС, RASPBERRY PI COMPUTE MODULE, RASPBERRY IO BOARD, RASPBERRY PI CAMERA, ДРАЙВЕР ТВ6612FNG, ВСЕСПРЯМОВАНІ КОЛЕСА, ДВИГУНИ, КОРПУС, АКУМУЛЯТОР, BATTERY MANAGER SYSTEM.

АНОТАЦІЯ

Основною ціллю і метою магістерської роботи є розробка системи управління колісного робота на Raspberry Compute Module 4 та Raspberry IO Board системами технічного зору. Задачею проекту являється формування системи управління колісного робота, здатного практично безпомилково виконувати свою роботу. Для перевірки отриманої системи керування був створений макет колісного робота, на якому і проведені дослідження поведінки робота.

Для реалізації проекту виконані наступні етапи:

1. Створений повноцінний макет з повним набором датчиків, виконавчих механізмів та контролера.
2. Створена система керування колісним роботом для об'їзду перешкоди.

У першому розділі розглянуті: стан проблеми проблеми управління колісним роботом, проведений патентний пошук реалізації розробки системи управління колісного робота для об'їзду перешкод.

У другому розділі проведено описання характеристик колісного робота та представлений його зовнішній вигляд.

У третьому розділі розглянута математична модель руху колісного робота.

У четвертому розділі проведений проведений розрахунки для формування пристрою автоматичного керування

У конструкторській частині розглянуті конструкція, з яких елементів складається та алгоритмі для керування рухом колісного робота.

У експериментальній частині розглянуті результати даних отриманих за датчиків, та камери, використовуючи алгоритми розпізнання об'єктів у реальному часі.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ПК	- Персональний Комп'ютер
МЕМС	- Мікроелектромеханічні системи
ОУ	- Об'єкт Управління
ІО	- Input / Output порти
САП	- Система Автоматичного Позиціонування
ЛАЧХ	- Логарифмічна частотна характеристика
ШІМ	- Широтно-імпульсна модуляція
ПФ	- Передаточна функція
КЕ	- Корируючий елемент
СК	- Система координат
BMS	- Battery Manager System
ІО	- Input/Output

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	10
ВСТУП.....	13
1 ОЦІНКА СТАНУ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНИМИ РОБОТАМИ.....	14
1.1 Оцінка стану проблеми.....	14
1.2 Патентний пошук.....	14
1.3 Визначення цілі проектування.....	15
2. ОПИС ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	16
2.1 Зовнішній вигляд ОУ.....	16
2.2. Формування функціональної схеми об'єкта управління.....	19
2.3. Висновки.....	23
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	24
3.1 Розробка нелінійної математичної моделі.....	24
3.2 Побудова лінеаризованої математичної моделі руху роботизованого комплексу.....	27
3.3 Знаходження передавальних функцій.....	34
3.3 Формування структурної схеми САП.....	35
3.4 Машинне моделювання об'єкта автоматичного управління.....	36
3.5 Висновки.....	38
4 ФОРМУВАННЯ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	39
4.1 Дослідження характеристик САП.....	39
4.2 Статичний розрахунок САП.....	40
4.3 Синтез коригуючого елемента.....	41
4.4 Дослідження системи з введеним коригуючим елементом.....	43
4.4 Синтез цифрового регулятора скорегованої САП.....	45
4.5 Висновки.....	47

	11
5 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	48
5.1 Опис основного контролера та сигналів.....	48
5.2 Raspberry Pi Compute Module 4.....	49
5.3 Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board.....	51
5.4 Корпус роботизованого комплексу.....	53
5.5 Драйвер TB6612FNG.....	56
5.6 Датчик акселерометру і гіроскопу MPU6050.....	58
5.7 Камера Raspberry Pi Cam v1.3.....	59
5.8 Електродвигуни.....	62
5.9 Всеспрямовані колеса.....	63
5.10 Система живлення.....	65
5.11 Загальна схема колісного робота.....	69
5.12 Висновки.....	71
6 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	72
6.1 Перевірка Raspberry Pi Compute Module 4 та IO Board.....	72
6.2 Перевірка датчиків акселерометра і гіроскопа.....	76
6.3 Перевірка драйверу TB6612FNG.....	77
6.4 Перевірка камер Raspberry Pi Camera v1.3.....	79
6.5 Висновки.....	80
7 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	81
7.1 Задача експериментальних досліджень.....	81
7.2 Розробка програмного забезпечення для визначення кута повороту роботизованого комплексу.....	81
7.3 Калібрування стереопари та побудова карти глибини.....	82
7.4 Результат дослідження реального прототипу.....	84
7.6 Висновки.....	85
8 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	86
8.1 Основні поняття і положення.....	86
8.2 Опис виробу.....	86

	12
8.3 Сегментування ринку	86
8.4 Розрахунок собівартості і ціни розробки системи.....	87
8.5 Розрахунок точки беззбитковості.....	92
8.6 Висновки	93
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
ДОДАТОК А.....	98
ДОДАТОК Б	101

ВСТУП

У сучасному світі людство все частіше автоматизує усі завдання, які раніше виконувались працею людини, і це можливо завдяки роботам. Спочатку автоматизувувались найпростіші процеси, з часом це переросло в автоматизацію практично всього, оскільки завдяки цьому збільшується продуктивність (від монотонної роботи з часом у робітника збільшується кількість похибок та зменшується продуктивність праці, а роботизовані системи цих недоліків не мають) і покращуються умови роботи працівника. Саме по цій причині автономні роботи будуть поширювати свій вплив та зменшувати кількість робочих задля виконання однакової роботи. Із-за чого кінцева вартість продукту буде меншою (немає необхідності платити заробітну плату, кількість виконаної роботи за день зазвичай буде більшою).

Актуальність даної теми зумовлена тим, що практично усі варіанти допускають похибки під час своєї роботи, мають короткий час роботи (що дає невеликий запас ходу), та високу ціну кінцевого продукту.

Об'єктом дослідження у даній роботі являється комплекс, який базується на колісній базі з використанням одного з найпоширеніший варіантів апаратної платформи з можливістю використовувати технічний зір – Raspberry. Розроблений комплекс повинен виконувати наступні вимоги і задачі:

- Розрахунок та визначення дальності до перешкоди, використовуючи підготовлені камери та алгоритми;
- Легка заміність більшості компонентів у разі їх поломки;
- Тривала автономність робота, завдяки якій роботизований комплекс спосібний долати великі відстані;
- Відсутність проблем під час роботи.

1 ОЦІНКА СТАНУ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНИМИ РОБОТАМИ

1.1 Оцінка стану проблеми

Сучасний світ важко уявити без застосування мобільних роботів, оскільки завдяки їх перевагам вони практично витіснили людську працю у багатьох галузях. Крім того, що використовувати мобільних роботів вигідніше з боку оплати за одиницю праці, роботи часто можуть виконувати ті операції, які неспроможні виконуватись людиною із-за особливостей організму. Крім виконання доволі простих монотонних робіт, мобільні роботи спосібні замінити людей на небезпечних роботах, таких як: військовий, сапер, пожежник. Це стає можливим, завдяки використанню сучасних технологій, такими як ідентифікація об'єктів та побудові карти глибини на основі технічного зору.

В основні проектування мобільного робота треба звертати увагу на ті умови, в яких буде працювати цей самий робот. При критично низьких температурах необхідно обігрівати елементи живлення, оскільки при низьких температурах вони спосібні вийти з ладу.

Також слід відмітити необхідність застосування сучасних методів навігації колісних роботів для побудови маршруту. Але для початку необхідні певні дані, щоб робот міг побудувати маршрут руху. У якості саме цих даних може виступати камера (або камери, якщо мова йде про використання стереопари), яка отримує інформацію із зовнішнього світу. Завдяки саме використанню стереопари є можливість достатньо точно вимірювати відстань до перешкоди та побудувати карту глибини. Карта глибини містить у собі усю інформацію о відстані до об'єкту.

1.2 Патентний пошук

Саме у теперішній момент розвитку науки є величезна кількість роботизованих транспортних засобів з розробленою системою керування при об'їзді перешкод. Саме для виявлення схожих проектів проведений розгляд на подібні комплекси, які представлені у додатку А.

1.3 Визначення цілі проектування

Задачею даної роботи є розробка системи управління колісного робота, здатного автоматично ідентифікувати перешкоду, відстань до неї та будувати маршрут для уникнення перешкоди, по заданому алгоритму, з усіх даних відомих даних, отриманих з датчиків. Для реалізації даної задачі, необхідно, щоб об'єкт дослідження мав наступні значення показників якості:

- Час перехідного процесу ($t_{\text{пп}}$) $\leq 1.2\text{с}$;
- Перерегулювання (σ) $\leq 15\%$;
- Стала похибка ($\epsilon_{\text{СТ}}$) $\leq 0.25\text{В}$;
- Запас стійкості за фазою (φ_3) $\geq 35^\circ$;
- Запас стійкості за амплітудою (L_3) ≥ 30 дБ.

Розроблений комплекс нормально функціонує при температурі зовнішнього середовища $0\dots 50$ °C і вологістю до 65%. Більша температура може призвести до швидшого виходу зі строю акумуляторів, бо збільшить їх деградацію, що негативно відобразиться на тривалості роботи комплексу (відповідно і на дальності ходу).

2. ОПИС ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

2.1 Вербальний опис об'єкта керування

Об'єктом управління у дипломній роботі є колісний роботизований комплекс, який базується на Raspberry Pi Compute Module, встановленого на IO Board. Робот повинен ідентифікувати перешкоду, провести визначення відстані до об'єкту перешкоди, завдяки алгоритмам та стереопарі, після чого будується маршрут об'їзду перешкоди.

Колісний робот, який фігурує у даній роботі, складається з наступних компонентів:

1. Raspberry Compute Module 4;
2. Плата-розширення Raspberry IO Board;
3. Дві камери Raspberry Pi Camera;
4. Модуль MPU6050;
5. Два драйвера TB6612FNG;
6. Чотири двигуна постійного струму 4WD;
7. Чотири всепрямованих колес;
8. Battery Manager System 2S;
9. Два акумулятори типорозміру 18650;

Зовнішній вигляд комплексу представлено на рисунках 2.1 – 2.3.

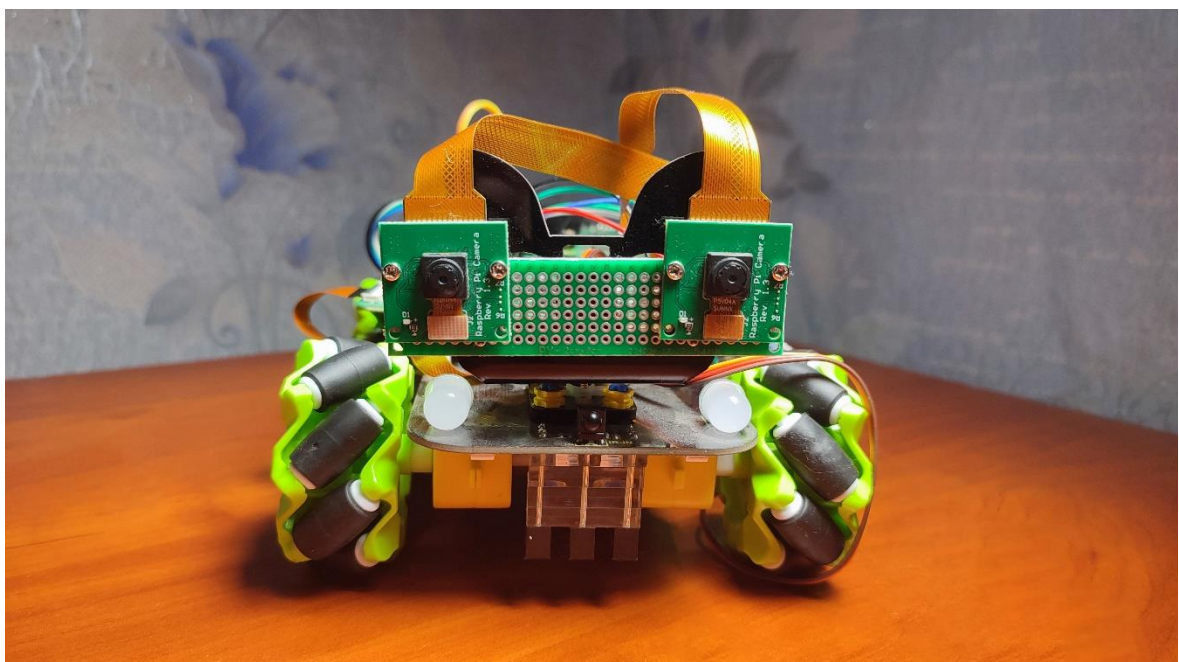


Рисунок 2.1 – Вид спереду мобільного комплексу

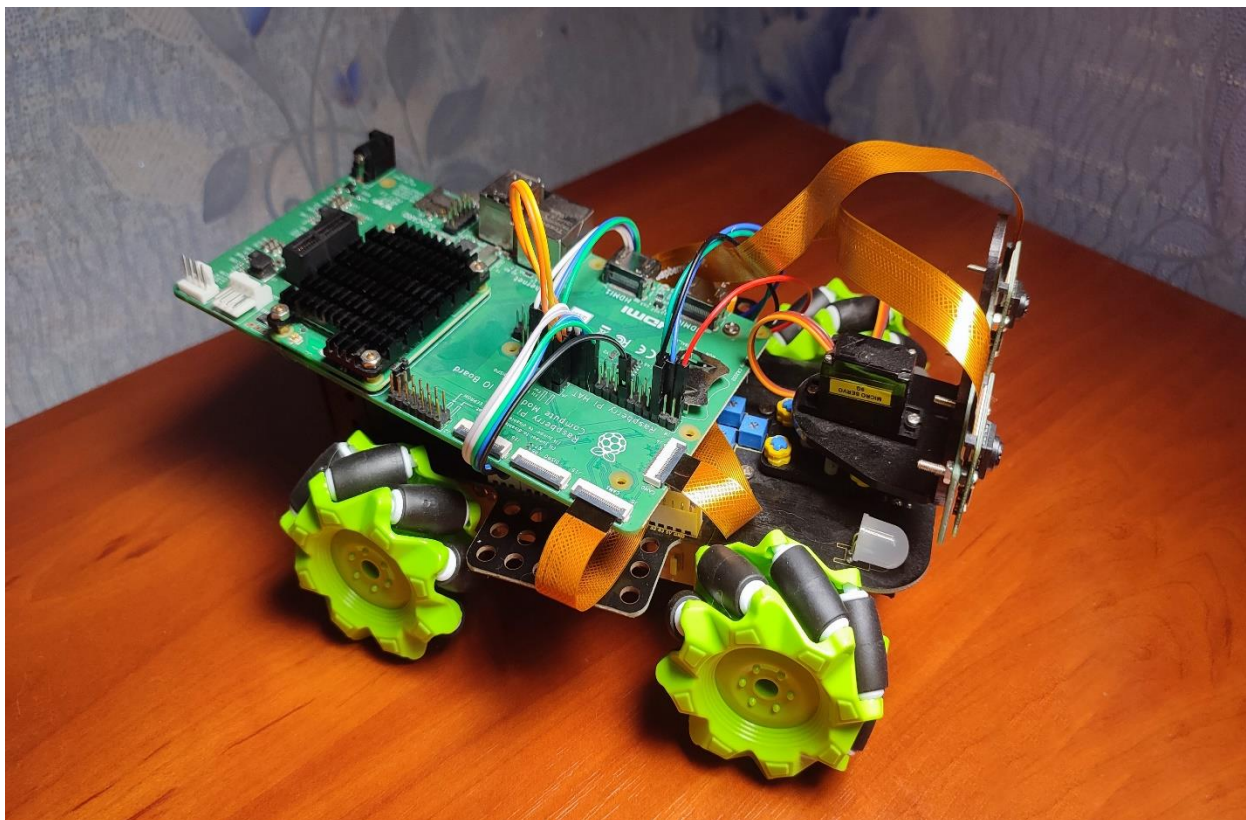


Рисунок 2.2 – Вид збоку мобільного комплексу

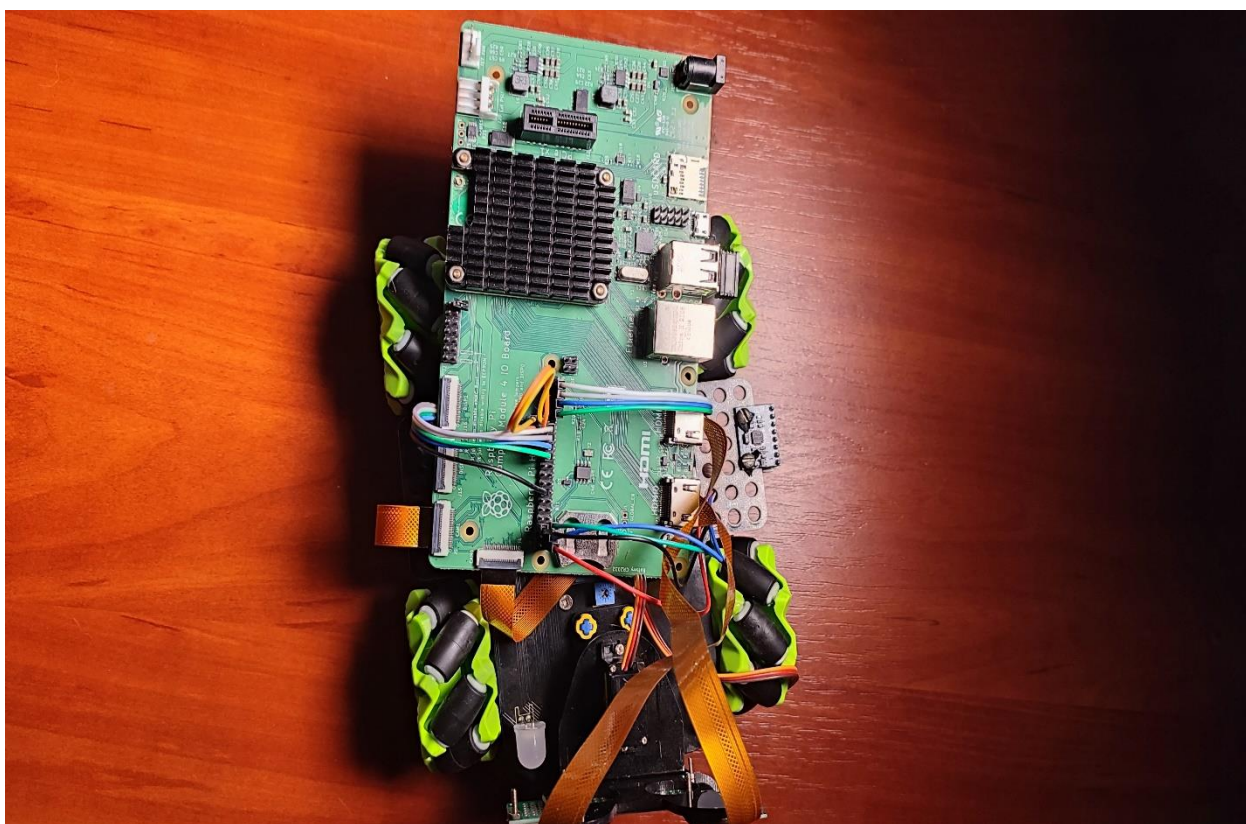


Рисунок 2.3 – Вид зверху мобільного комплексу

Виконавчими пристроями комплексу являються двигуни постійного струму з вбудованими редукторами. Саме завдяки вбудованим редукторам у кожен двигун (передаточне число 1:48) має достатній крутний момент, що позитивно відобразиться при перетині різних типів поверхонь. Також вибір пав на ці двигуни, оскільки деякі компоненти робота, особливо елементи живлення, якими виступають акумулятори типорозміру 18650, мають достатньо велику вагу і високий крутний момент тут грає одну з вирішальних ролей. Загальна потужність двигунів досить велика, тому зі швидкістю пересування також проблем не має. Даний комплекс може розвивати швидкість, яка повністю буде задовольняти потреби, які були вказані у роботі.

Комплекс приводиться у рух сигналами управління, які поступають с основного комп'ютера. Між комп'ютером і двигуном установлюється драйвер TB6612FNG, який збільшує струм живлення, забезпечуючи нормальну роботу двигунів, компенсуючи невеликий струм, який виходить з контакту на комп'ютері. До кожного драйвера підключається по 2 двигуни. У двигунів є два контакти, і подача струму на один з них буде відповідати у яку сторону двигун буде обертатись (по часовій чи проти). Саме цей принцип керування необхідний при використанні всеспрямованих колес. Живлення усіх компонентів, як і самого комп'ютера надходить від акумуляторів. Оскільки вихідна напруга на акумуляторах складає від 7.4 до 8.4В, необхідний перетворювач напруги, який видає стабільні 5В. Дана напруга (5В) живить усі компоненти: двигуни, комп'ютер та датчики.

Компоненти, які використовуються для створення мобільного колісного робота представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Компоненти для побудови колісного робота

№ п/п	Елемент	Кількість, шт
1	Raspberry Pi Compute Module	1
2	Raspberry IO Module	1
3	Raspberry Pi Camera	2
4	Акумулятор NCR 18650B	2
5	Драйвер TB6612FNG	2
6	BMS 2S	1
7	DC – DC перетворювач	1

Продовження таблиці 2.1 – Компоненти для побудови колісного робота

№ п/п	Елемент	Кількість, шт
8	MPU6050	1
9	Порт для зарядки DC2250	1
10	Двигуни постійного струму	4
11	Всеспрямовані колеса	4

2.2. Формування функціональної схеми об'єкта управління

У функціональній схемі об'єкта управління зазначені основні зв'язки усіх компонентів: стереопара дає відомості про дальність до перешкоди, комп'ютер Raspberry на основі цих даних будує маршрут для об'їзду перешкоди і подає сигнали на виконавчі пристрої – двигуни. Оскільки порт може віддати лише до 50 мА, між двигуном і портом ставиться підсилювач потужності – драйвер TB6612FNG, далі датчик акселерометра і гіроскопа отримує значення кута повороту і передає ці дані основному комп'ютеру. Функціональна схема об'єкта управління представлено на рисунку 2.4.

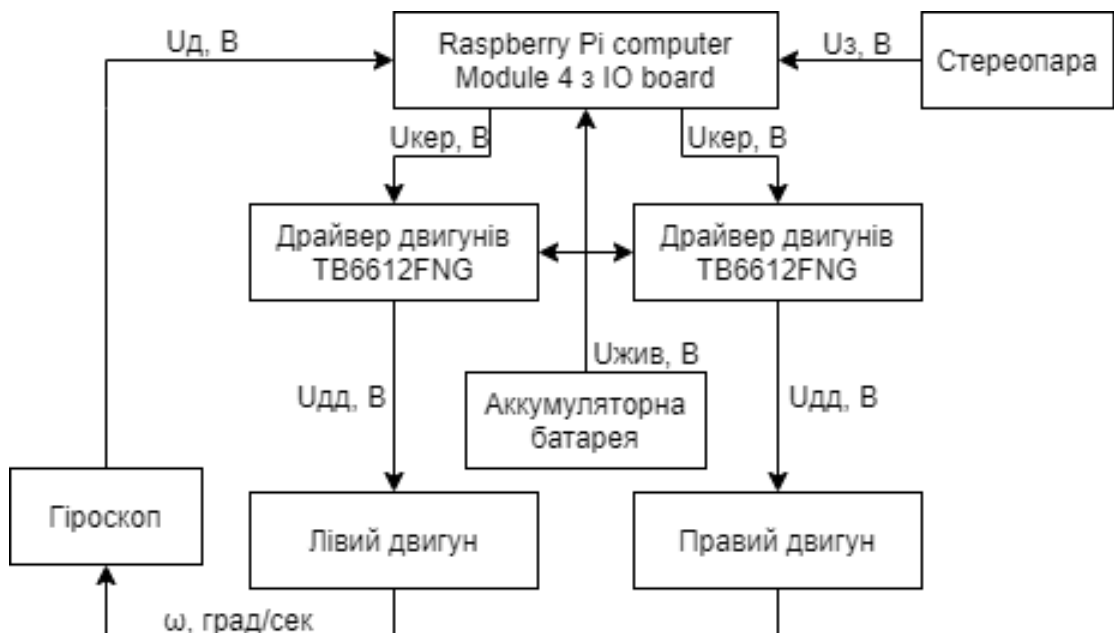


Рисунок 2.4 – Функціональна схема об'єкта керування

На рисунку 2.4 представлено:

U_3 – задаючий сигнал з камер;

$U_{жив}$ – напруга живлення з акумуляторної батареї, 5В;

$U_{кер}$ – сигнал керування, який поступає на підсилювач потужності;

$U_{дд}$ – сигнал після підсилювача потужності (драйвера);

$U_{д}$ – сигнал з модуля MPU6050;

ω – кутова швидкість повороту корпусу.

Створена функціональна схема системи автоматичного позиціонування, яка основана на принципі управління за відхиленням. Дана схема представлена на рисунку 2.5.

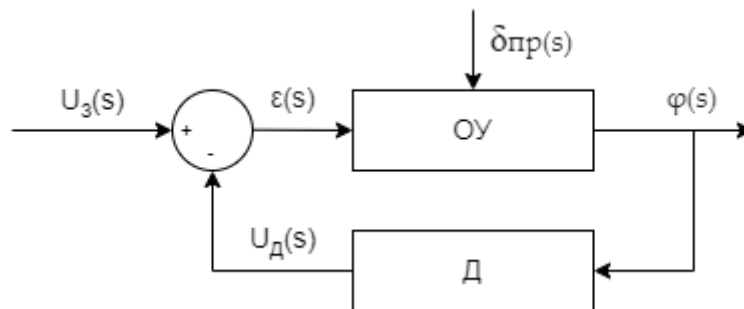


Рисунок 2.5 – Функціональна схема САП розглядаємої системи

На рисунку 2.5 прийняті наступні позначення:

КЕ – коригуючий елемент;

ОУ – об'єкт управління;

Д – датчик виміру кута повороту;

$U_3(s)$ – значення задаючого впливу;

$\delta_{пр}(s)$ – значення збурюючий вплив;

$U_{д}(s)$ – значення напруги з датчика;

$\varphi(s)$ – значення кута повороту платформи;

$\varepsilon(s)$ – різниця між сигналами ЗЗ.

Далі проведений детальний аналіз існуючих компонентів, які використовуються у проекті. Для цього використовувався підбір оптимального значення елементів методом вагових коефіцієнтів, завдяки якому були обрані основні компоненти, представлені у таблицях 2.2 – 2.6.

Таблиця 2.2 – Вибір основного обчислювального пристрою

№ п/п	Параметр	Ваговий коефіцієнт	Обчислювальний пристрій		
			Raspberry Pi Compute Module 3	Raspberry Pi Compute Module 3+	Raspberry Pi Compute Module 4
1	Центральний процесор	0.35	1	1.5	2
2	Графічний процесор	0.35	1	1.5	2
3	ОЗУ, Гб	0.25	1	1	1/2/4
4	Ціна, відносно	0.1	2.1	1.8	1/0.9/0.8
Разом			1.16	1.48	1.75/1.99/2.48

З отриманих даних слід відмітити Raspberry Pi Compute Module 4 з 4 Гб оперативної пам'яті. Даний модуль найбільш оптимальний для проекту, оскільки його обчислювальна потужність найкраща, що знадобиться при обробці великої кількості даних з камер.

Таблиця 2.3 – Вибір плати розширення для Raspberry Pi Compute Module 4

№ п/п	Параметр	Ваговий коефіцієнт	Плата розширення		
			IO Board	IO Board with PoE	IO Mini Base Board
1	Ціна	0.5	1.5	0.6	1
2	Маса	0.05	1	1	1.5
3	Розміри	0.1	1	1	1.5
4	Кількість портів	0.0125	40	40	40
Разом			1.4	0.95	1.225

Було обрано плату розширення IO Board, оскільки основною перевагою даного екземпляру являється низька ціна та висока надійність, оскільки це офіційний продукт від Raspberry.

Таблиця 2.4 – Види модулів з вбудованими датчиками акселерометра і гіроскопа

№ п/п	Параметр	Ваговий коефіцієнт	Вимірювальний пристрій		
			MPU 6050	HMCS5983	GY-86
1	Ціна	0.2	2	1.5	1.2
2	Маса	0.25	2	1.5	1.2
3	Розміри	0.02	1.5	2	1
4	Точність	0.5	1.2	1.1	1.5
5	Споживаючий струм	0.02	1.5	2	1.1
Разом			1.56	1.305	1.332

Найкращім вибором серед представлених модулів з датчиками гіроскопа і акселерометра являється MPU6050, оскільки він має невелику вагу і розміри, бюджетну ціну, досить високу точність.

Таблиця 2.5 – Види камер

№ п/п	Параметр	Ваговий коефіцієнт	Вимірювальний пристрій		
			Raspberry Pi Camera	Raspberry Pi High Qualite Camera	Waveshare IMX277
1	Ціна	0.4	3	1.2	1.1
2	Маса	0.3	3	1.23	1.3
3	Розміри	0.2	3	1.25	1.15
4	Розширення матриці	0.3	1	2	2
5	Споживаючий струм	0.1	2	1	1
Разом			3.2	1.799	1.76

Стандартна камера Raspberry Pi Camera являється найкращім вибором, оскільки одним з найголовніших факторів являється низька ціна та невеликі габаритні розміри і маса. Для даного проекту розширення матриці у 5 МП буде достатньо.

Таблиця 2.6 – Види драйверів

№ п/п	Параметр	Ваговий коефіцієнт	Вимірювальний пристрій		
			L298N	TB6612FNG	MX1508
1	Ціна	0.2	1.5	1	1.6
2	Маса	0.25	0.5	1.5	1.2
3	Розміри	0.3	0.5	1.5	1.2
4	Максимальний вихідний струм	0.15	1	1.5	1
5	Споживаючий струм	0.1	1.3	1	1
Разом			0.855	1.35	1.23

Серед вище представлених варіантів драйверів найкращім варіантом являється TB6612FNG, оскільки він поєднує у собі мінімальні габаритні розміри і масу та має найбільший максимальний вихідний струм, що скажется на швидкості руху транспортного засобу.

2.3. Висновки

У розділі проведений вербальний опис розробленого робота даного проекту. Показані функціональні схеми об'єкта керування та системи автоматичного позиціонування. Виконаний підбор і обґрунтування вибору компонентів: основного обчислювального пристрою, плати розширення до Raspberry, модуля з датчиками акселерометра і гіроскопа, драйвера та камер, методом вагових коефіцієнтів, які будуть використовуватись у проекті.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка нелінійної математичної моделі

Усі сили та моменти, діючі на роботизований комплекс, представлені в схемі на рисунку 3.1.

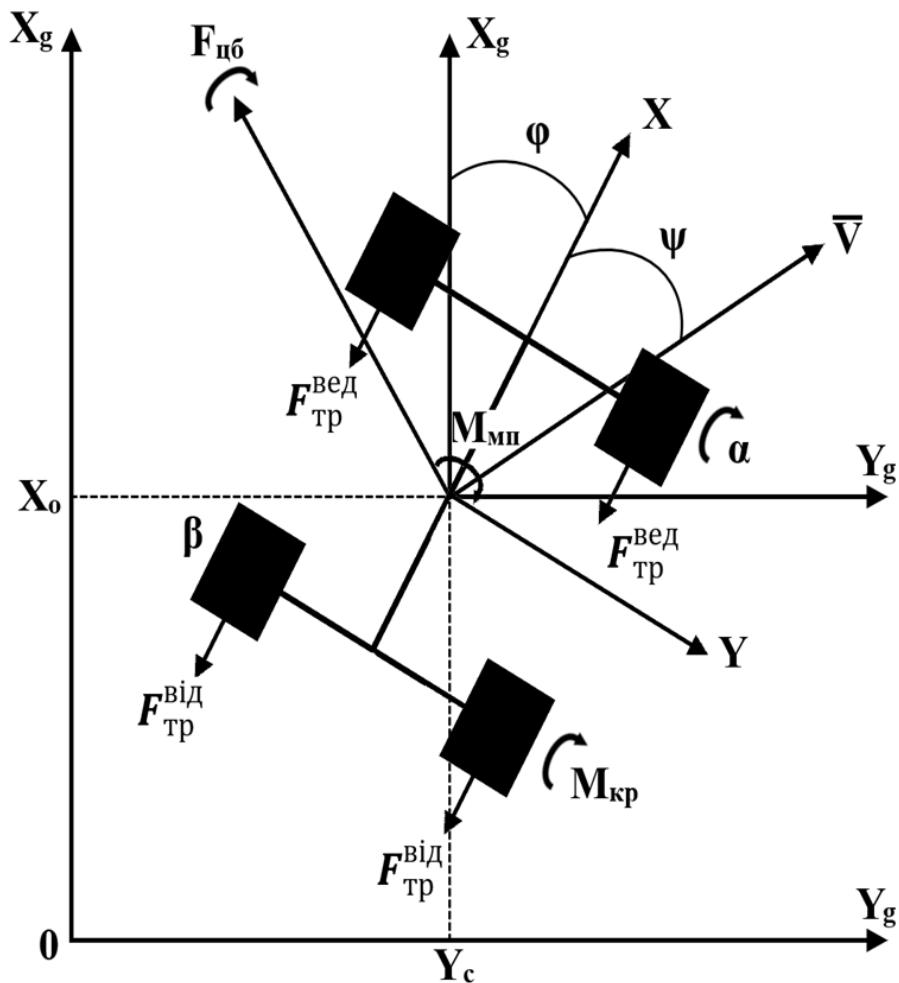


Рисунок 3.1 – Діючі моменти і сили на роботизований комплекс, при повороті

де:

OX_gY_g – земна (нормальна) СК;

OXY – зв'язана з роботизованим комплексом СК;

X_c, Y_c – координати положення центру мас роботизованого комплексу;

V – вектор швидкості, направлений кут поворот корпусу;

α – кут положення передньої пари коліс;

β – кут положення задньої пари коліс;

φ – кут між нормальною (земною) і зв'язаною СК;

ψ – кут між X і \bar{V} ;

$F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}}$ – сила тертя передньої пари коліс;

$F_{\text{тр}}^{\text{відом}}$ – сила тертя задньої пари коліс;

$M_{\text{мп}}$ – момент повороту роботизованого комплексу.

$M_{\text{кр}}$ – крутний момент.

Кінетична енергія представлена наступним вираженням:

$$T = T^e + T^r = T^e + T_H^r + T_K^r = M \frac{V^2}{2} + I_z \frac{\omega^2}{2} + I_{\text{пр}} \frac{\omega_k^2}{2}, \quad (3.1)$$

де:

T_H^r – кінетична енергія при повороті платформи;

T_K^r – кінетична енергія при русі платформи;

M – вага комплексу;

V – швидкість руху;

I_z – момент інерції, діючий від корпусу;

$I_{\text{пр}}$ – момент інерції, діючий від коліс.

Виражені лінійна і кутова швидкість, через узагальнені координати:

$$\omega^2 = \dot{\varphi}^2 \quad (3.2)$$

$$\omega_k^2 = \dot{\alpha}^2 \quad (3.3)$$

З рівнянь 3.2 та 3.3 виведено:

$$T = \frac{M}{2} (\dot{X}_c^2 + \dot{Y}_c^2) + \frac{I_z}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{I_{\text{кер}}}{2} \dot{\alpha}^2 + \frac{I_{\text{від}}}{2} \dot{\beta}^2 \quad (3.4)$$

Розраховані приватні похідні для вираження кінетичної енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial X_c} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{X}_c} = M_{\dot{X}_c}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{X}_c} = M_{\ddot{X}_c};$$

$$\frac{\partial T}{\partial Y_c} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{Y}_c} = M_{\dot{Y}_c}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{Y}_c} = M_{\ddot{Y}_c};$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \varphi} &= 0; \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = I_z \dot{\varphi}; \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = I_z \ddot{\varphi}; \\
\frac{\partial T}{\partial \psi} &= 0; \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = 0; \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = 0; \\
\frac{\partial T}{\partial \alpha} &= 0; \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = I_{\text{кер}} \dot{\alpha}; \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = I_{\text{кер}} \ddot{\alpha}; \\
\frac{\partial T}{\partial \beta} &= 0; \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = I_{\text{від}} \dot{\beta}; \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = I_{\text{від}} \ddot{\beta};
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Діючі сили на роботизований комплекс визначені, використовуючи сили уздовж визначених координат:

$$\begin{aligned}
\partial A_{x_c} = Q_{x_c} \cdot \partial_{x_c} &= -F_{\text{тр}}^{\text{відом}} \cdot \cos(\varphi) \cdot \partial_{x_c} - F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \cdot \cos(\varphi + \psi) \cdot \partial_{x_c} + \\
&+ F_{\text{цб}} \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \cdot \partial_{x_c} + F_T \cdot \cos(\varphi) \partial_{x_c}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
\partial A_{y_c} = Q_{y_c} \cdot \partial_{y_c} &= -F_{\text{тр}}^{\text{відом}} \cdot \sin(\varphi) \cdot \partial_{y_c} - F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \cdot \sin(\varphi + \psi) \cdot \partial_{y_c} + \\
&+ F_{\text{цб}} \cdot \sin(\varphi + \psi) \cdot \partial_{y_c} + F_T \cdot \sin(90 - \varphi) \partial_{y_c}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\partial A_{\varphi} = M_{\text{сп}} \cdot \partial_{\varphi} \tag{3.8}$$

$$\partial A_{\beta} = M_{\text{іВП}} \cdot \partial_{\beta} \tag{3.9}$$

$$\partial A_{\psi} = M_{\text{іКП}} \cdot \partial_{\psi} \tag{3.10}$$

де:

$M_{\text{іВП}}$ – момент, виникаючий від повороту роботизованого комплексу на задній парі колес;

$M_{\text{іКП}}$ – момент, виникаючий від повороту роботизованого комплексу на передній парі колес.

Далі, за методом Лагранжевого формалізму, зіставлені диференціальні рівняння руху мобільного робота з рівнянь 3.4 та 3.6 – 3.10.

$$\begin{aligned}
M_{y_c}^{\ddot{}} &= -F_{\text{тр}}^{\text{відом}} \cdot \sin(\varphi) - F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \cdot \sin(\varphi + \psi) + F_{\text{цб}} \cdot \sin(\psi + \varphi) + F_T \times \\
&\times \sin(90 - \varphi)
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
M_{y_c}^{\ddot{}} &= -F_{\text{тр}}^{\text{відом}} \cdot \sin(\varphi) - F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \cdot \sin(\varphi + \psi) + F_{\text{цб}} \cdot \sin(\psi + \varphi) + \\
&+ F_T \cdot \sin(90 - \varphi)
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$I_z \cdot \ddot{\varphi} = M_{\text{сп}} \tag{3.13}$$

$$I_{\text{зКП}} \cdot \ddot{\beta} = M_{\text{іВП}} \tag{3.14}$$

$$I_{\text{пр}} \cdot \ddot{\psi} = M_{\text{ікп}} \quad (3.15)$$

Розрахунок сил, які діють у системі:

1. Діючі сили на передню та задню пари мобільної платформи:

$$F_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} = \mu_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \cdot N_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} = \mu_{\text{тр}}^{\text{ведуч}} \frac{M}{2} g;$$

$$F_{\text{тр}}^{\text{відом}} = \mu_{\text{тр}}^{\text{відом}} \cdot N_{\text{тр}}^{\text{відом}} = \mu_{\text{тр}}^{\text{відом}} \frac{M}{2} g.$$

Відомо, що роботизований комплекс рухатиметься по достатньо чіпкому покриттю, тому коефіцієнт ковзання беремо 0.8. Сила тертя буде дорівнювати 4.1 Н.

2. Відцентрова сила, яка діє на роботизований комплекс:

$$F_{\text{цб}} = M \cdot R \cdot \Omega^2 = \frac{M}{R} V^2 = \frac{M}{L} \text{tg}(\alpha) V^2,$$

де:

L – відстань від передньої та задньої парами колес;

R – радіус колес, які використовуються у роботизованому комплексі.

3. Сила тяги діючої на роботизований комплекс:

$$F_m = \frac{M_{\text{кр}}}{R_k},$$

де:

$M_{\text{кр}}$ – момент обертання корпусу роботизованого комплексу;

R_k – радіус траєкторії, за якою рухається роботизований комплекс.

3.2 Побудова лінеаризованої математичної моделі руху роботизованого комплексу

Для побудови лінеаризованої моделі припущені деякі початкові умови: швидкість незмінна і кут $\psi = 0$. Розкладання рівняння у ряд Тейлора:

$$F_1 = M_{\ddot{X}_c} + F_{\text{TP}}^{\text{вд}} \cdot \cos(\varphi) + F_{\text{TP}}^{\text{кеп}} \cdot \cos(\varphi + \psi) - F_{\text{цб}} \cdot \sin(\varphi) \cos(\varphi) - F_{\text{T}} \cdot \cos(\varphi), \quad (3.16)$$

$$\Delta F_1 \left(\frac{\partial F_1}{\partial \ddot{X}_c} \right)_0 \Delta \ddot{X}_c + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \varphi} \right)_0 \Delta \varphi + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \psi} \right)_0 \Delta \psi + \left(\frac{\partial F_1}{\partial F_{\text{цб}}} \right)_0 \Delta F_{\text{цб}} + \left(\frac{\partial F_1}{\partial F_{\text{T}}} \right)_0 \Delta F_{\text{T}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \ddot{X}_c} = M = a_{11}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \varphi} = -F_{\text{TP}}^{\text{вд}} \cdot \sin(\varphi_0) - F_{\text{TP}}^{\text{кеп}} \cdot \sin(\varphi_0 + \psi_0) - (F_{\text{цб}0} \cos^2(\varphi_0) - F_{\text{цб}0} \sin^2(\varphi_0)) + F_{\text{m}0} \sin(\varphi_0) = a_{12}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \psi} = -F_{\text{TP}}^{\text{кеп}} \cdot \sin(\varphi_0 + \psi_0) = a_{13}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial F_{\text{цб}}} = -\sin(\varphi_0) \cos(\varphi_0) = a_{14}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial F_{\text{m}}} = -\cos(\varphi_0) = a_{15}$$

$$\Delta F_1 = a_{11} \Delta \ddot{X}_c + a_{12} \Delta \varphi + a_{13} \Delta \psi + a_{14} \Delta F_{\text{цб}} + a_{15} \Delta F_{\text{T}} \quad (3.18)$$

Далі проведена заміна $\Delta \ddot{X}_c = \Delta V_x$, та розкладена у ряд Тейлора.

$$V_x = V \cos(\varphi + \psi) \quad (3.19)$$

$$\dot{V}_x = \dot{V} \cos(\varphi + \psi) - \sin(\varphi + \psi) V (\dot{\varphi} + \dot{\psi})$$

$$\left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{V}} \right) \Delta \dot{V} = \left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial V} \right) \Delta V + \left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \varphi} \right) \Delta \varphi + \left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \psi} \right) \Delta \psi + \left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{\varphi}} \right) \Delta \dot{\varphi} + \left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{\psi}} \right) \Delta \dot{\psi}$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{V}} = \cos(\varphi_0 + \psi_0) = 1$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial V} = -\sin(\varphi_0 + \psi_0) (\dot{\varphi}_0 + \dot{\psi}_0) = 0$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \varphi} = \dot{V}_0 \sin(\varphi_0 + \psi_0) - \cos(\varphi_0 + \psi_0) \dot{V}_0 (\dot{\varphi}_0 + \dot{\psi}_0) = 0$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \psi} = 0$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{\varphi}} = -\sin(\varphi_0 + \psi_0) V_0 = 0$$

$$\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{\psi}} = 0$$

$$\dot{V}_x = \Delta V \quad (3.20)$$

У такому випадку рівняння приймає такий вид:

$$\Delta F_1 = a_{11}\Delta\dot{V} + a_{12}\Delta\varphi + a_{13}\Delta\psi + a_{14}\Delta F_{\text{цб}} + a_{15}\Delta F_{\text{т}} \quad (3.21)$$

Далі проведене розкладання рівняння (3.12) у ряд Тейлора:

$$F_2 = M_{\dot{Y}_c} + F_{\text{тр}}^{\text{від}} \cdot \sin(\varphi) + F_{\text{тр}}^{\text{кер}} \cdot \sin(\psi + \varphi) - F_{\text{цб}} \cdot \sin(\psi + \varphi) - F_m \cdot \sin(90 - \varphi) \quad (3.22)$$

$$\Delta F_2 = \left(\frac{\partial F_2}{\partial \dot{Y}_c}\right)_0 \Delta \ddot{Y}_c + \left(\frac{\partial F_2}{\partial \varphi}\right)_0 \Delta \varphi + \left(\frac{\partial F_2}{\partial \psi}\right)_0 \Delta \psi + \left(\frac{\partial F_2}{\partial F_{\text{цб}}}\right)_0 \Delta F_{\text{цб}} + \left(\frac{\partial F_2}{\partial F_m}\right)_0 \Delta F_m \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \dot{Y}_c} = M = a_{21}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \varphi} = F_{\text{тр}}^{\text{від}} \cdot \cos(\varphi_0) - F_{\text{тр}}^{\text{кер}} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) + F_{\text{цб}0} \cos(\varphi_0 + \psi_0) = a_{22}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \psi} = -F_{\text{тр}}^{\text{кер}} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) + F_{\text{цб}0} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) - F_m \sin(\psi_0) = a_{23}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial F_{\text{цб}}} = F_{\text{цб}0} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) = a_{24}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial F_m} = \cos(\psi_0) = a_{25}$$

$$F_2 = a_{21}\Delta \ddot{Y}_c + a_{22}\Delta\varphi + a_{23}\Delta\psi + a_{24}\Delta F_{\text{цб}} + a_{25}\Delta F_m \quad (3.24)$$

Проведена заміна $\Delta \ddot{Y}_c = \Delta V_Y$, після чого рівняння (3.24) розкладено також у ряд Тейлора:

$$V_Y = V \sin(\varphi + \psi) \quad (3.25)$$

$$\dot{Y}_Y = \dot{V} \sin(\varphi + \psi) - \cos(\varphi + \psi)V(\dot{\varphi} + \dot{\psi})$$

$$\left(\frac{\partial \dot{V}_x}{\partial \dot{V}}\right) \Delta \dot{V} = \left(\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial V}\right) \Delta V + \left(\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \varphi}\right) \Delta \varphi + \left(\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \psi}\right) \Delta \psi + \left(\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \dot{\varphi}}\right) \Delta \dot{\varphi} + \left(\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \dot{\psi}}\right) \Delta \dot{\psi}$$

$$\frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \dot{V}} = \sin(\varphi_0 + \psi_0) = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial V} &= \cos(\varphi_0 + \psi_0)(\dot{\varphi}_0 + \dot{\psi}_0) = 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \varphi} &= \dot{V}_0 \cos(\varphi_0 + \psi_0) - \sin(\varphi_0 + \psi_0) V_0 (\dot{\varphi}_0 + \dot{\psi}_0) = 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \psi} &= 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \varphi} &= \cos(\varphi_0 + \psi_0) V_0 = V_0 \\ \frac{\partial \dot{V}_Y}{\partial \psi} &= \cos(\varphi_0 + \psi_0) V_0 = V_0 \\ \Delta \dot{V}_Y &= V_0 (\Delta \varphi + \Delta \psi) \end{aligned} \quad (3.26)$$

У такому разі рівняння (3.24) має наступний вигляд:

$$\Delta F_2 = a_{21}(\Delta \dot{\varphi} + \Delta \dot{\psi}) + a_{22} \Delta \varphi + a_{23} \Delta \psi + a_{24} \Delta F_{цб} + a_{25} \Delta F_m \quad (3.27)$$

Далі проведене розкладання рівнянь (3.13 – 3.15) у ряд Тейлора:

$$\Delta F_3 = \Delta M - I_z (\Delta \dot{\varphi} + \Delta \dot{\psi}) \quad (3.28)$$

$$\Delta F_4 = \Delta M_{ивп} - I_{зкп} \Delta \ddot{\beta} \quad (3.29)$$

$$\Delta F_4 = \Delta M_{икп} - I_{пр} \Delta \ddot{\psi} \quad (3.30)$$

Відомо, що рівняння 3.29 за попередніми допущеннями = 0, тому для опису руху роботизованого комплексу використовуються 3.27 – 3.28:

$$\begin{aligned} a_{21} V_0 \Delta \dot{\varphi} + a_{21} V_0 \Delta \dot{\psi} + a_{22} \Delta \varphi + a_{23} \Delta \psi + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \Delta \psi &= 0 \\ \Delta M_{пп} - I_z \Delta \ddot{\varphi} - I_z \Delta \ddot{\psi} &= 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Для прорахунку діючого моменту повороту платформи, зображена схема, представлена на рисунку 3.2.

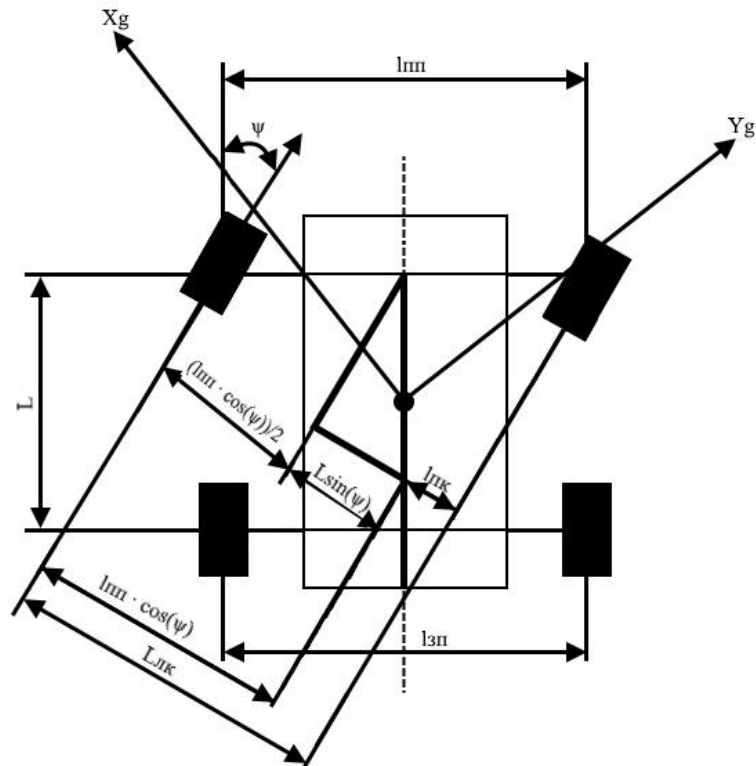


Рисунок 3.2 – Схема для розрахунку моменту $M_{пп}$ МРК

На рисунку 3.2 прийняті наступні позначення:

$l_{пп}$ – відстань між передньою парою коліс;

L – відстань між передніми та задніми парами коліс;

$L_{лк}$ – довжина плеча лівого переднього колеса;

$L_{пк}$ – довжина плеча правого переднього колеса.

Тоді:

$$M = M_{лк} - M_{пк}$$

$M_{лк} = \frac{F_T}{2} \cdot L_{лк} = \frac{F_T}{2} \cdot (L \sin \psi + \frac{l_{пп}}{2} \cos \psi)$ – представлення моменту при повороті лівого переднього колеса,

$M_{пк} = \frac{F_T}{2} \cdot L_{пк} = \frac{F_T}{2} \cdot (-L \sin \psi + \frac{l_{пп}}{2} \cos \psi)$ – представлення моменту при повороті правого переднього колеса,

$$M = \frac{F_T}{2} \cdot (L \sin \psi + \frac{l_{пп}}{2} \cos \psi + L \sin \psi - \frac{l_{пп}}{2} \cos \psi) = F_T L \sin \psi, \quad (3.32)$$

Отримане рівняння (3.32) розкладено у ряд Тейлора:

$$\begin{aligned}\Delta M &= \left(\frac{\partial M}{\partial F_m}\right) \Delta F_m + \left(\frac{\partial M}{\partial \psi}\right) \Delta \psi \\ \frac{\partial M}{\partial F_m} &= L_0 \sin \psi_0 = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial \psi} &= \cos \psi_0 F_{T0} = F_{T0} \\ \Delta M &= F_{T0} \Delta \psi\end{aligned}\quad (3.33)$$

Далі отримане рівняння (3.33) було відставлено в рівняння (3.31) і був підставлений збурючий вплив (від просковзування), який дорівнює $\delta_{пр}$:

$$\begin{aligned}a_{21} V_0 \Delta \dot{\varphi} + a_{21} V_0 \Delta \dot{\psi} + a_{22} \Delta \varphi + a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \Delta \psi &= 0 \\ F_{m0} \Delta \psi - I_z \Delta \ddot{\varphi} - I_z \Delta \ddot{\psi} &= \delta_{пр}\end{aligned}\quad (3.34)$$

Вирази для розрахунку коефіцієнтів рівняння (3.34):

$$\begin{aligned}a_{21} V_0 \dot{\varphi} + a_{21} V_0 \dot{\psi} + a_{22} \Delta \varphi + a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \Delta \psi &= 0 \\ V_0 \Delta \dot{\varphi} + V_0 \Delta \dot{\psi} + \frac{a_{22}}{a_{21}} \Delta \varphi + \frac{1}{a_{21}} \left(a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \right) \Delta \psi &= 0 \\ \Delta \dot{\varphi}: V_0 &= a_{01} \\ \Delta \dot{\psi}: V_0 &= a_{02} \\ \Delta \varphi: \frac{a_{22}}{a_{21}} &= a_{03}\end{aligned}\quad (3.35)$$

$$\begin{aligned}\Delta \psi: \frac{1}{a_{21}} \left(a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \right) &= a_{04} \\ F_{m0} \Delta \psi - I_z \Delta \ddot{\varphi} - I_z \Delta \ddot{\psi} &= 0\end{aligned}\quad (3.36)$$

$$\begin{aligned}\frac{F_{m0}}{I_z} \Delta \psi - \Delta \ddot{\varphi} - \Delta \ddot{\psi} &= 0 \\ \Delta \psi: \frac{F_{m0}}{I_z} &= a_{05} \\ \Delta \ddot{\varphi}: &1 \\ \Delta \ddot{\psi}: &1\end{aligned}\quad (3.37)$$

З рівнянь (3.36 та 3.37) виведено остаточне рівняння лінеаризованої математичної моделі руху роботизованого комплексу:

$$a_{01}\dot{\varphi} + a_{02}\dot{\psi} + a_{03}\varphi + a_{04}\psi = 0 \quad (3.38)$$

$$a_{05}\psi - \ddot{\varphi} - \ddot{\psi} = \delta_{np}$$

$$a_{01}s\varphi(s) + a_{02}\psi + a_{03}\varphi(s) + a_{04}\psi(s) = 0$$

$$a_{05}\psi(s) - s^2\varphi(s) - s^2\psi(s) = \delta_{np}(s) \quad (3.39)$$

Виражено $\psi(s)$ і підставлено в перше рівняння:

$$a_{01}\varphi(s) + \frac{a_{02}}{a_{05}}s^3\varphi(s) + \frac{a_{02}}{a_{05}}s^3\psi(s) + a_{03}\varphi(s) + \frac{a_{04}}{a_{05}}s^2\varphi(s) + \frac{a_{04}}{a_{05}}s^2\psi(s) = -\delta_{np}(s); \quad (3.40)$$

Вхідною величиною складеного рівняння вхід-вихід являється $\psi(s)$ а вихідною – $\varphi(s)$:

$$\begin{aligned} \frac{a_{02}}{a_{05}}s^3\varphi(s) + \frac{a_{04}}{a_{05}}s^2\varphi(s) + a_{01}s\varphi(s) + a_{03}\varphi(s) = \\ = -\frac{a_{02}}{a_{05}}s^3\psi(s) - \frac{a_{04}}{a_{05}}s^2\psi(s) - \delta_{np} \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$a_{01} = V_0$$

$$a_{02} = V_0$$

$$a_{03} = \frac{a_{22}}{a_{21}} = \frac{F_{тр}^{від} \cdot \cos(\varphi_0) - F_{тр}^{кер} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) + F_{цб0} \cos(\varphi_0 + \psi_0)}{M}$$

$$a_{04} = \frac{1}{a_{21}} \left(a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \right) =$$

$$= \frac{(L(-F_{тр}^{кер} \cdot \cos(\varphi_0 + \psi_0) + F_{цб0} \cos(\varphi_0 + \psi_0) + V_0^2 M(F_{цб0} \cos(\varphi_0 + \psi_0)))}{ML}$$

$$a_{05} = \frac{F_{m0}}{I_z}$$

Для наступних прорахунків необхідні значення параметрів комплексу:

- Вага комплексу – 950 грам;
- Швидкість роботизованого комплексу – 3.05 метрів за секунду
- Радіус колес – 35 мм

- Кут між зnormalною і зв'язаною СК – 90°
- Кут повороту – 35°
- Радіус кривизни траєкторії – 77 см

Отримані значення параметрів були використані для розрахунків:

$$\begin{aligned}
 a_{01} &= 3 \\
 a_{02} &= 3 \\
 a_{03} &= \frac{a_{22}}{a_{21}} = \frac{F_{цб} \cos(\varphi + \psi)}{M} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha)V^2 \cos(\varphi + \psi)}{L} = 64.98 \\
 a_{04} &= \frac{1}{a_{21}} \left(a_{23} + a_{24} \frac{V_0^2 M}{L} \right) = \frac{1}{M} \left(F_{мп\ кер} + F_{цб0} + F_{цб0} \frac{V_0^2 M}{L} \right) = \\
 &= \frac{\left(L \left(\frac{M}{L} \operatorname{tg}\psi V^2 \cos(\varphi_0 + \psi_0) \right) + V_0^2 M \left(\frac{M}{L} \operatorname{tg}\psi V^2 \cos(\varphi_0 + \psi_0) \right) \right)}{L \frac{M}{L} \operatorname{tg}\psi V^2 \sin(\varphi) L} = 265.49 \\
 a_{05} &= \frac{F_{m0}}{I_z} = \frac{\frac{M_{кр}}{R_k}}{I_z} = \frac{\frac{m g n a}{2}}{0.5 m R^2} = 23.463
 \end{aligned}$$

3.3 Знаходження передавальних функцій

У рівняння (3.41) були підставлені отримані значення параметрів і отримано:

$$\begin{aligned}
 0.12858s^3\varphi(s) + 11.34654s^2\varphi(s) + 3\varphi(s) + 64.989 &= 0.12858s^3\psi(s) + \\
 + 11.34654s^2\psi(s) - \delta_{пп}(s), & \quad (3.42)
 \end{aligned}$$

З рівняння (3.41) отримано ПФ об'єкта керування отримаєм передаточну функцію ОУ по управлінню та по збурюючому впливах:

$$W_{OY}(s) = \frac{\varphi(s)}{\psi(s)} = \frac{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + 3s + 64.989}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2} \quad (3.43)$$

$$W_{OY}^f(s) = \frac{\varphi(s)}{\delta_{пп}(s)} = \frac{-3.77}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2} \quad (3.44)$$

3.3 Формування структурної схеми САП

На рис. 3.3 представлена структурна схема САП кута повороту МРК.

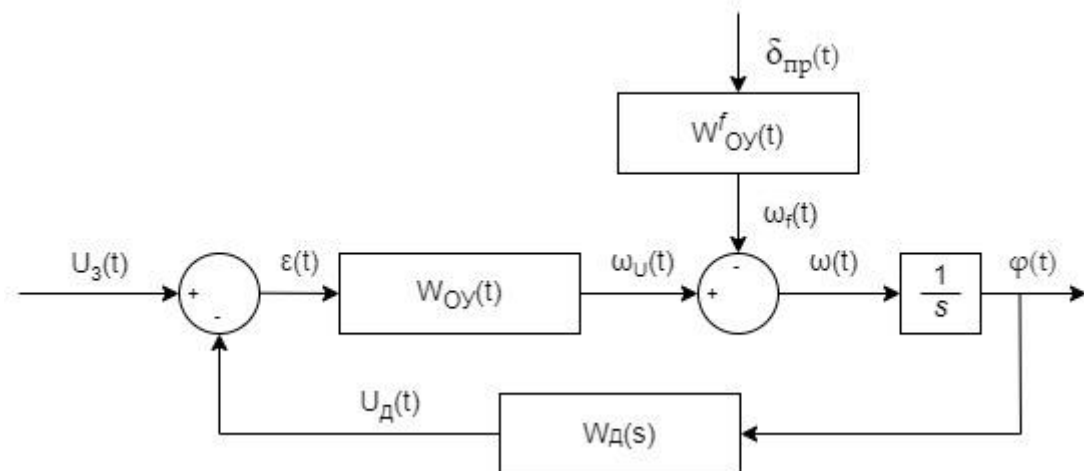


Рисунок 3.3 – Структурна схема САП

На даній схемі рис. 3.3 прийнято:

$$W_{oy}(s) = \frac{\varphi(s)}{\psi(s)} = \frac{0.12858 s^3 + 11.34654s^2 + 3s + 64.989}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2} - \text{передаточна функція об'єкту};$$

$$W_{oy}^f(s) = \frac{\varphi(s)}{\delta_{пp}(s)} = \frac{-3.77}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2} - \text{передаточна функція за збуренням};$$

$$W_D(s) = \frac{\varepsilon(s)}{\varphi(s)} = K_D = 1 - \text{передаточна функція датчика акселерометра і гіроскопа};$$

$U_3(t)$ – значення напруги задаючого впливу;

$\delta_{пp}(t)$ – величина збурення;

$U_{KE}(t)$ – значення напруги КЕ;

$U_D(t)$ – значення напруги з датчика акселерометра і гіроскопа;

$\varphi(t)$ – значення кута повороту платформи робота;

$\varepsilon(t)$ – різниця між сигналами ЗЗ.

Передаточна функція розімкненої системи за керуючим впливом має наступний вигляд:

$$W_H^u(s) = \frac{\varphi(s)}{M_\alpha(s)} = W_{ке}(s)W_{oy}^u(s) \cdot \frac{1}{s} = \frac{K_p(0.12858 s^3 + 11.34654s^2 + 3s + 64.989)}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2};$$

Передаточна функція розімкненої системи при збурюючому впливі має наступний вигляд:

$$W_H^f(s) = \frac{\varphi(s)}{\delta_{np}(s)} = W_{ke}(s)W_{oy}^f(s) \cdot \frac{1}{s} = \frac{K_p(-3.77)}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2}$$

Передаточна функція замкненої системи за керуючим впливом має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_H(s) &= \frac{\varphi(s)}{M_\alpha(s)} = \frac{W_H^u(s)}{1 + W_H^u(s) \cdot W_D(s)} = \\ &= \frac{K_p(0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + 3s + 64.989)}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + K_p(0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + 3s + 64.989)} \end{aligned}$$

Передаточна функція замкнутої системи за збурюючим впливом має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_H(s) &= \frac{\varphi(s)}{\delta_{np}(s)} = \frac{W_H^f(s)}{1 + W_H^f(s)W_D(s)} \\ &= \frac{K_p(0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + 3s + 64.989)}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 - 3.77K_p} \end{aligned}$$

3.4 Машинне моделювання об'єкта автоматичного управління

Аналіз моделі системи автоматичного позиціонування здійснювалось у середовищі Matlab Simulink. Після збірки схеми проведений аналіз системи. Схема моделювання зображена на рисунку 3.4, результат – на рисунках 3.5 та 3.6.

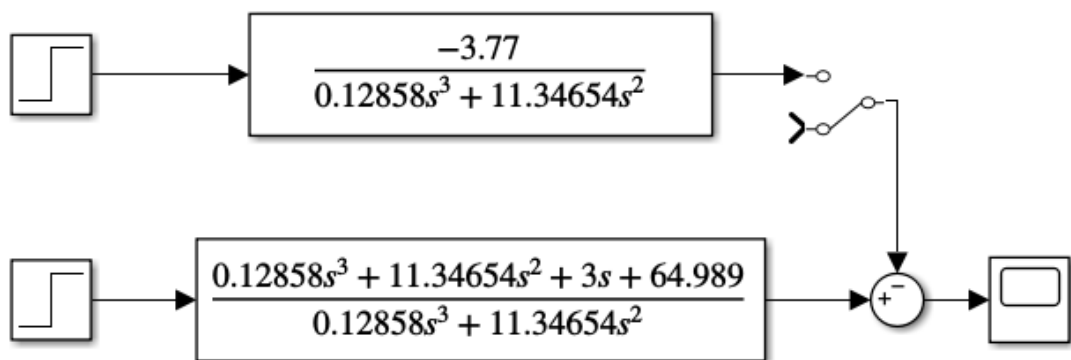


Рисунок 3.4 – Схема для визначення характеристик ОАУ у додатку Simulink

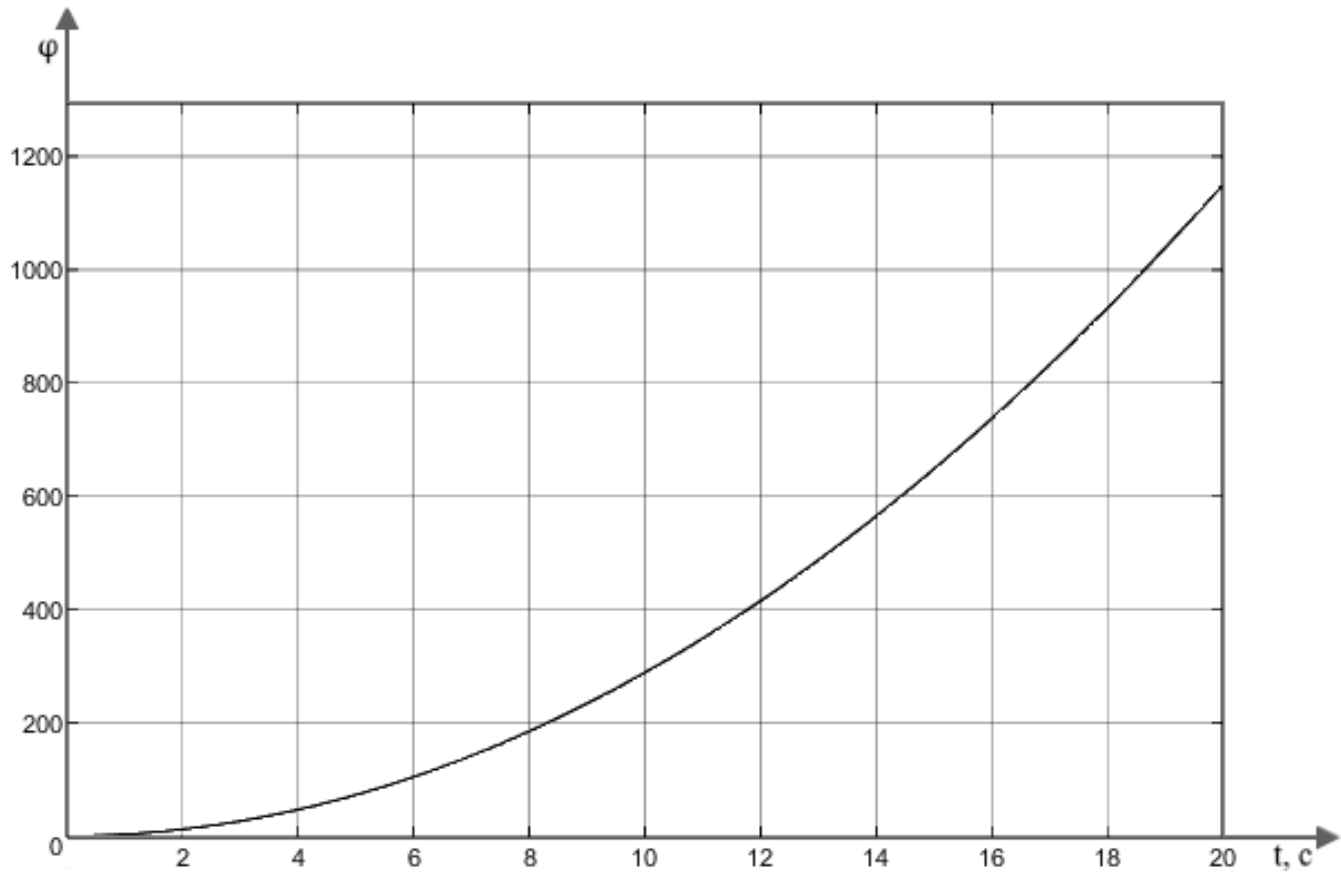


Рисунок 3.5 – Динамічна характеристика, знята за одиночним ступінчастим
ВПЛИВОМ

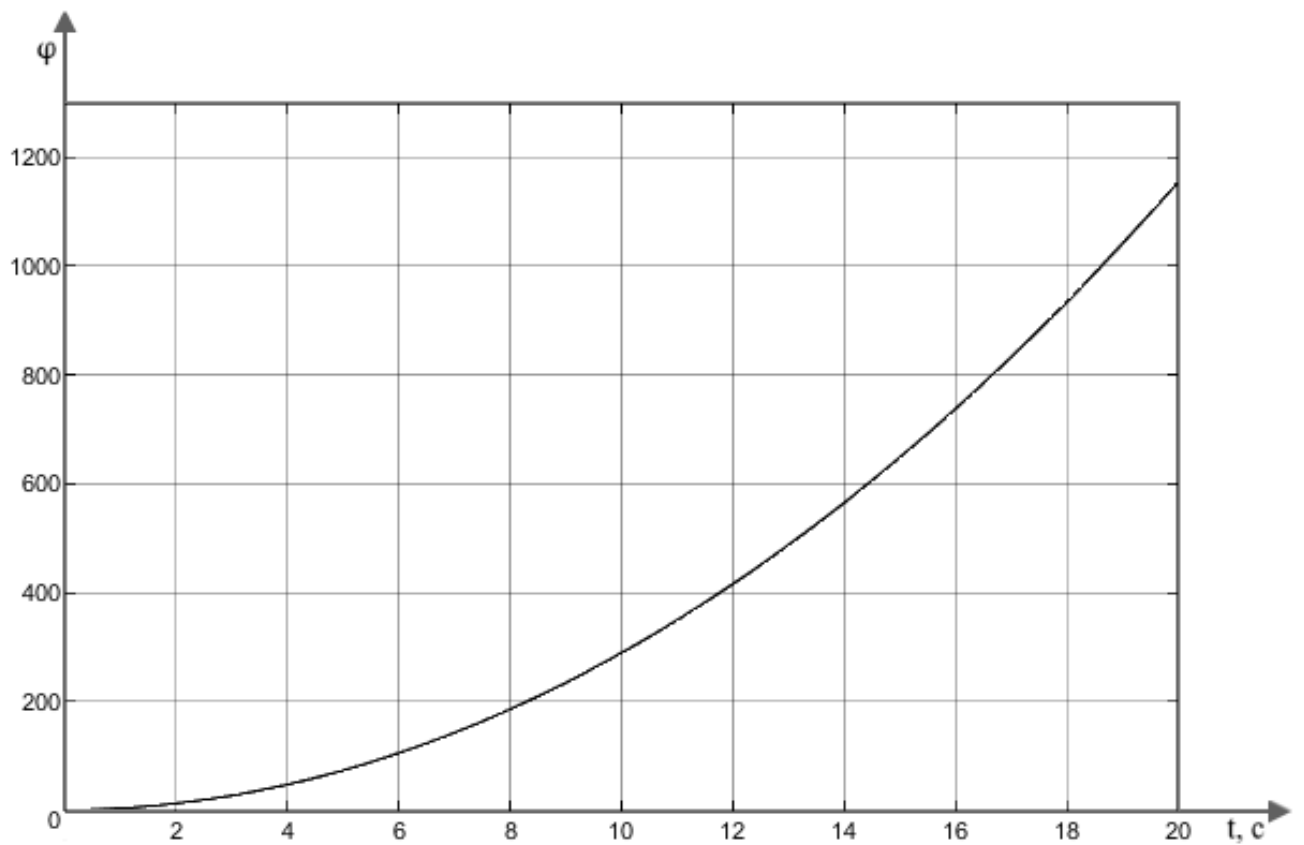


Рисунок 3.6 – Динамічна характеристика, знята за збурюючим впливом

Оскільки об'єкт являється нестійким, показники якості визначити неможливо. Час перехідного процесу значно перевищує задані умови у технічному завданні. Дослідження системи показало, що у систему треба вводити коректуючий елемент.

3.5 Висновки

У розділі виконані наступні задачі:

- Розроблена нелінійна математична модель;
- Виведена лінеаризована математична об'єкта управління;
- Сформовано структурну схему;
- Виведені передавальні функції об'єкта автоматичного управління в обох випадках;
- Проведено моделювання у середовищі Simulink, де отримані динамічні характеристики.

Після отриманих результатів досліджуваної системи виявлено, що система являється нестійкою і не задовільняє вимогам, згідно технічного завдання. Для вирішення цієї проблеми необхідно вводити коректуючий елемент.

4 ФОРМУВАННЯ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

4.1 Дослідження характеристик САП

Аналіз системи проводився у середовищі Matlab Simulink, схема для збірки якого представлено на рисунку 4.1. Отриманий результат, у вигляді перехідного процесу, представлений на рисунку 4.2.

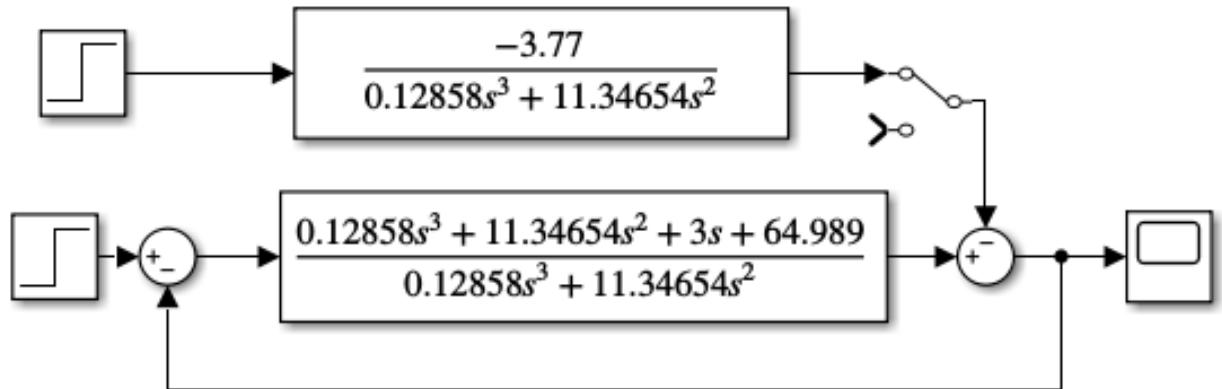


Рисунок 4.1 – Схема для визначення перехідного процесу системи

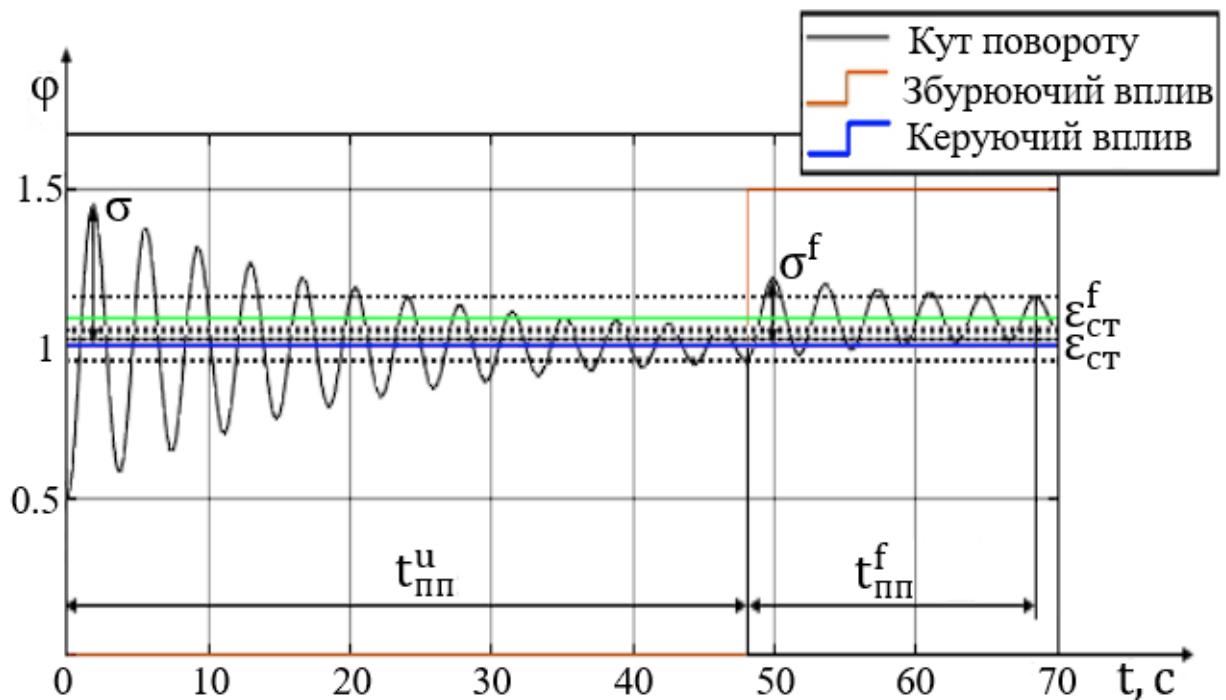


Рисунок 4.2 – Графік перехідного процесу системи

Подальше дослідження проводилось у Matlab та Simulink. Отримані графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ системи представлені на рисунку 4.3.

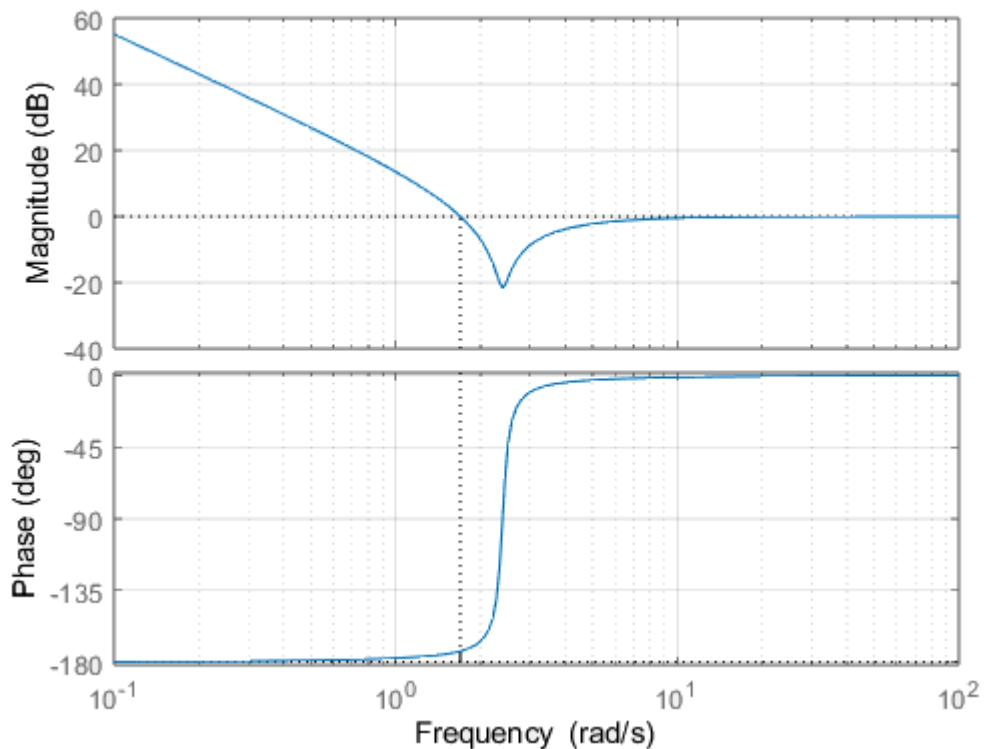


Рисунок 4.3 – Частотні характеристики системи

Показники якості зазначені у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Показники якості досліджуємої системи

№ п/п	Тип впливу	Час перехідного процесу ($t_{пп}$), с	Перерегулювання (σ), %	Статична помилка ($\epsilon_{ст}$), рад	Запас стійкості за амплітудою (L_3), Дб	Запас стійкості по фазі (φ), °
1	Керуючий	48	48.1	0	∞	6.75
2	Збурюючий	22	22.8	0.95	-	-

4.2 Статичний розрахунок САП

Для отримання показників якості, які зазначені у технічному завданні, система, необхідно вводити КЕ, для чого записана формула, для розрахунку похибки кутової швидкості:

$$\omega_{\max} = \frac{\varphi_{\max}}{t_{\text{пп}}} = \frac{0.2}{4} = 0.022 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (4.1)$$

Коефіцієнт розімкненої системи:

$$K_{\text{роз}} = 0.022 \cdot K_{\text{ay}}. \quad (4.2)$$

Обмеження коефіцієнту підсилювача потужності:

$$\begin{aligned} \psi_{\max} \cdot (0.022 \cdot K_{\text{ay}}) &\geq \omega_{\max}; \\ K_{\text{ay}} &\geq \frac{\omega_{\max}}{\psi_{\max} \cdot 0.022}; \\ K_{\text{ay}} &\geq 12.5. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Обраний коефіцієнт дорівнює 680.

4.3 Синтез коригуючого елемента

Оскільки розглянута система являється нестійкою, то потрібно створити КЕ, завдяки якому система буде стійкою і усі показники якості задовольняти значенням показників якості, які представлені у технічному завданні.

Створення КЕ проводилось методом ЛАЧХ. На одному графіку представлена наявна, бажана та асимптотична логарифмічна амплітудно-частотна характеристика, яка представлена різницею бажаної та наявної логарифмічна амплітудно-частотна характеристика.

Існуюча ЛАЧХ будується на основі передаточної функції розімкненої системи з введеним коректуючим елементом представлена:

$$W(s) = \frac{\psi(s)}{\psi_{\text{к}}(s)} = \frac{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2 + 3s + 64.989}{0.12858 s^3 + 11.34654 s^2} \times 15. \quad (4.4)$$

Утворення існуючої логарифмічно амплітудно-частотної характеристики:

1) Перетин осі абсцис:

$$20 \lg(K_{\text{роз}}) = 20 \lg(15) = 23.52 \text{ Дб}$$

2) Точка перетину за сталим часу:

$$\lg\left(\frac{1}{\sqrt{b}}\right) = \lg\left(\frac{1}{2.396}\right) = -0.38 \text{ дек};$$

Згідно показників якості, зазначених у технічному завданні:

$$\sigma = 20\%, \text{ тоді } t_{\text{пп}} = \frac{2.8 \pi}{\omega_{\text{ср}}} = 4 \text{ с}$$

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{2.8 \pi}{t_{\text{пп}}} = \frac{2.8 \pi}{4} = 2.2 \text{ с}^{-1};$$

$$\lg(\omega_{\text{ср}}) = 0.33;$$

$$\Delta L = 20 \text{ Дб};$$

$$\Delta \varphi = 60^\circ.$$

Графіки логарифмічно амплітудно-частотної характеристики нескоригованої, бажаної та коригуючої систем представлені на рис. 4.4.

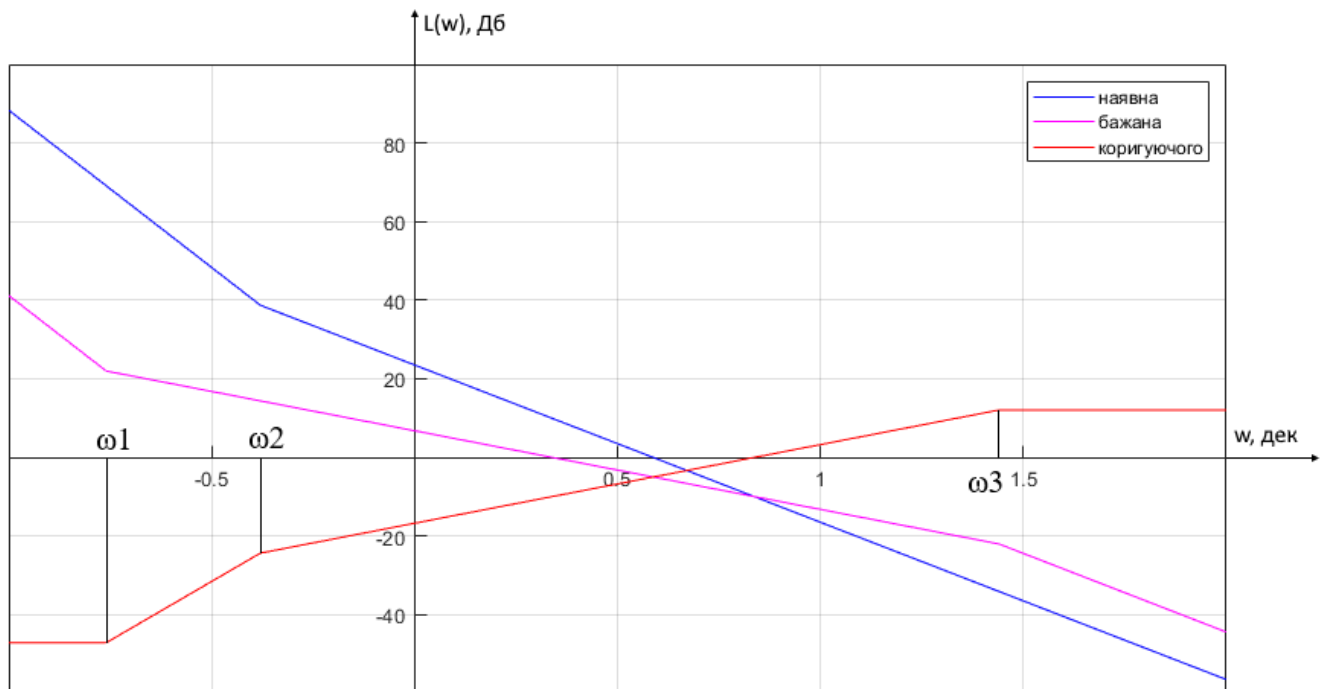


Рисунок 4.4 – Графіки наявної, бажаної та коригуючої асимптотичних ЛАЧХ

Відповідно з отриманої логарифмічно амплітудно-частотної характеристики була отримана передаточна функція коректуючого елементу:

$$W_{ay}(s) = \frac{(s + 0.174)^3}{(s + 0.417)^2 (s + 27.54)}. \quad (4.5)$$

Тоді передаточна функція скоригованої системи автоматичного позиціонування має наступний вид:

$$W(s) = \frac{\varphi(s)}{\psi(s)} = \frac{15s^5 + 428.5s^4 + 518.3s^3 + 2584s^2 + 2007s + 412.4}{s^5 + 0.522s^4 + 0.09s^3 + 0.00522s^2}. \quad (4.6)$$

Тоді передавальна функція замкненої системи має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi(s) &= \frac{\varphi(s)}{\psi(s)} = \\ &= \frac{0.9375s^5 + 26.78s^4 + 32.39s^3 + 161.5s^2 + 125.4s + 25.78}{s^5 + 26.82s^4 + 32.4s^3 + 161.5s^2 + 125.4s + 25.78}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.4 Дослідження системи з введеним коригуючим елементом

Далі проаналізована скоригована система автоматичного позиціонування у програмному забезпеченні Simulink та знайдені показники якості даної системи. Сама модель скоригованої системи автоматичного позиціонування у середовищі Simulink представлена на рисунку 4.5.

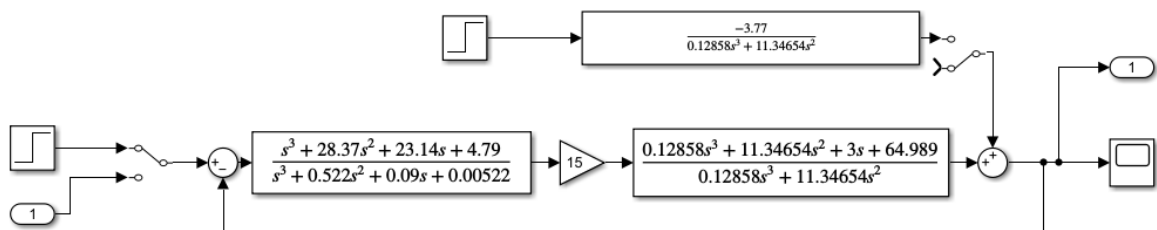


Рисунок 4.5 – Схема системи автоматичного позиціонування з введеним коригуючим елементом програмному забезпеченні Simulink

Отриманий графік перехідного процесу систем з введеним коригуючим елементом представлений на рисунку 4.6

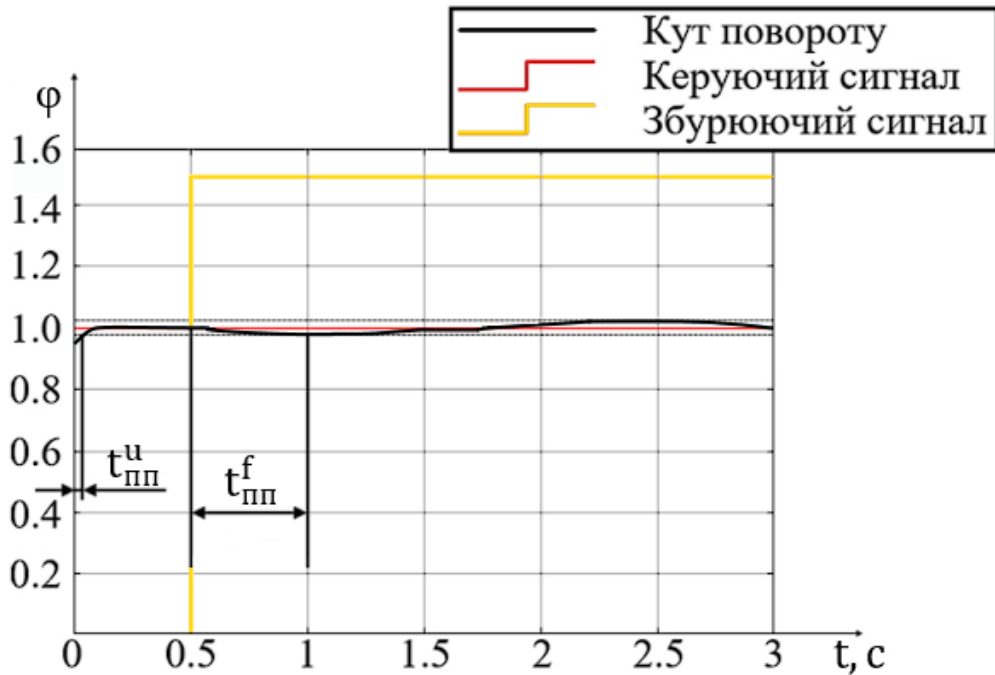


Рисунок 4.3 – Графік перехідного процесу системи з введеним коректуючим елементом у середовищі Simulink

Показники якості системи з введеним коригуючим елементом представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Показники якості з введеним коригуючим елементом

№ п/п	Тип впливу	Час перехідного процесу ($t_{пп}$), с	Перерегулювання (σ), %	Статична помилка ($\epsilon_{ст}$), рад	Запас стійкості за амплітудою (L_3), дБ	Запас стійкості по фазі (φ), °
1	Керуючий	0.051	0	0	24.5	∞
2	Збурюючий	0.49	0	0.095	-	-

Отримані показники ефективності системи автоматичного позиціонування з введеним коректуючим елементом повністю відповідає необхідним вимогам, заданим у технічному завданні:

- Система повинна бути стійкою;
- Час перехідного процесу менше 4 секунд;
- Перерегулювання менше 20%.
- Запас стійкості за фазою більше 10 градусів

У результаті синтезу та введення коректуючого елементу розглянута система стала стійкою і вона повністю відповідає потребам, приведеним у технічному завданні і не потребує додаткових змін.

4.4 Синтез цифрового регулятора скорегованої САП

Основне управління системою проходить за допомогою комп'ютера, за допомогою якого можна досить точно і легко налаштувати параметри системи і реалізувати усі необхідні алгоритми, які будуть використовуватись у системі керування. Саме по цій причині необхідно перетворити КЕ з аналогового у цифровий вид, оскільки саме це забезпечить коректну роботу системи керування. Для перетворення КЕ у цифровий вигляд, для початку потрібно розрахувати період квантування системи. Період квантування залежить від часу перехідного процесу і швидкості проведення операцій основного контролеру. Так, як у проекті використовується високопродуктивне рішення комп'ютера від Raspberry, проблем з розрахунком та коректним виконанням заданого алгоритму не має бути. Розраховано період квантування:

$$T_0 \leq \frac{t_{\text{ПП}}}{25} = \frac{0.05}{24} = 0.00208 \text{ с} \quad (4.8)$$

З отриманого значення прийнято наступний період квантування: $T_0 = 0.0001$ с. Далі проведена конверсія з аналогової передавальної функції КЕ на дискретну, засобами у середовищі Matlab, з якої було отримано наступну передаточну функцію:

$$W(z) = \frac{U_{az}(z)}{U_{\text{пп}}(s)} = \frac{z^3 - 2.943z^2 + 2.887z - 0.9455}{z^3 - 2.999z^2 + 2.998z - 0.999} \quad (4.9)$$

Далі проведено дослідження отриманої системи. Графіки перехідного процесів представлений на рисунку 4.5.

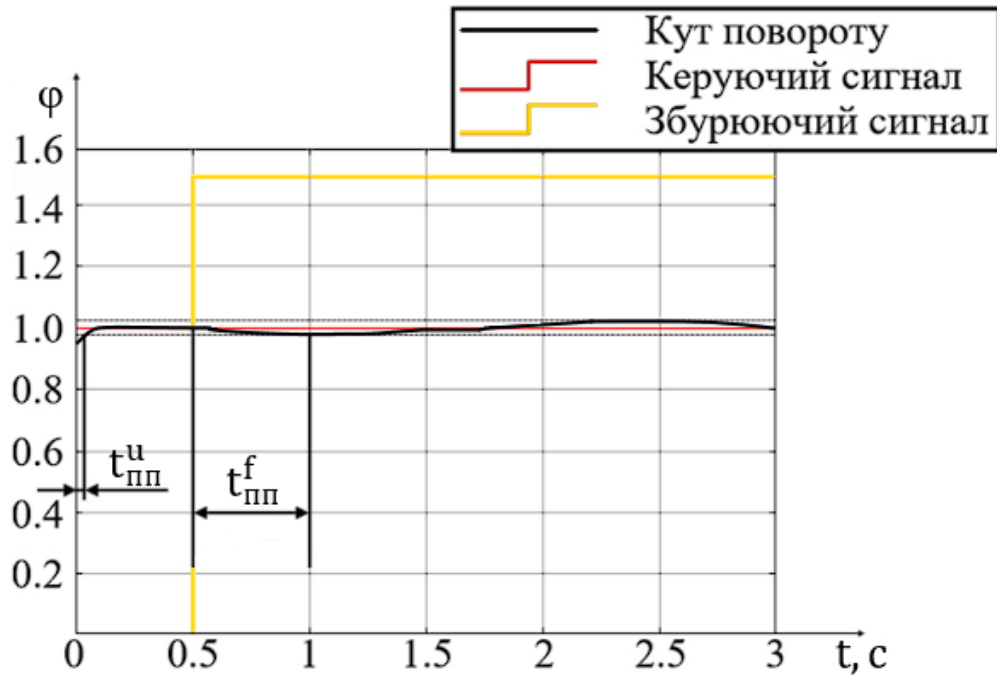


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу з перетвореним цифровим регулятором за ступінчастим одиночним керуючим впливом

Отримані показники якості системи з цифровим КЕ представлені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Показники якості скоригованої з цифровим КЕ системи

№ п/п	Тип впливу	Час перехідного процесу ($t_{пп}$), с	Перерегулювання (σ), %	Статична помилка ($\epsilon_{ст}$), рад	Запас стійкості за амплітудою (L_3), дБ	Запас стійкості по фазі (φ), °
1	Керуючий	0.055	0	0	25.6	∞
2	Збурюючий	0.58	0	0.097	-	-

З отриманих даних слід відмітити, що показники якості практично не змінились і відповідають вимогам, заданим в технічному завданні.

4.5 Висновки

У розділі проведені наступні завдання:

- Розрахунок КЕ за допомогою ЛАЧХ;
- Сформовані наявна, бажана та існуюча ЛАЧХ;
- Визначена передаточна функція коригуючого елемента;
- Досліджена система з введеним коригуючим елементом;
- Визначено, що показники якості скоригованої системи повністю задовільняють вимогам, зазначеним у технічному завданні;
- Визначений період квантування, після чого проведено перетворення аналогової передавальної функції в цифрову;
- Досліджена система з цифровим КЕ;
- Визначено, що основні показники якості системи з цифровим КЕ практично ідентичні результатам скоригованої системи.

Отримані результати даного розділу свідчать те, що система стала стійкою і не потребує додаткових кроків для стабілізації системи.

5 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

У конструкторській частині даної роботи проведена аргументація та опис усіх компонентів, які використовуються у даному проєкті. Також детальний проведений опис усіх задач, виконуємих основним комп'ютерним модулем. Проведений аналіз усіх даних, які поступають з камери і датчиків та оброблених вихідних сигналів, які поступають на двигуни. Проведено обґрунтування усіх обраних компонентів і представлені основні схеми, які використовувались для з'єднання компонентів.

5.1 Опис основного контролера та сигналів

У проєкті основним модулем, який лежить в основі комплексу, являється модуль Raspberry Pi Compute Module 4, який являється повноцінним комп'ютером, маючим в основі 4 повноцінних ядра, 4 Гб оперативної та 32 Гб постійної пам'яті. Даний модуль приймає сигнали, поступаючі з камер і датчиків гіроскопа/акселерометра, оброблює їх та подає сигнали для керування двигунами.

Основний вибір пав саме на Compute Module 4, оскільки з усіх моделей Raspberry, тільки у серії Compute Module є можливість використовувати стереопару. Порівнюючи з минулою версією, Raspberry Compute Module 4 має значно більшу обчислювальну потужність, яка знадобиться для швидкої обробки даних з камер, розрахунок дальності до перешкоди та побудови маршруту руху у режимі реального часу.

Сам процес об'їзду перешкоди роботизованим комплексом відбувається наступним чином:

1. Рух за заданим маршрутом
2. Ідентифікація перешкоди, засобами стереопари
3. Розрахунок дальності до перешкоди, використовуючи алгоритми
4. Створення карти глибини
5. Побудова маршруту об'їзду
6. Об'їзд перешкоди
7. Продовження руху за заданим маршрутом

5.2 Raspberry Pi Compute Module 4

Як і було сказано, у якості основного обчислювального модуля використовується Raspberry Pi Compute Module. Цей модуль базується на чотирьохядерному рішенні від ARM, з ядрами Cortex A72 і графічною підсистемою VideoCore VI з підтримкою OpenGL ES 3.0. Тактова частота кожного ядра складає 1.5 ГГц. Оперативної пам'яті може бути 1, 2, 4 та 8 Гб, сучасного типу LPDDR4 з частотою 3200 МГц. Постійної пам'яті може бути 8, 16 або 32 Гб типу eMMC, але також є простіша модель "Lite", де постійна пам'ять відсутня. Оскільки є підтримка гігабітного Ethernet порта, існує можливість швидко передати дані. У новій версії Raspberry Pi Compute Module з'явилась можливість використовувати відео кодек H265, який здатний високоефективно кодувати відеозображення, тобто працювати з відеофайлами у високому розширенні. Головною причиною вибору даного комп'ютерного модулю являється можливість працювати з двома камерами через два порта CSI – 2 у режимі реального часу, коли у схожого Raspberry Pi 4B така можливість відсутня. Raspberry Pi Compute Module також підтримує 2 виходи HDMI, які спроможні виводити відео з розширенням 4к (3840x2160 точок) при 60 кадрах у секунду. Також великою перевагою Compute Module 4 являється підтримка повноцінної шини PCI Express 2.0 (Gen 2 x1) з пропускною спроможністю 5 Гбіт за секунду, тобто є можливість підключення швидкісних накопичувачів NVMe. Існує декілька варіантів даного пристрою з та без використання Wi-Fi модулю, який побудований на основі Cypress CYW43455, який також підтримує Wi-Fi 2.4 та 5.0 Гц 802.11b/g/n/ac та Bluetooth версії 5.0. Додатково існує можливість підключення зовнішньої антени для збільшення зони прийому інтернету, швидкості і стабільності з'єднання. Підтримується 40 контактів, 28 з яких можуть працювати на вхід/вихід. Сам модуль Raspberry Pi Compute Module 4 підключається до плати-розширення через два нових 100 контактних роз'ємів – Hirose DF40C-100DS-0.4V Розмір модуля складає всього 55x40 мм. Робоча температура від 0 до 80°C.

Зовнішній вигляд модулю Raspberry Pi Compute Module 4 представлено на рисунках 5.1 та 5.2

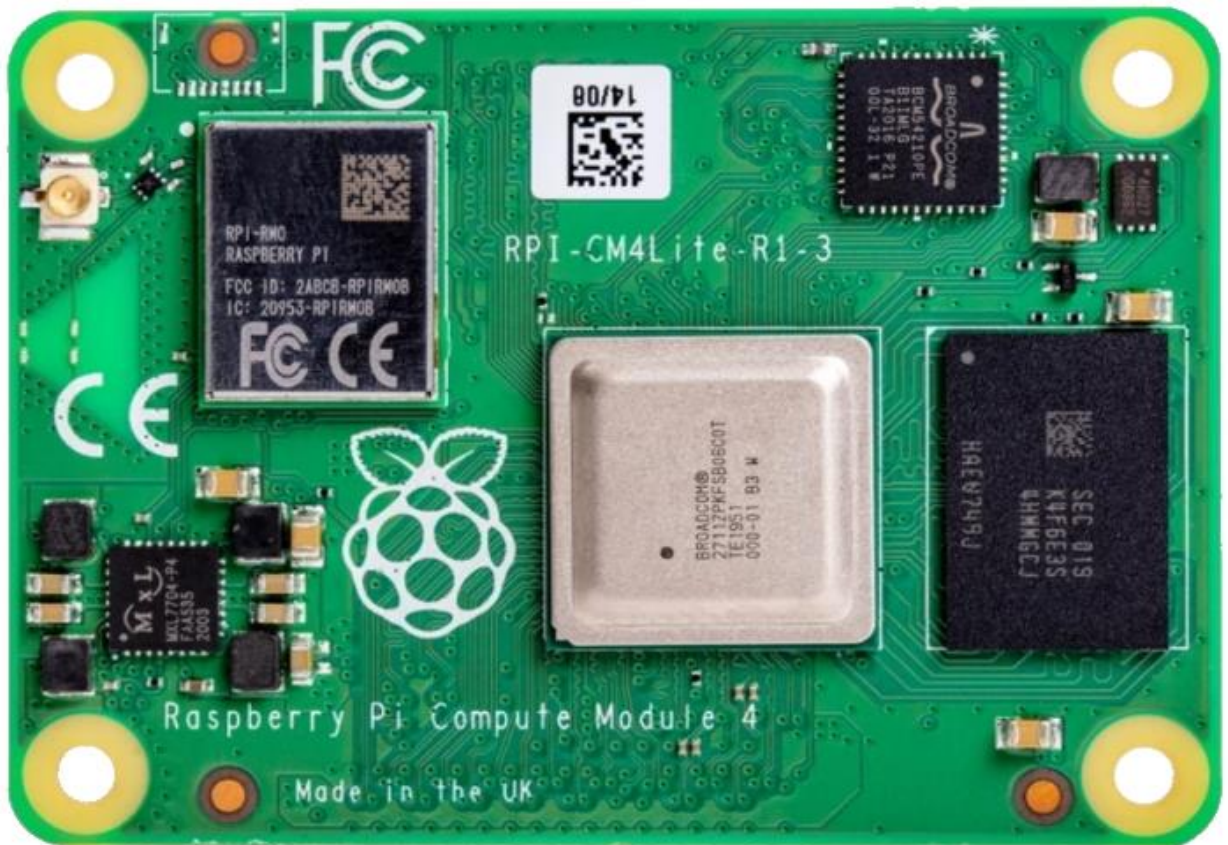


Рисунок 5.1 – Зовнішній вид Raspberry Pi Compute Module 4, вид зверху

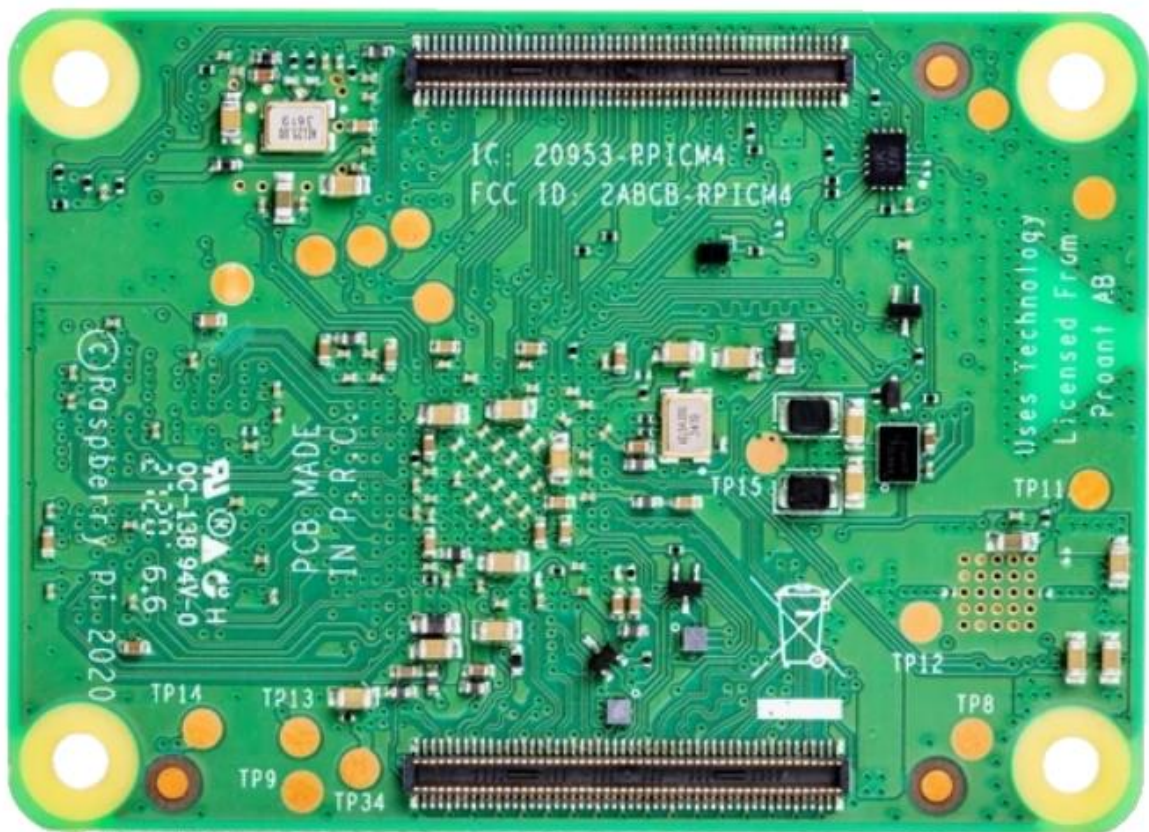


Рисунок 5.2 – Зовнішній вид Raspberry Pi Compute Module 4, вид знизу

5.3 Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board

У проекті розглядається Raspberry Pi Compute Module 4, який представляє собою модуль, на якому знаходяться процесор, пам'ять, графічна підсистема, модулі бездротового зв'язку, такі як Wi-Fi та Bluetooth. Для повноцінної роботи даного одноплатного комп'ютера необхідна спеціальна плата – розширення, на якій розміщені контакти і інтерфейси для прийому та передачі даних. Платою-розширенням була обрана Raspberry IO Board, оскільки ця плата є офіційною моделлю від розробника модулю. Плата-розширення обладнана 40 GPIO контактів, 28 яких відповідають за прийом/виведення сигналів (даних). Інтерфейс зв'язку GPIO і їх можливості представлені на рисунку 5.3

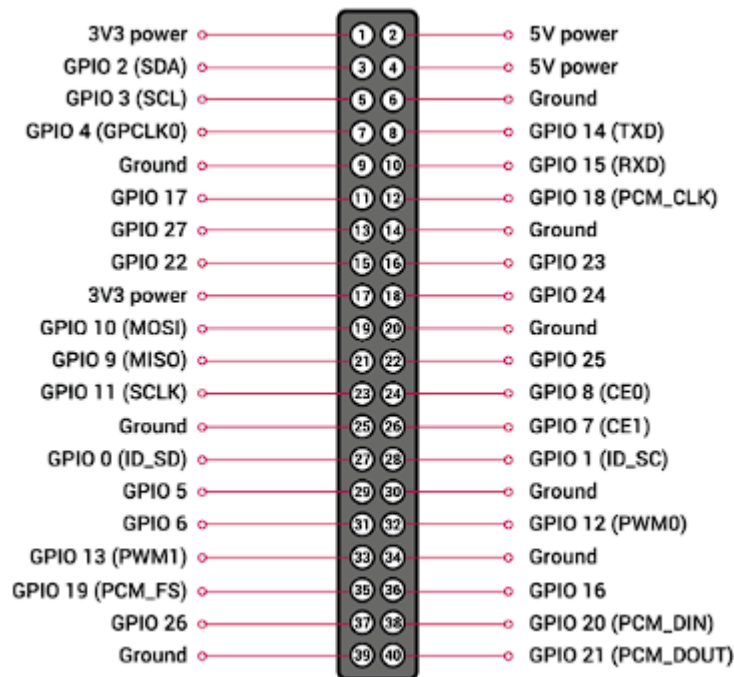


Рисунок 5.3 – GPIO Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board

Серед інших інтерфейсів, які використовуються у даній моделі також слід відмітити:

- DSI у кількості 2 штук, які підтримують вивід зображення на зовнішній монітор;
- CSI у кількості 2 штук, завдяки якому є можливість підключення 2 камер, що є необхідною умовою у даному проекті;
- HDMI у кількості 2 штук, для виводу зображення на сучасні монітори;
- Ethernet зі швидкістю передачі до 1 Гбіт у секунду;

- USB 2.0 у кількості 2 штук;
- Micro-USB порт, для підключення до комп'ютера;
- PCI-Express Gen 2.0.

Зовнішній вигляд плати-розширення Raspberry Compute Module 4 IO Board представлено на рисунку 5.4.

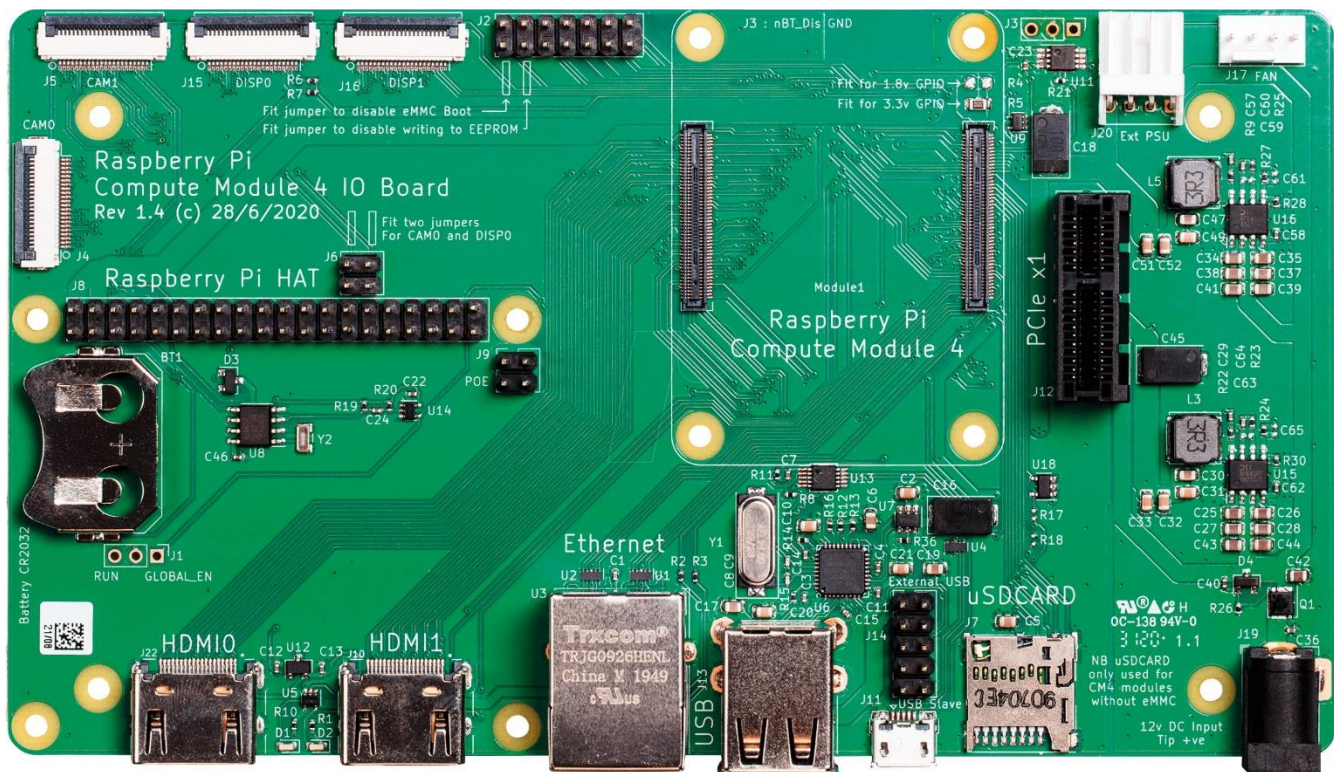


Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд плати-розширення Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board

Із додаткових можливостей, що виділяє саме цю плату слід відмітити наступне:

- Роз'єм живлення 12 та 5В;
- Роз'єм для MicroSD карт пам'яті (у разі використання Raspberry Pi Computer Module без вбудованої пам'яті, тобто версії Lite);
- Роз'єм для вентилятора з функцією регулювання швидкості обертання (4 пін) завдяки ШІМ;
- Вбудований годинник з автономною роботою від батарейки.

5.4 Корпус роботизованого комплексу

Для повної сумісності усіх компонентів, які використовуються у проекті прийнято рішення змоделювати корпус робота у середовищі для 3D моделювання. Завдяки змодельованій моделі є можливість створити корпус практично на будь-якому 3D принтері, що дуже позитивно сказиться на вартості готового продукту та кількості випускаемого продукту. У якості основного матеріалу для корпусу був обраний PETG пластик, оскільки він має наступні переваги:

- Надійність;
- Міцність;
- Довговічність;
- Прекрасні адгезивні властивості;
- Простий під час друку;
- Відсутня кристалізація під час нагріву
- Нетоксичний;
- Екологічний;
- Бюджетний.

Для кріплення компонентів використовуються бовти та гайок М3х1. Середовищем, де проводилось моделювання корпусу являється Tinkercad, засобів яких достатньо для проектування простих конструкцій. Сам корпус ділиться на 2 частини: основна платформа, на якій розташовані основні компоненти (Raspberry Pi Compute Module, Raspberry IO board, акумулятори NCR 18650B, драйвера TB6612FNG, BMS 2S, DC – DC перетворювач, модуль з датчиками акселерометра та гіроскопа MPU6050, порт для зарядки DC2250, та двигуни постійного струму), та додаткова, на якій розміщені Raspberry Pi Camera, які утворюють стереопару.

Змодельовані елементи корпусу представлені на рисунках 5.5 – 5.8.

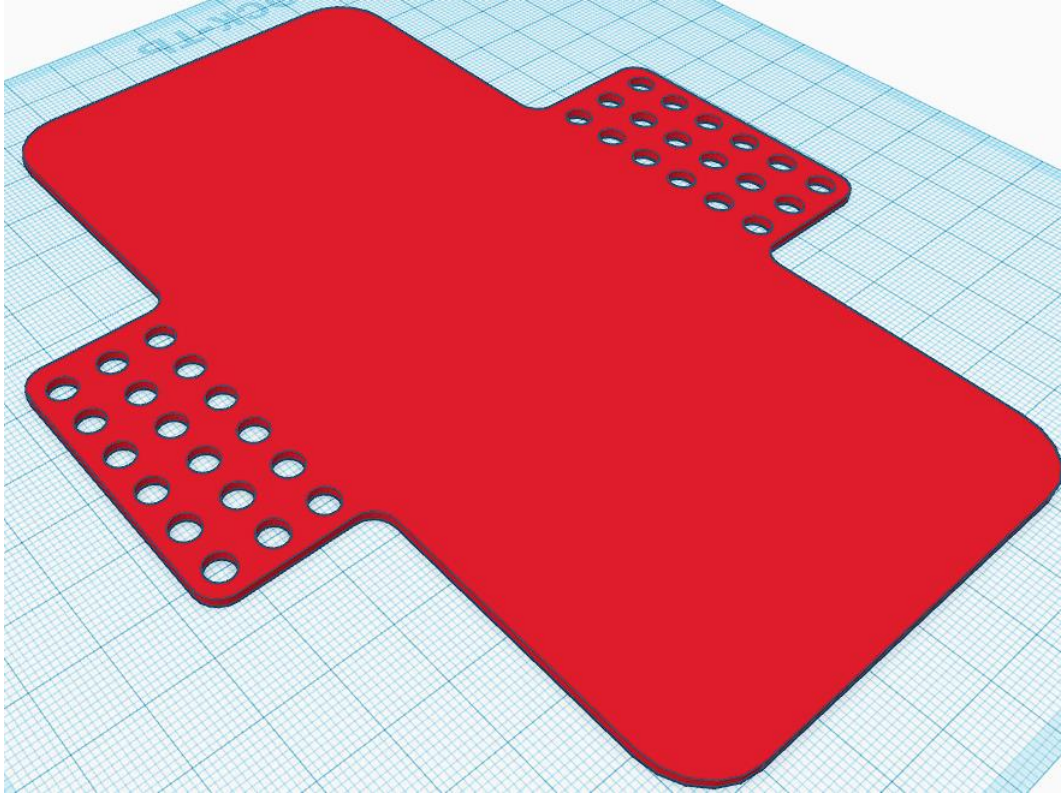


Рисунок 5.5 – Основна платформа, вид збоку

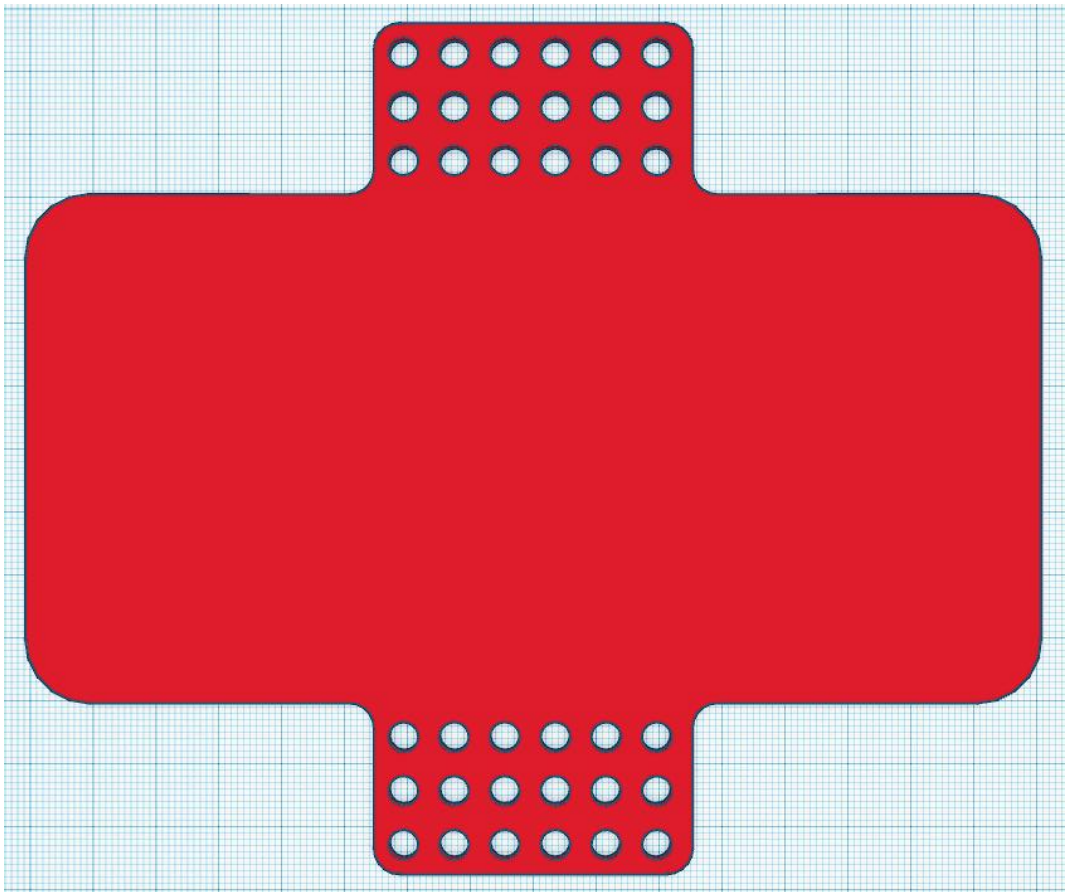


Рисунок 5.6 – Основна платформа, вид зверху

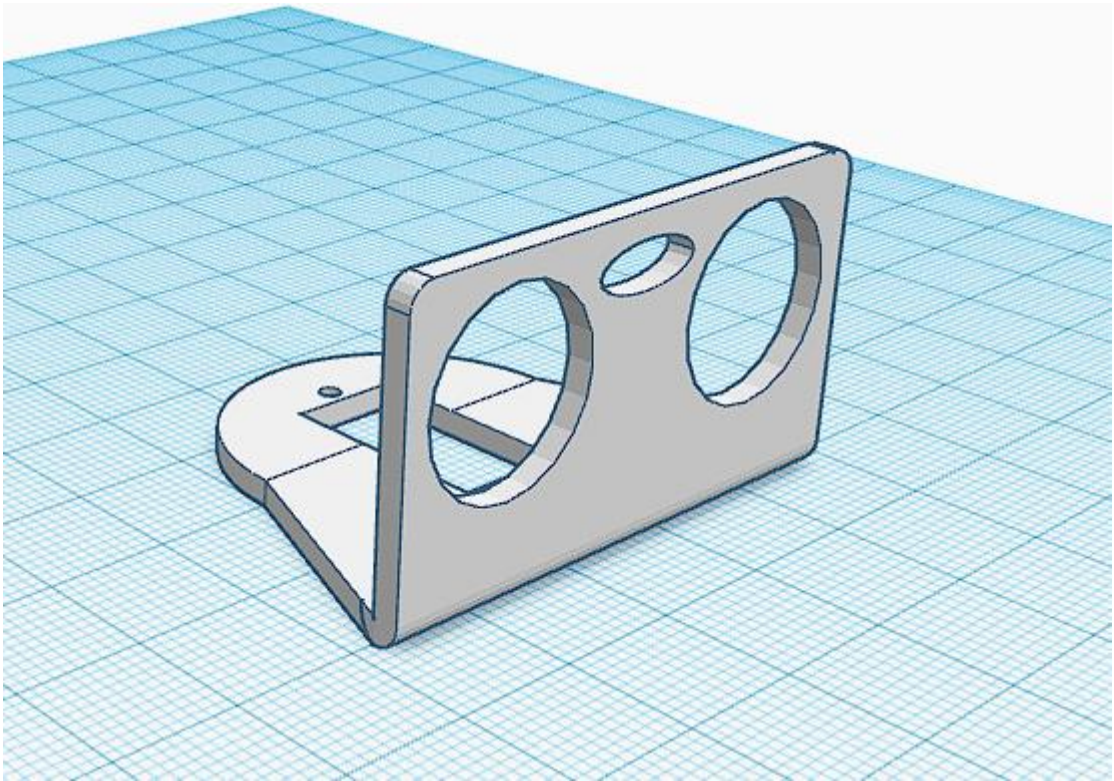


Рисунок 5.7 – Додаткова платформа, вид збоку

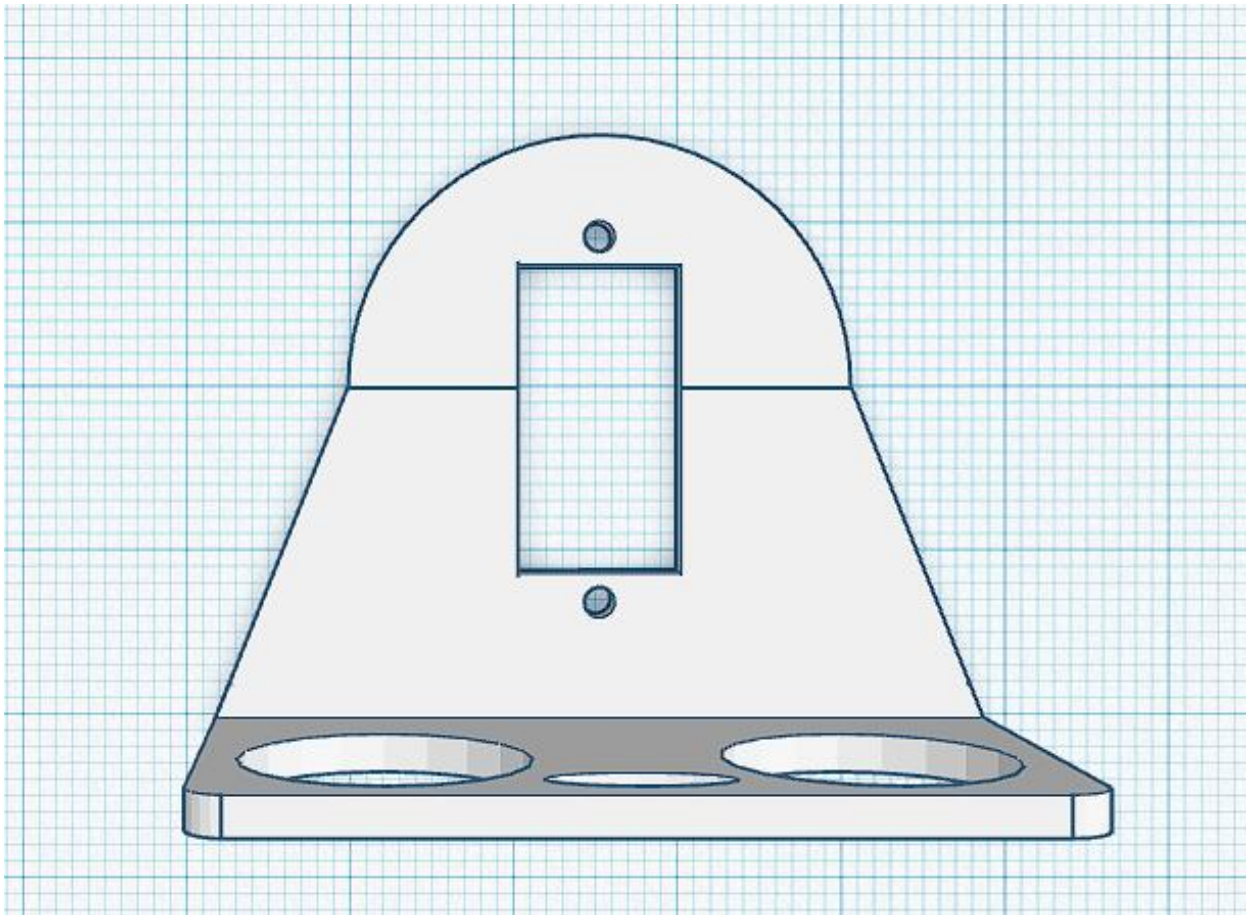


Рисунок 5.8 – Додаткова платформа, вид зверху

5.5 Драйвер TB6612FNG

Модуль драйверу, який побудований на основі мікросхеми TB6612FNG, слугує для керування двигунів. Електродвигун споживає завелику силу струму, яку неспосібний видати порт Raspberry, тому між двигуном та комп'ютером установлюється підсилювач потужності, яким і виступає даний драйвер. Даний модуль здатний не тільки одночасно керувати двома двигунами, але ще має наступні режими: рух вперед/назад, гальмування, стоп та очікування. Також слід відмітити підтримку широтно-імпульсної модуляції, завдяки якій є можливість регулювати швидкість обертання колес, відповідно і швидкість руху. Дана можливість знадобиться для коректного об'їзду перешкод. Технічні характеристики представлені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики драйверу на основі мікросхеми TB6612FNG

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Робоча напруга	4.5 – 13.5	В
2	Вихідна напруга	2.7 – 5.5	В
3	Вихідний струм	2	А
4	Максимальний струм	3.2	А
5	Частота ШІМ	До 100	КГц
6	Робоча температура	-20 – 80	°С
7	Габаритні розміри	20x17	мм

Зовнішній вигляд драйверу TB6612FNG представлений на рисунку 5.9.

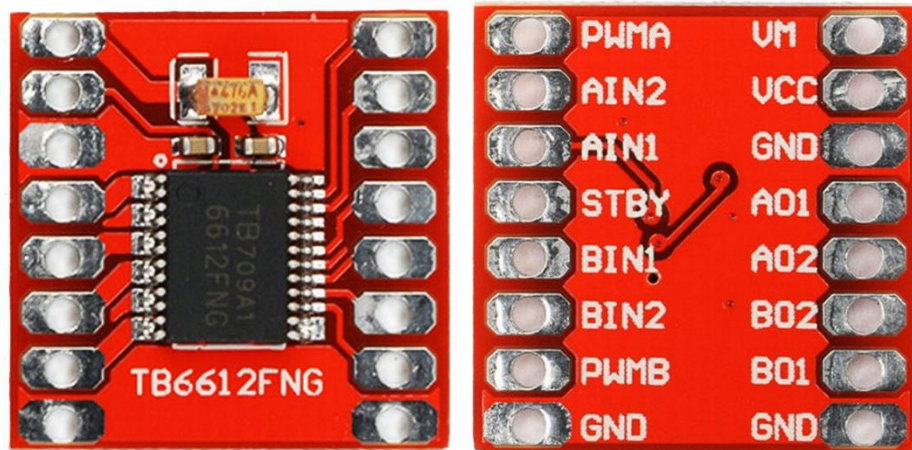


Рисунок 5.9 – Зовнішній вигляд драйверу TB6612FNG

На рисунку 5.9 контакти відповідають за наступні функції:

- PWMA – вхід ШІМ сигналу, відповідаючий за швидкість обертання першого двигуна;
- PWMB – вхід ШІМ сигналу, відповідаючий за швидкість обертання другого двигуна;
- AIN1 – вхідний сигнал для керування обертанням двигуна за часовою стрілкою першого двигуна;
- AIN2 – вхідний сигнал для керування обертанням двигуна проти часової стрілки першого двигуна;
- BIN1 – вхідний сигнал для керування обертанням двигуна за часовою стрілкою другого двигуна;
- BIN2 – вхідний сигнал для керування обертанням двигуна проти часової стрілки другого двигуна;
- STBY – вхідний сигнал для переходу двигунів у режим паузи;
- VM – вхід напруги живлення;
- VCC – вхід для живлення логічної частини драйверу;
- GND – земля;
- A01 – вихідний сигнал для керування обертанням двигуна за часовою стрілкою першого двигуна;
- A02 – вихідний сигнал для керування обертанням двигуна проти часової стрілки першого двигуна;
- B01 – вихідний сигнал для керування обертанням двигуна за часовою стрілкою другого двигуна;
- B02 – вихідний сигнал для керування обертанням двигуна проти часової стрілки другого двигуна.

5.6 Датчик акселерометру і гіроскопу MPU6050

MPU6050 використовує схему GY-521, у якій розмістились акселерометр, гіроскоп і навіть термометр. Гіроскоп слугує для виміру кутової швидкості, а акселерометр – зміну лінійних прискорень. При використанні цих датчиків є можливість визначення положення тіла у просторі.

Кожна може видавати 16-бітне значення (тобто значення можуть бути від -32768 до 32767) на кожную вісь, що надає високу точність і чутливість. Саме із-за цього, для коректної роботи, необхідно вводити програмні фільтри (які будуть фільтрувати різкі піки) і забезпечити стабільне та якісне живлення модулю. Для передачі даних у модулі використовується послідовна шина даних I²C, яка забезпечує передачу великої кількості даних за одиницю часу.

Зовнішній вигляд датчика гіроскопа і акселерометра представлений на рисунку 5.10.

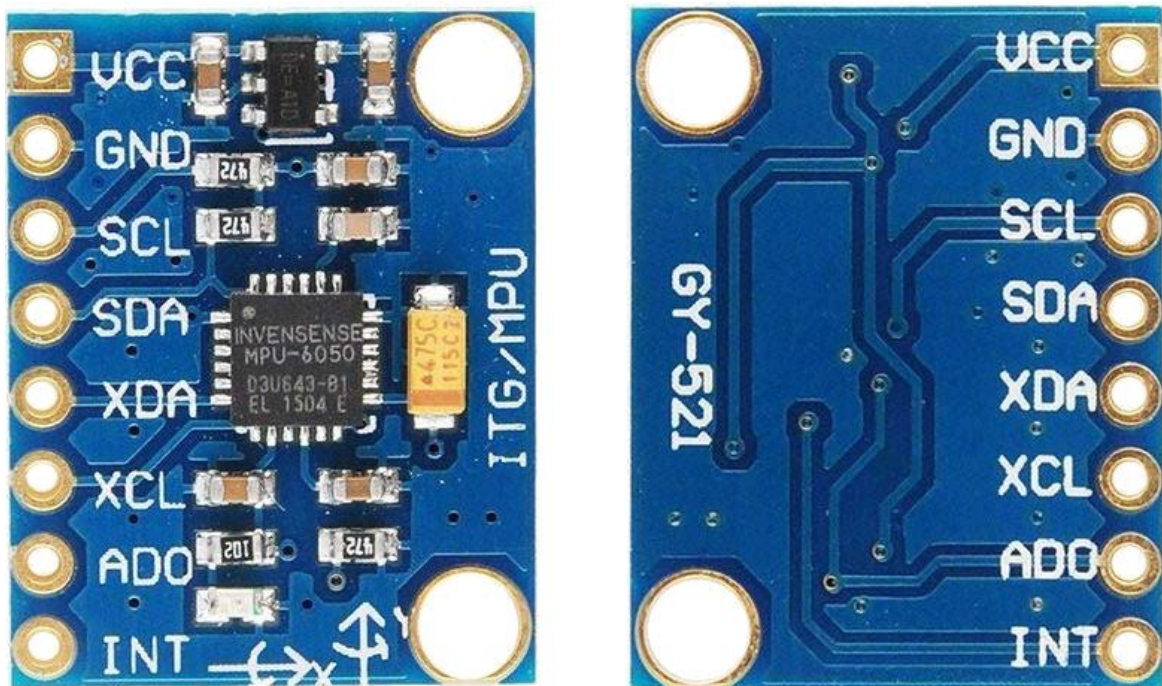


Рисунок 5.10 – Зовнішній вигляд датчика акселерометра і гіроскопу

На рисунку 5.10 контакти відповідають за наступні функції:

- VCC – вхід для живлення (може працювати при напрузі 3.3 і при 5В);
- GND – земля;
- SCL і SDA – шина даних протоколу I²C;
- XDA і XCL – шина даних протоколу I²C, у разі роботи з магнітометром;
- ADO – нульовий біт адресу I²C;
- INT – зовнішнє переривання.

Технічні характеристики датчика гіроскопу і акселерометру MPU6050 представлені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики модуля MPU6050

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Робоча напруга	3.7 – 5.5	В
2	Споживаючий струм у режимі сну	10	мА
3	Споживання струму датчиком гіроскопу	3.6 – 5	мА
4	Споживання струму датчиком акселерометру	0.35	мА
5	Частота інтерфейсу I2C	400000	Гц
6	Режим точності гіроскопа	±250	°/с
7	Режим точності акселерометра	±2	g
8	Розміри	20x16	мм

Даний модуль був обраний саме із-за демократичної ціни, невеликих розмірів та високої точності, тобто він вийшов кращім, ніж конкуренти по основним параметрам.

5.7 Камера Raspberry Pi Cam v1.3

Основним датчиком, який і задає команди для об'їзду перешкоди являється пара камер Raspberry Pi Camera v1.3. Завдяки мові програмування Python і бібліотекам технічного зору, при використанні двох камер можливе створення карти глибини, яка дозволяє досить точно визначати дальність до перешкоди. Крім вищеописаного призначення, дана камера дає змогу працювати з фото/відео матеріалами у режимі реального часу. Для підключення Raspberry Pi Camera v1.3 до роз'єму CSI Raspberry Pi Computer 4 IO Board використовується спеціальний шлейф. Завдяки саме використанню CSI інтерфейсу швидкодія системи є більшою, оскільки немає обмежень швидкості передачі даних, як було би, при підключенні камер через інтерфейс USB. Камера обладнана досить великим розширенням і дає змогу фотографувати і знімати відео з високою чіткістю і з високою кадровою частотою.

Зовнішній вигляд Raspberry Pi Camera v1.3 представлений на рисунках 5.11 та 5.12.



Рисунок 5.11 – Зовнішній вигляд Raspberry Pi Camera v1.3, лицьова сторона



Рисунок 5.12 – Зовнішній вигляд Raspberry Pi Camera v1.3, зворотня сторона

Технічні характеристики камери Raspberry Pi Cam представлені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики камери Raspberry Pi Cam

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Розширення матриці OV5647	5	мега пікселі
2	Розширення фотозображення	2592 x 1944	пікселі
3	Підтримуючі формати відео	1080x1920/30 1280x720/60 640x480p/60 і 90	пікселів/кадрів у секунду
4	Розмір сенсора	1.4	дюйм
5	Розмір пікселя	1.4x1.4	мкм
6	Споживаючий струм у активному режимі	250	мАг
7	Габаритні розміри	25x20x9	мм
8	Вага	3	Грам

Вибір пав саме на камеру версії 1.3, оскільки старша версія відрізняється тільки більш високим розширенням, тобто готові фотографії і відео будуть більш чіткими. Але для обробки таких матеріалів необхідно виконати більше математичних операцій, тобто швидкість для обробки одного кадру буде значно довшою. Розширення камери першої версії (5 мега пікселів, сенсор OmniVision) буде найбільш оптимальною, оскільки втрати якості практично не має, а швидкість обробки буде на високому рівні, що необхідно при обробці даних з двох камер, та побудові карти глибини. Також слід відмітити, що розміри самого пікселя значно більше у v1.3, ніж у v2 (1.4x1.4 проти 1.12x1.12 мкм). Більші розміри пікселя можуть захватити більше світла, що дуже добре відобразиться при використанні роботизованого комплексу зі штучним світлом, чи у місцях з недостатньою освітленістю.

5.8 Електродвигуни

У роботизованому комплексі використовується 4 електродвигуна змінного струму. Ці двигуни мають досить великий крутний момент, оскільки використовується редуктор з коефіцієнтом 1:48. Такий високий коефіцієнт передачі забезпечуються пластиковими шестернями. Зовнішній вигляд електродвигуна представлено на рисунку 5.13.



Рисунок 5.13 – Зовнішній вигляд використовуваного електродвигуна

Технічні характеристики двигуна представлені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики камери двигуна

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Напруга живлення	6 – 8	В
2	Струм живлення	0.25	А
3	Крутний момент	1.2	КГ · см
4	Швидкість обертання у режимі холостого ходу	170	об/хв
5	Передаточне число редуктора	1:48	
6	Розміри	64x20x20	мм
7	Вага	28	грам

5.9 Всеспрямовані колеса

Всеспрямовані колеса (ще називають колесами Ілона чи Шведськими) завдяки своїй конструкції дозволяють рухатись у будь-якому напрямку. Конструктивно ці елементи виділяються вбудованими роликками, які знаходяться під кутом 45° , відносно вісі колеса. Завдяки індивідуальному керуванню колес і зміні напруги (тобто швидкості обертання) можна заставити рухатись у будь-якому напрямку: вперед, назад, обертання, по-діагоналі, вліво-вправо. Кількість роликків може бути різною, у розглядаємому проекті колесо має 8 прорезинових роликків. Треба також зазначити, що роликки повинні бути направлені у одну сторону на протилежній стороні. Зовнішній вигляд даних колес представлено на рисунку 5.14.



Рисунок 5.14 – Зовнішній вигляд всеспрямованих колес

Приклад руху роботизованої платформи, використовуючи дані всеспрямовані колеса представлені на рисунку 5.14.

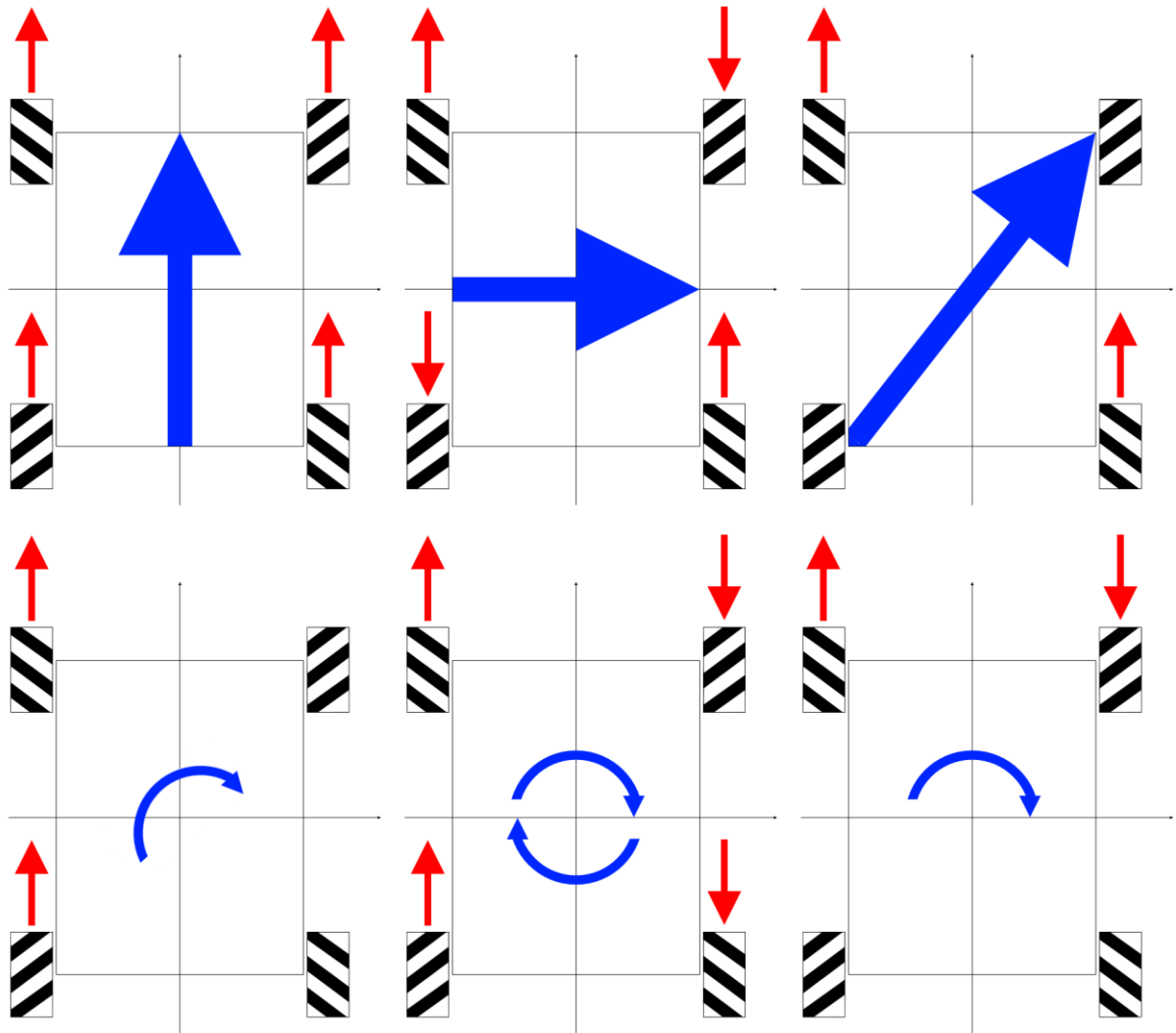


Рисунок 5.14 – Приклад руху роботизованого комплексу при різних сценаріях користування

На рисунку 5.14 представлені основні типи, як може рухатись колісний робот з вбудованими всеспрямованими колесами. Серед них слід відмітити рух вперед-назад, обертання навколо своєї осі, розворот на місці, але найбільш цікавими залишаються рух вправо-вліво (при подачі на діагональні пари двигунів однакового сигналу керування) та діагонального руху (при подачі однакового сигналу тільки на одну пару колес, які розташовані по-діагоналі). Завдяки даним колесам вирішується проблема з реалізацією об'їзду перешкод в умовах обмеженого місця.

5.10 Система живлення

Для живлення роботизованого комплексу діє ціла система, яка забезпечує неперервну роботу. Основні компоненти, які задіяні у системі живлення:

- Акумулятори типорозміру 18650;
- Battery Manager System 2S;
- DC – DC перетворювач.

Безпосередньо елементом живлення являється акумулятори 18650, цей вибір оправданий поширенням даних елементів живлення, бюджетною ціною і високою ємкістю. Із мінусів усіх типів акумуляторів слід відмітити небезпеку, при неправильній експлуатації, деградацію ємкості та необхідність стежити за показаннями, щоб акумулятор не вийшов зі строю.

У якості елементів живлення були обрані акумулятори від Panasonic – NCR18650, які мають найбільшу ємкість серед конкурентів. Зовнішній вигляд яких представлено на рисунку 5.15.



Рисунок 5.15 – Зовнішній вигляд акумулятору Panasonic NCR18650.

Технічні характеристики акумулятора NCR1850, які використовуються у проєкті представлені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики акумулятора Panasonic NCR18650

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Мінімальна/заявлена ємкість	3250/3400	мАг
2	Напруга мінімальна/номінальна/максимальна	2.5/3.7/4.2	В
3	Максимальний струм заряду/розряду	1.6/4.7	А
4	Розмір	18x65	мм
5	Вага	47	Грам

Для усунення усіх проблем, які зв'язані з використанням акумуляторів використовуються спеціальні плати, які стежать за рівнем напруги на кожному акумуляторі. Це дозволяє не перезаряджати і не доводити акумулятор до глибокого розряду. Зовнішній вигляд плати BMS 2S представлено на рисунку 5.16

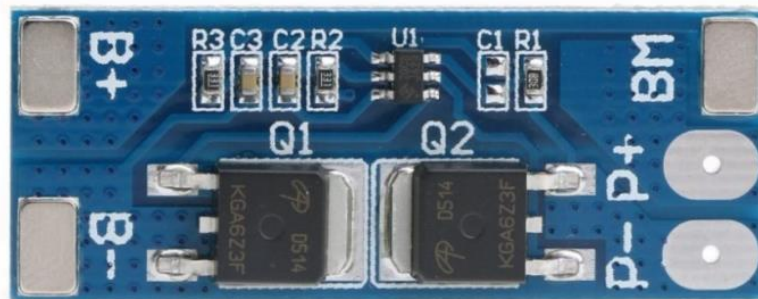


Рисунок 5.16 – Зовнішній вигляд плати BMS 2S

На рисунку 5.16 контакти відповідають за наступні функції:

- B+ – «+» контакт з другого акумулятора;
- B- – «-» контакт з першої акумулятора;
- VM – спільний контакт, який поєднується між першим та другим акумулятором;
- P+ – контакт для живлення з позитивним потенціалом;
- P- – контакт для живлення з негативним потенціалом.

Схема підключення акумуляторів до плати BMS зображена на рисунку 5.17.

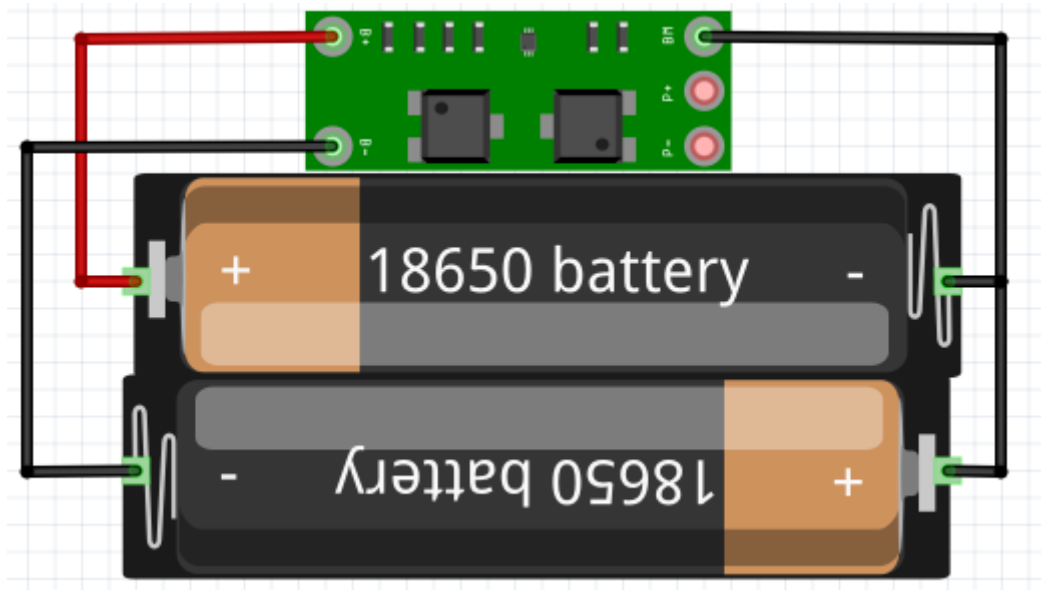


Рисунок 5.17 – Схема підключення акумуляторів до плати захисту BMS 2S

Технічні характеристики BMS 2S представлені у таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики плати BMS 2S

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Діапазон напруги, коли спрацьовує захист від перезаряду	4.25 – 4.35	В
2	Діапазон напруги, коли спрацьовує захист від розряду	2.3 – 3.0	В
3	Діапазон напруги живлення	8.4 – 9.0	В
4	Максимальний робочий струм	8	А
5	Діапазон робочої температури	-40...50	°С
6	Розміри плати	41x16	мм

Оскільки вихідна напруга з плати BMS є зовеликою, то є необхідність її змінити. Для цієї задачі використовується DC – DC перетворювач, який призначений для перетворення вхідної постійної напруги на постійну напругу на виході. Велика кількість конверторів має досить великий діапазон вхідної напруги, що дозволяє використовувати їх для забезпечення постійної напруги, незалежно від зміни значення напруги, яка з часом стає меншою із-за розряду

акумуляторів. Зовнішній вигляд DC – DC перетворювача представлено на рисунку 5.18.

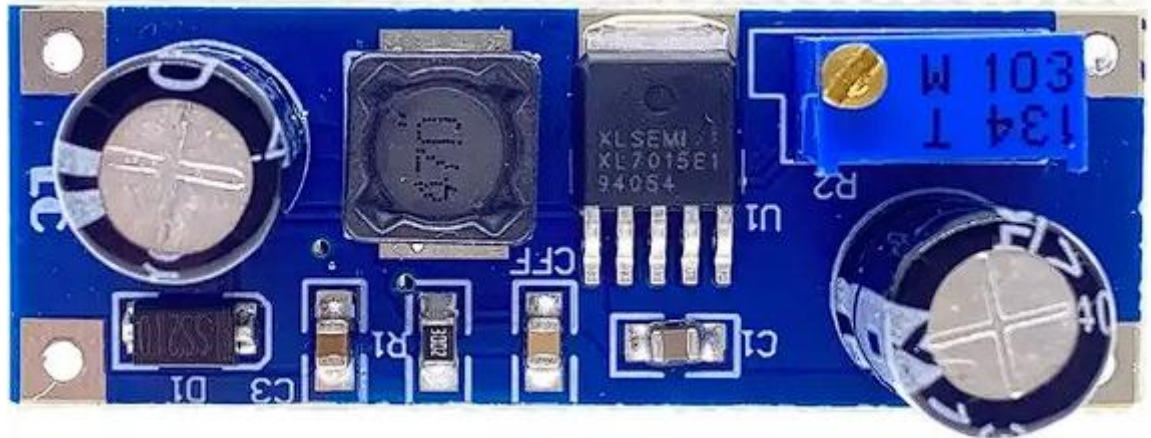


Рисунок 5.18 – Зовнішній вигляд плати DC – DC перетворювача

Технічні характеристики плати представлено у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Технічні характеристики плати DC – DC перетворювача

№ п/п	Характеристика	Значення	Одиниці виміру
1	Вхідна напруга	4.5 – 40	В
2	Вихідна напруга	3 – 35	В
3	Вихідний струм	2	А
4	Частота перемикання	150	кГц
5	Ефективність перетворення	92	%
6	Діапазон робочої температури	-40...85	°С
7	Розміри плати	44x22	мм

DC – DC перетворювач встановлюється між платою BMS та споживачами у вигляді комп'ютера Raspberry та двигунів (а саме драйверу). Перед установкою необхідно задати вихідну напругу на значенні 5В, обертаючи ручку потенціометра. Для контроль вихідної напруги необхідно встановити тестер на вихідні контакти та стежити за рівнем напруги.

5.11 Загальна схема колісного робота

Raspberry Pi Computer Module являється основним компонентом до якого під'єднуються усі датчики та модулі. На Raspberry Pi Computer Module 4 IO Board знаходяться 28 контактів які відповідають за величезний спектр можливостей. Для підключення камер використовується спеціальний шлейф та коннектор CSI, який дозволяє максимально швидко та ефективно передавати дані з камери на основний контролер. Також слід відмітити те, що для підключення датчиків акселерометру та гіроскопу використовуються спеціальні контакти SDA і SCL, які використовують шину I²C.

На рисунку 5.19 представлена з'єднання усіх елементів, які використовуються у проекті.

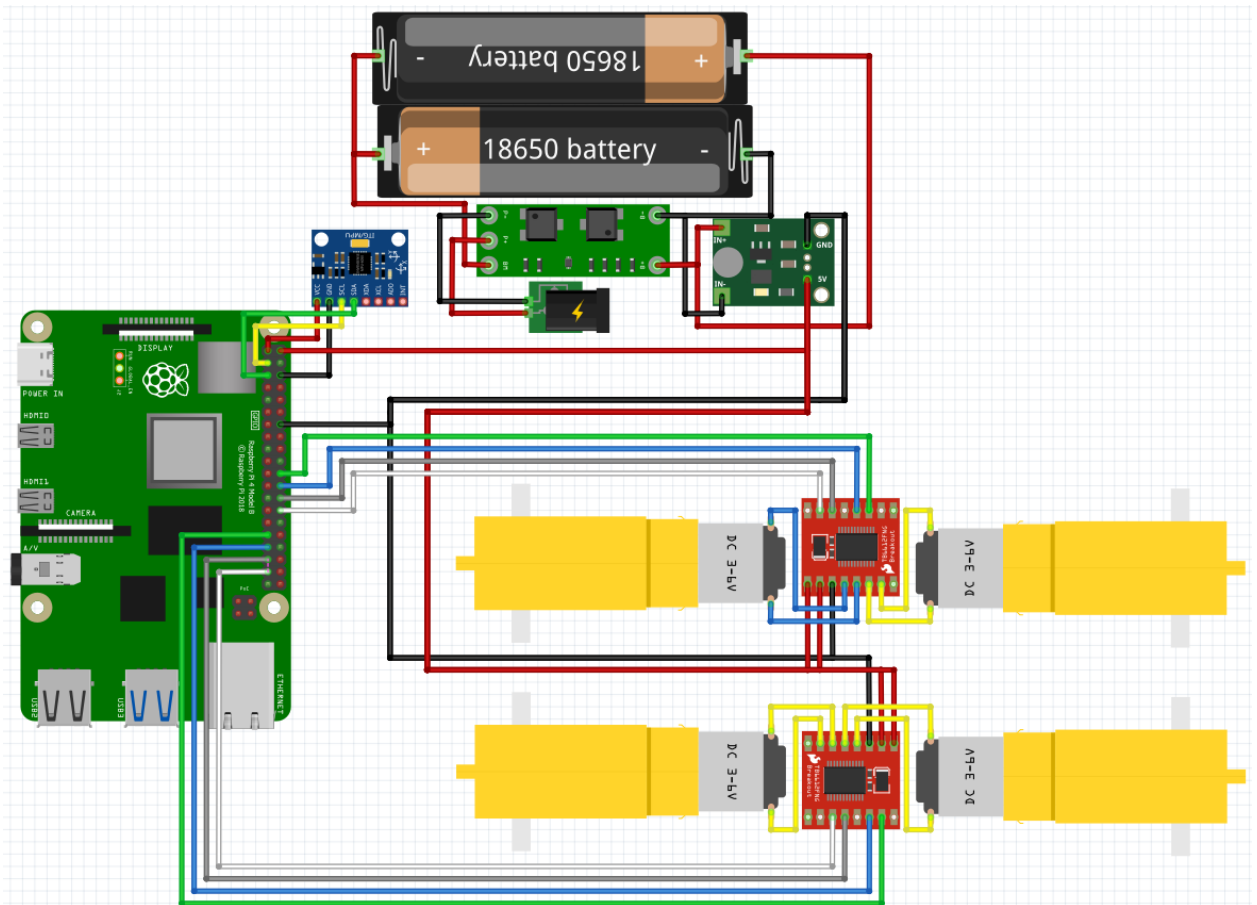


Рисунок 5.19 – Схема з'єднання усіх елементів

Оскільки у бібліотеці програмного середовища Fritzing відсутні такі елементи як шлейф для підключення камери до Raspberry Pi Compute Module 4, сама плата-розширення та камери, то дані компоненти не були зображені на схемі. Raspberry Pi Compute Module 4 був замінений на Raspberry Pi 4B.

Надалі представлена електрична принципова схема розроблюемого колісного робота, яка представлена на рисунку 5.20

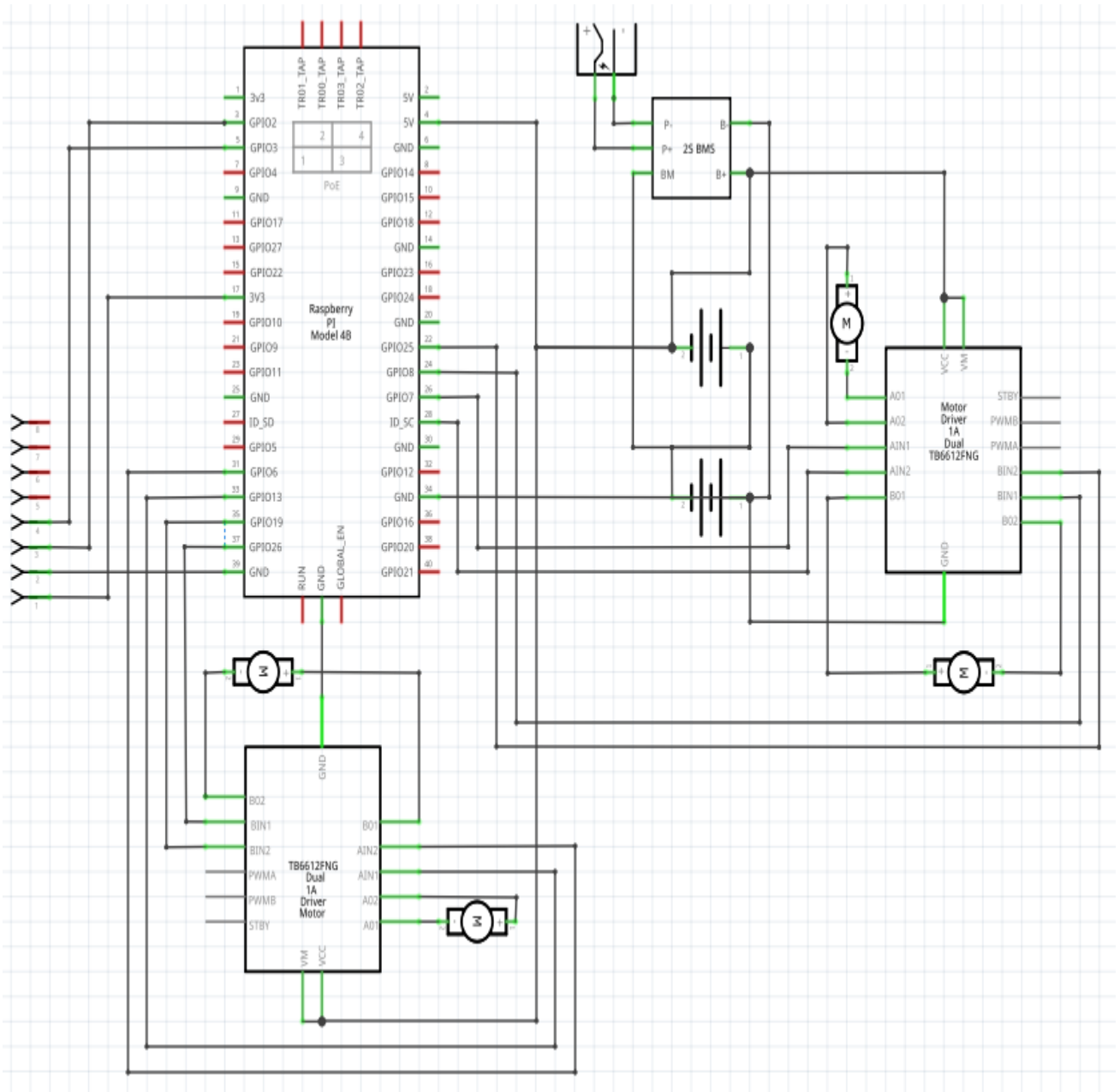


Рисунок 5.20 – Принципова електрична схема розроблюемого робота

Як і у минулому випадку, оскільки у бібліотеці компонентів відсутні деякі компоненти, вони були замінені схожими (Raspberry Pi Computer Module 4 та Raspberry Pi Computer Module 4 IO Board – на Raspberry Pi 4B) чи відсутні (камера підключається по спеціальному інтерфейсу – Camera Serial Interface)

5.12 Висновки

У розділі виконані наступні завдання:

- Обґрунтований вибір основного контролера та сигналів, для взаємодії з датчиками;
- Описані основні можливості основного контролера та плати розширення;
- Приведені елементи, з яких складається корпус мобільного роботу, які були змодельовані у середовищі Tinkercad;
- Аргументований вибір драйверів для двигунів;
- Проведений опис модуля MPU6050, який має датчики гіроскопу та акселерометру;
- Обґрунтований вибір Raspberry Pi Camera same версії v1.3;
- Описані електродвигуни, які використовуються у проекті;
- Обґрунтований вибір всепрямованих колес та показаний усі види руху колісного при подачі сигналів на певні двигуни;
- Проведений огляд усіх елементів, які використовуються для живлення системи;
- Представлені схеми з'єднання компонентів та принципіальна схема.

У результаті виконання даного розділу фактично є модель робота без системи управління.

6 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

У технологічній частині проведено перевірка усіх використовуваних датчиків та виконавчих механізмів.

6.1 Перевірка Raspberry Pi Compute Module 4 та IO Board

Перед початком тестування Raspberry Pi Compute Module 4 на комп'ютер необхідно установити фірмове програмне забезпечення Raspberry OS. Оскільки у розглядаємої моделі 4 Гб оперативної пам'яті, програмне забезпечення було обране 64-х бітне.

Перед початком завантаження операційної системи у одноплатний комп'ютер необхідно під'єднати перемичку на контактній площадці J2, яка відповідає за відключення режиму завантажувача з пам'яті (Disable eMMC Boot), фотографія якого представлена на рисунку 6.1.

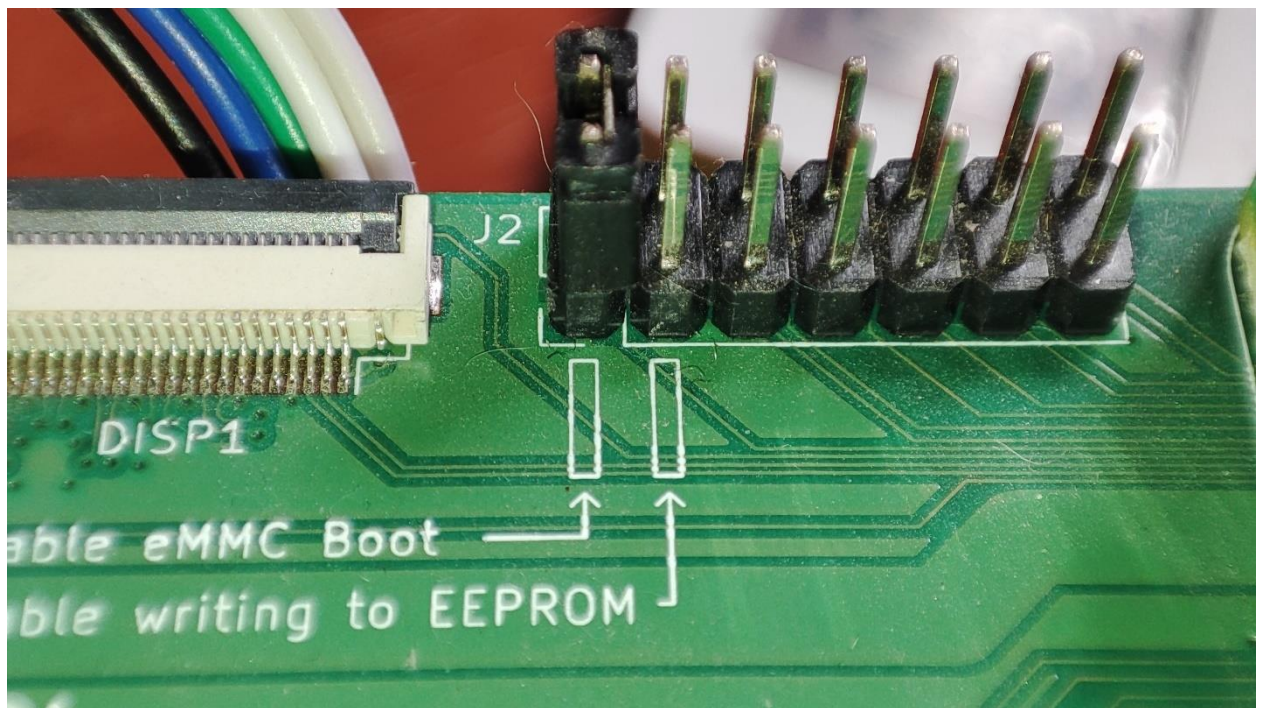


Рисунок 6.1 – Ввімкнення перемички для переходу у режим загрузчика

Наступним кроком буде під'єднання кабелю Micro-USB до Raspberry, у якому присутні лінії DATA, для передачі даних з комп'ютера та кабелю живлення DC5525 з стабільної напругої на виході 12В. фотографія підключення компонентів представлена на рисунку 6.2

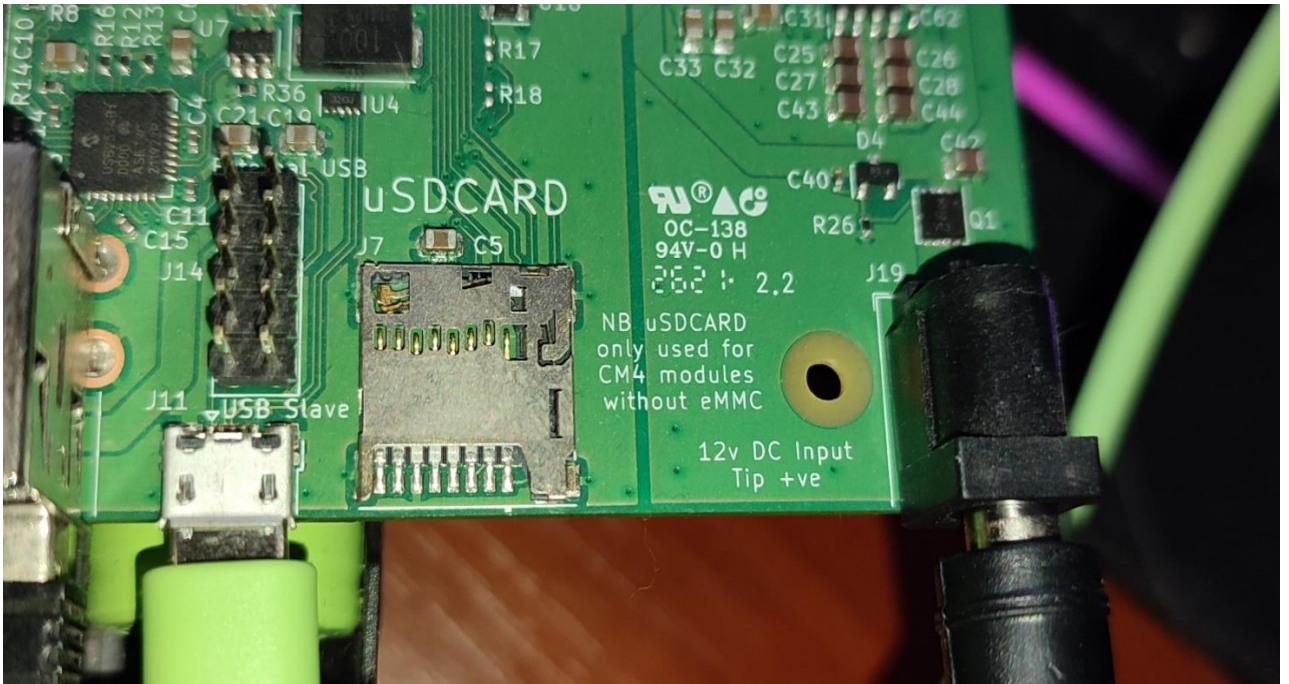


Рисунок 6.2 – Підключення елементів живлення та передачі даних

Для індикації завантаження комп'ютера, на платі розширення маютьс я світлодіоди зеленого та червоного кольорів. Світлодіод червоного кольору (D1) відповідає за завантаження усїєї плати, зелений (D2) – за завантаження операційної системи у комп'ютер. Відображення процесу запуску представлено на рисунку 6.3.

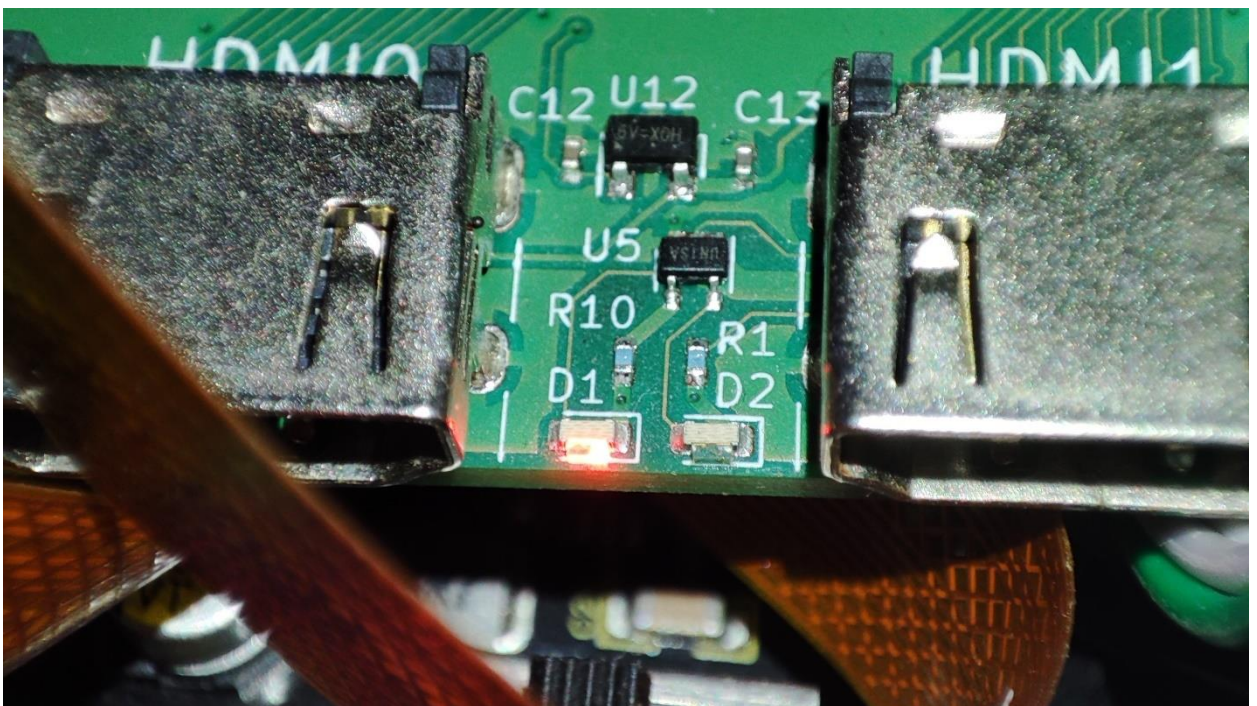


Рисунок 6.3 – Індикація роботи Raspberry Pi Compute Module 4 IO Board

Після підключення кабелів на основному комп'ютері необхідно скачати репозиторій Raspberry Pi USBBoot, завдяки якому відобразиться режим завантажувальника Raspberry. Далі внутрішній накопичувач буде відображатись як додаткова пам'ять. Наступним кроком проведена установка самої операційної системи на Raspberry, для чого з офіційного сайту була скачана програма для завантаження ОС. Після установки даного програмного забезпечення, у програмі обирається сама операційна система, у моєму прикладі використовується повноцінна 32-бітна офіційна операційна система від Raspberry. У якості накопичувача обирається RPI-MSD-0001. Після установки операційної системи необхідно від'єднати кабель Micro-USB, кабель живлення та перемичку. У разі виконання усіх дій у правильному порядку, при підключенні кабелю живлення комп'ютер буде запускатись. Для виводу зображення з комп'ютера на монітор використовується кабель з виходом HDMI.

Головне меню програмного забезпечення, яке слугує для установки операційної системи представлено на рисунку 6.4.



Рисунок 6.4 – Головне меню установника операційної системи

Головне меню самого комп'ютера з установленою Raspberry Pi OS зображено на рисунку 6.5.

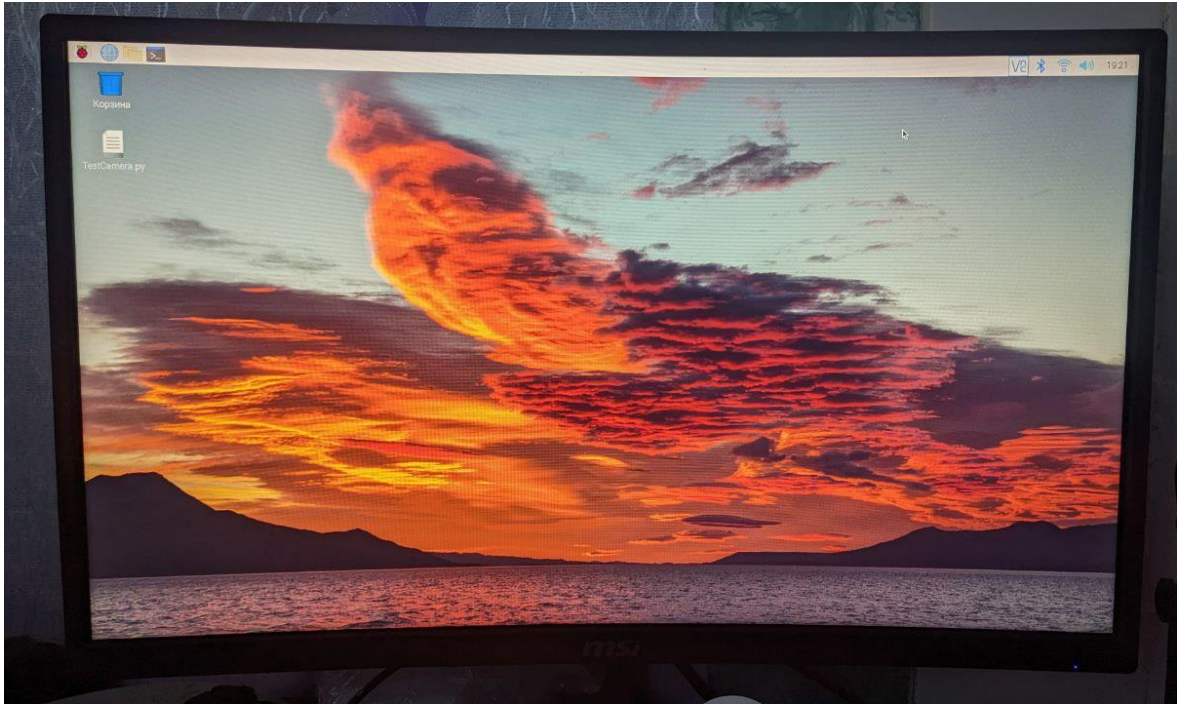


Рисунок 6.5 – Головне меню Raspberry OS

Для подальшої роботи з даним комп'ютером необхідно дозволити доступ на використання шини I²C, доступ CSI (для можливості підключення камер), та VNC. Для можливості роботи з стереопарою на мові програмування Python знадобляться наступні бібліотеки:

- OpenCV;
- PiCamera;
- Time;
- Numpy;
- Json;
- Datetime;
- RPi.GPIO;
- WiringPi;
- SmBus.

Після проведення усіх вищеперерахованих дій, комп'ютер повністю готовий до подальшої перевірки усіх компонентів.

6.2 Перевірка датчиків акселерометра і гіроскопа

Для перевірки датчиків акселерометра і гіроскопа, вбудованих у модуль MPU6050 використовувалась Raspberry Pi Compute Module. Конектори для живлення модулю використовувались контакти з плати. Оскільки датчики гіроскопу та акселерометру досить чутливі, то вони передають велику кількість даних. Для забезпечення стабільної та безперебійної роботи з даним модулем використовуються контакти з підтримкою послідовної шини I²C (GPIO 2 і GPIO 3). Приклад підключення датчиків гіроскопа та акселерометра для перевірки працездатності представлено на рисунку 6.6.

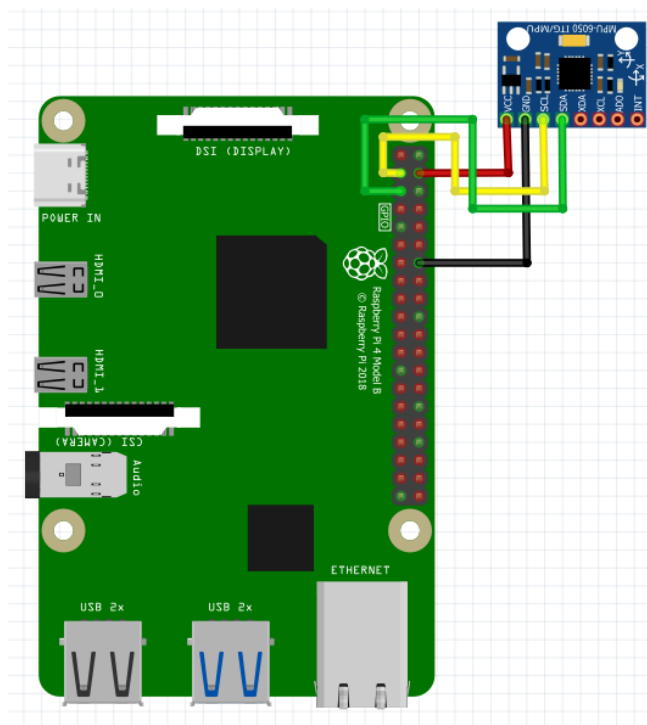


Рисунок 6.6 – Схема підключення датчиків акселерометру та гіроскопу до Raspberry

Після підключення датчиків гіроскопу та акселерометру на мові Python був написаний код, який зчитував показання модуля та виводив значення у середовищі Thonny IDE. Отримані результати виміру кутової швидкості та кутового прискорення представлені на рисунку 6.7. Програмний код програми зазначений у додатку Б.1.

```
gyro.py ✕
1 import smbus
2 import time
3
4 class mpu6050:
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
```

```
Shell
Ax:0.1173      Ay:-0.4788    Az:9.9168     Gx:0.7368     Gy:-0.0503    Gz:1.7252
Ax:0.1556      Ay:-0.5507    Az:10.9223    Gx:0.7360     Gy:-0.0386    Gz:1.2824
Ax:-0.0120     Ay:-0.7350    Az:10.2232    Gx:0.7377     Gy:-0.0496    Gz:2.1679
Ax:0.0168      Ay:-0.6057    Az:10.1394    Gx:0.7357     Gy:-0.0503    Gz:2.2137
Ax:-0.0479     Ay:-0.6201    Az:10.1610    Gx:0.7338     Gy:-0.0482    Gz:2.0153
Ax:0.0239      Ay:-0.5986    Az:10.3046    Gx:0.7346     Gy:-0.0481    Gz:2.1756
Ax:0.0311      Ay:-0.5866    Az:10.1490    Gx:0.7347     Gy:-0.0513    Gz:2.1069
Ax:0.0024      Ay:-0.6057    Az:10.2256    Gx:0.7350     Gy:-0.0523    Gz:2.4656
Ax:-0.1484     Ay:-0.5435    Az:10.0389    Gx:0.7357     Gy:-0.0505    Gz:1.7023
Ax:-0.0239     Ay:-0.4860    Az:10.4004    Gx:0.7363     Gy:-0.0431    Gz:2.3282
Ax:0.0072      Ay:-0.6081    Az:10.3908    Gx:0.7331     Gy:-0.0493    Gz:2.8550
Ax:0.8787      Ay:-1.1229    Az:11.2815    Gx:0.7043     Gy:-0.0531    Gz:-64.8702
Ax:-0.1197     Ay:-0.8021    Az:10.2831    Gx:0.7333     Gy:-0.0181    Gz:-18.9847
Ax:0.0144      Ay:-0.7183    Az:10.3118    Gx:0.7380     Gy:-0.0502    Gz:10.7786
Ax:0.1556      Ay:-0.4142    Az:9.9192     Gx:0.7388     Gy:-0.0280    Gz:4.0763
Ax:0.2131      Ay:-0.4645    Az:10.1227    Gx:0.7328     Gy:-0.0495    Gz:2.5725
Ax:0.1413      Ay:-0.8547    Az:10.2615    Gx:0.7347     Gy:-0.0682    Gz:2.5496
Ax:0.1077      Ay:-0.3328    Az:10.1849    Gx:0.7332     Gy:-0.0522    Gz:3.4580
```

Рисунок 6.7 – Результати виміру кутової швидкості та кутового прискорення датчиками гіроскопа і акселерометра

З отриманих даних можна зрозуміти місцезнаходження тіла у просторі, на якому встановлений датчик гіроскопу і акселерометру.

6.3 Перевірка драйверу TB6612FNG

Драйвер TB6612FNG дозволяє регулювати швидкістю обертанням колес, реалізовано це завдяки ШІМ сигналу (контакт PWMA). Оскільки для реалізації ШІМ необхідні таймери, а на апаратному рівні вони відсутні, програмним методом був реалізований таймер.

Швидкість обертання колес залежить від коефіцієнту заповнення. Від відсотку коефіцієнту заповнення пропорційно залежить середнє значення напруги ШІМ. Для приведення у рух комплексу, коефіцієнт заповненості повинен складати не менше 35%, оскільки при меншому значенні коефіцієнта заповненості двигунам недостатньо потужності для того, щоб комплекс почав рухатись. При збільшенні коефіцієнта заповненості швидкість руху роботизованого комплексу буде збільшуватись. Код для зитування

Приклад роботи широтно-імпульсної модуляції представлений на рисунку 6.8.

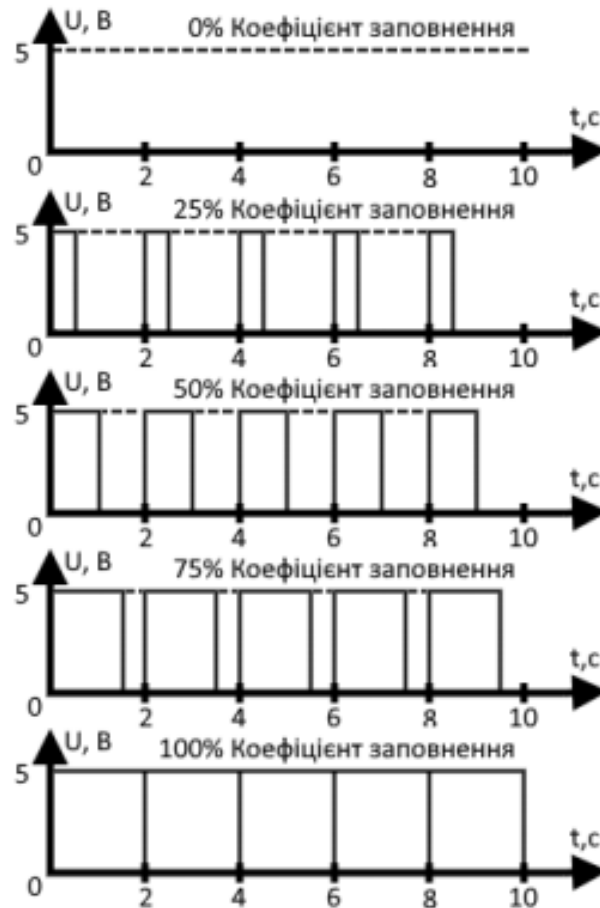


Рисунок 6.4 – Принцип роботи шірно-імпульсної модуляції

Використовуючи тахометр було виміряно кількість обертів колеса за хвилину, в залежності від коефіцієнту заповнення.

Таблиця 6.1 – Отримані значення обертів за хвилину колеса, згідно коефіцієнту заповнення ШІМ

№ п/п	Коефіцієнт заповнення, %	Кількість обертів за хвилину двигуна
1	0	0
2	25	0
3	50	49
4	75	139
5	100	184

6.4 Перевірка камер Raspberry Pi Camera v1.3

Для початку перевірки камери необхідно її під'єднати у спеціальний конектор CSI та надійно закріпити замок. При роботі з камерами необхідно бути дуже обережним, оскільки вони дуже схильні до впливу статички та можуть вийти зі строю. Після під'єднання камери у налаштуваннях системи необхідно ввімкнути підтримку роз'єму CSI. При коректній установці шлейфу та налаштувань на камері повинен спалахнути червоний світлодіод, як це показано на рисунку 6.5.



Рисунок 6.5 – Індикація роботи камери

Програмний код програми для того, щоб зробити фотографію зазначений у додатку Б.2. Результат у вигляді готової фотографії зображено на рисунку 6.6.

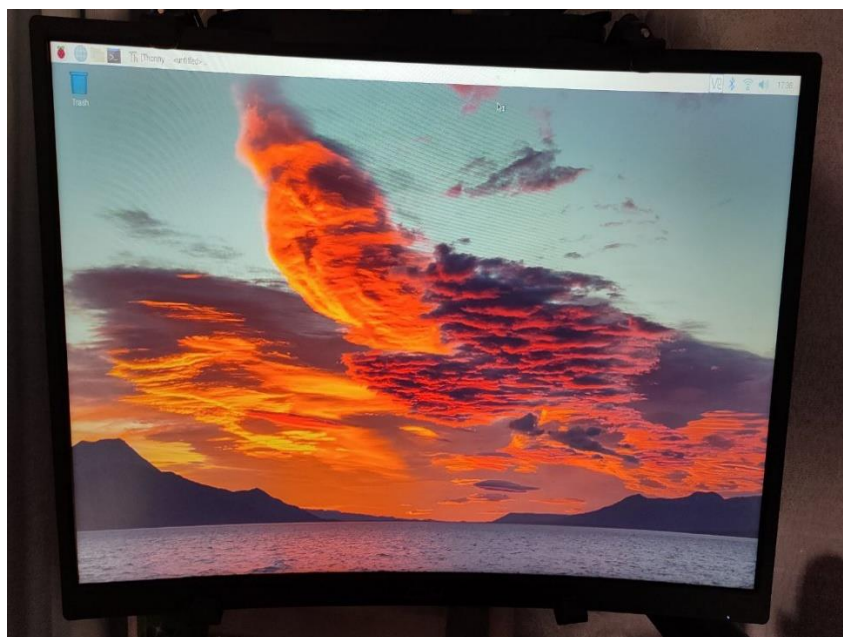


Рисунок 6.6 – Фотографія, зроблена на модуль Raspberry Pi Camera v1.3

Як можна було помітити, картинка залишається досить якісною і чіткою навіть у випадках недостатнього освітлення.

6.5 Висновки

У розділі виконані наступні завдання:

- Проведена установка операційної системи на Raspberry Pi Compute Module.
- Завдяки програмному коду перевірена працездатність модуля акселерометру та гіроскопу MPU6050
- Перевірена працездатність драйверу TB6612FNG та електродвигунів. Проведений замір швидкості обертання коліс при різних коефіцієнтів заповнення
- Налаштовані та перевірені модулі Raspberry Pi camera v 1.3.

Результати цього розділу свідчать про те, що конструкція робота повністю функціонує і готова до наступної роботи.

7 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

7.1 Задача експериментальних досліджень

У ролі дослідження проводилось натурне моделювання системи позиціонування роботизованого комплексу. Дослідження стосувалось датчиків акселерометру і гіроскопу, а саме отримання куту повороту платформи, калібрування стереопари та побудові карти глибини.

7.2 Розробка програмного забезпечення для визначення кута повороту роботизованого комплексу

Оскільки MPU6050 містить у собі датчики гіроскопу та акселерометру, завдяки яким є можливість розрахувати положення тіла у просторі. Акселерометр використовується для розрахунку зміни лінійного прискорення, коли гіроскоп – для розрахунку кутової швидкості. У парі ці датчики дають уявлення о поточному положенні платформи у просторі. Також слід відмітити надто високу чутливість датчиків, для усунення цієї проблеми можна використовувати фільтри, які будуть відсікати різкі піки. Прикладом цього фільтру може виступати реалізація програмним методом метода рухомого середнього. Результатом даних операцій є визначення куту повороту платформи. Вивід значення про кут повороту у середовищі Thonny представлено на рисунку 7.1.



```
1
2 import smbus
3
4 class mpu6050:
5
6     # Global Variables
7     GRAVITY_MS2 = 9.80665
8     address = None
```

```
Shell
>>> %Run mpu6050.py
0.5243301635742187
>>> %Run mpu6050.py
5.403713146972656
>>> %Run mpu6050.py
-1.599326708984375
>>> %Run mpu6050.py
-5.135562561035156
>>> %Run mpu6050.py
7.723694555664062
>>>
```

Рисунок 7.1 – Вивід інформації куту повороту платформи

Від’ємні значення характеризуються поворотом проти годинникової стрілки, позитивні – за. Значення даних приведені у градусах.

7.3 Калібрування стереопари та побудова карти глибини

Стереозір – один з методів вилучення інформації о зображеннях, використовуючи пару камер (стереопару). Принцип роботи аналогічний роботі очей у людині: мозок отримує певні дані з очей і завдяки тому, що використовується 2 камери є інформація про глибину до об’єктів.

Для початку калібрування стереопари на принтері роздрукувати (бажано на лазерному принтері, формат друку повинен бути на повному аркуші) на аркуші А4 (або більшого розміру) з зображенням шахматної сітки. Для побудови карти глибини необхідно використовувати однакові камери з мінімальними відхиленнями друг від друга. Перед калібрування необхідно закріпити камери на нерухомій платформі. Калібрування проходить програмним методом, який полягає у тому, щоб зробити декілька фотографій роздрукованої шахівниці під різними кутами нахилу. Завдяки алгоритму проводиться аналіз фотографій та знаходяться параметри для калібрування. Отримані фотографії калібрування камер представлений на рисунках 7.2 – 7.4

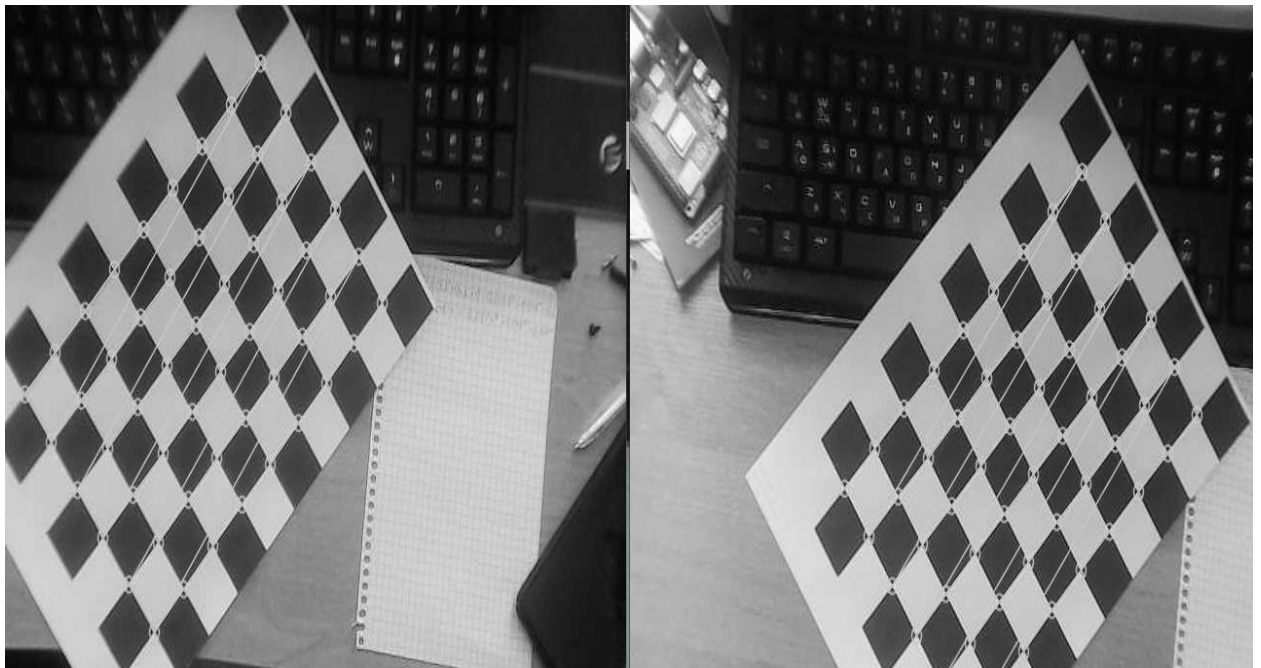


Рисунок 7.2 – Перша фотографія калібрування камери



Рисунок 7.3 – Друга фотографія калібрування камери, повернутий на 45 градусів

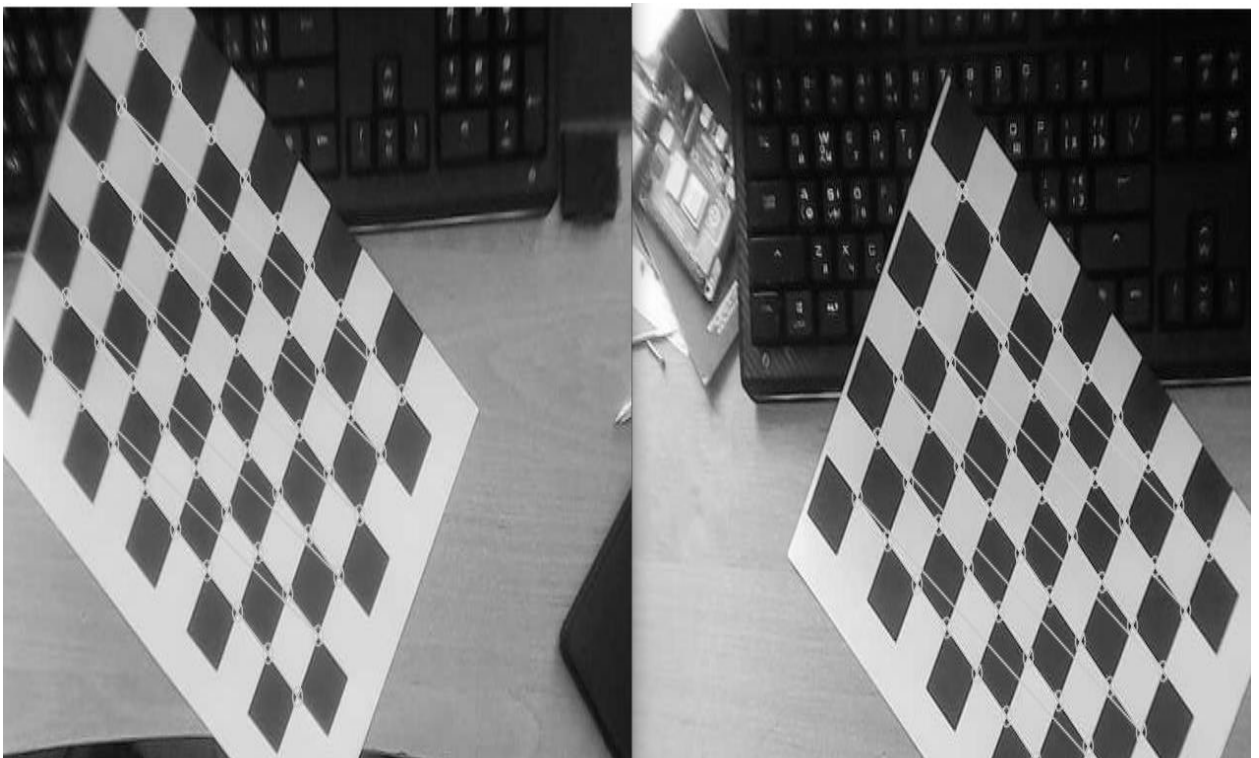


Рисунок 7.4 – Друга фотографія калібрування камери, повернутий на 45 градусів

Після отриманих фотографій проводиться аналіз отриманих фотографій, які були збережені і розраховується матриця корекції.

Для додаткового калібрування, можна також зробити декілька фотографій шахівниці з різною відстанню, яка помітно покращить кінцевий результат. Також треба відмітити, що при будь-якій зміні положення між камерами калібрування необхідно виконувати повторно.

Після проведеного калібрування стереопари,

Приклад отриманої карти глибини представлено на рисунку 7.5.



Рисунок 7.5 – Отримана карта глибини

Як можна зрозуміти з отриманої карти глибини – незважаючи на досить погане освітлення, межі об'єктів виділяються досить якісно та чітко, що позитивно скажется на побудові алгоритму для об'їзду перешкоди.

7.4 Результат дослідження реального прототипу

У розділі проведено дослідження розробленого роботизованого комплексу, для чого у текстовий документ були записані значення кута повороту. Після отриманого масиву значень, використовуючи програмне середовище Matlab був сформований графік перехідного процесу системи. Графік представлено на рисунку 7.6.

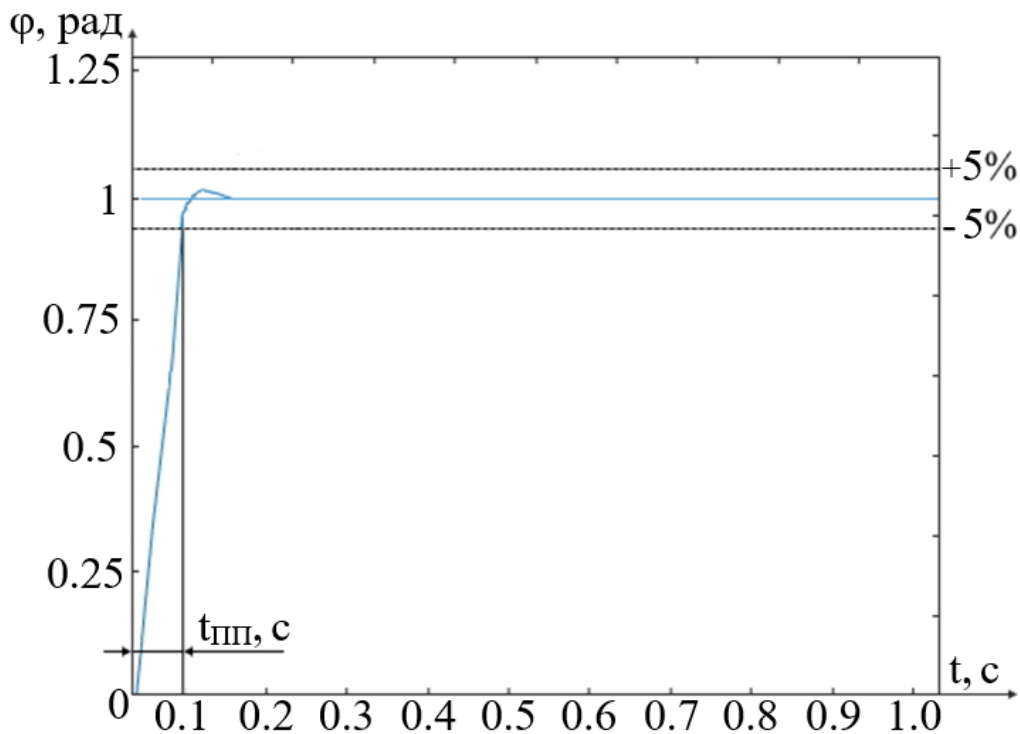


Рисунок 7.6 – Графік перехідного процесу реального прототипу

Отриманий графік свідчить про те, що реальний прототип схожий на досліджуєму модель у середовищі Simulink. Загальний характер реакції практично ідентичний, але час перехідного процесу являється трохи більшим.

7.6 Висновки

У розділі виконані наступні завдання:

- Описані усі задачі експериментального дослідження
- Розроблений програмний код для зчитування куту повороту роботизованого комплексу
- Проведено калібрування стереокамери та побудована карти глибини.
- Проаналізована реальна система та отриманий графік перехідного процесу моделі

Результатом виконання даного розділу є повністю готовий та працездатний колісний робот, спроможний об'їжджати перешкоди.

8 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

8.1 Основні поняття і положення

У даному розділі проведені основні дані, які необхідні для реалізації цього проекту в економічному плані.

Розраховані основні економічні параметри: собівартість у гривнях проєктованого комплексу, витрати для забезпечення виробництва та продажу готового виробу. До собівартості продукту входять наступні параметри: вартість компонентів, вартість обладнання для можливості проєктування та збірки робота, утримання витрат, заробітна плата робочих, витрати на обслуговування обладнання а інших відрахувань.

8.2 Опис виробу

Розроблюємий робот представляє мобою автономну систему з вбудованою САП, який спосібний ідентифікувати перешкоду, будувати алгоритм для об'їзду перешкоди та об'їзджати цю саму перешкоду. Сам комплекс має у собі велику кількість датчиків, серед яких відмітити стереопару, яка складається з двох однакових модулів Raspberry Pi Camera v1.3, та датчиків гігрометра та акселерометру MPU6050. У якості основного обчислювального комп'ютера використовується Raspberry Pi Compute Module 4.

8.3 Аналіз ринку

Далі проведений аналіз ринку, а саме його сегментації, даний процес ділить покупців на певні групи, які виділяються деякими параметрами, і за цілями параметрами сегментується ринок

Спроектвана система, та дані о ній експортуються певним підприємствам, які здійснюють збірку і налаштування колісного робота.

Загальною характеристикою, завдяки якій і проводиться сегментація являється кількість що продаються за певну кількість часу (місяць, квартал, рік).

Необхідна кількість сегменту прораховується завдяки певним особливостям і розраховується за наступною формулою:

$$S_{1\text{пол.}} = N_1 \cdot Q_1 \cdot m_1, \quad (8.1)$$

де:

N_1 – кількість покупців у сегменті;

Q_1 – кількість випускаємих робіт;

m_1 – кількість комплектуючих робіт 1 шт.

Отримані результати проведеного аналізу представлено у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Сегментування і розрахунок повної ємності ринку

№ п/п	Сегменти ринку	Код сегменту	Кількість підприємств споживачів даного товару	Середня річна програма виробів підприємств-споживачів	Повна ємність шт./рік
1	Споживачі України	А	10	27	270
2	Підприємства споживачі ближнього зарубіжжя	Б	15	15	225
3	Споживач далекого зарубіжжя	В	23	22	506
Разом			48	64	1001

З отриманих даних слід відмітити те, що ринок потребує випуск 1001 робіт за рік.

8.4 Розрахунок собівартості і ціни розробки системи

До собівартості продукту входять наступні параметри: вартість компонентів, вартість обладнання для можливості проектування та збірки робота, утримання витрат, заробітна плата робочих, витрати на обслуговування обладнання а інших відрахувань.

Перед самим процесом розробки необхідно визначитись з оплатою праці основних працівників. За отриманими даними рахується, що у середньому працівники працюють 22 дні за місяць. Основні працівники на підприємстві зазначені у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Основні працівники для виконання на підприємстві

№ п/п	Посада	Посадові оклади, грн	
		Денні	Місячні
1	Керівник	630	13860
2	Розробник	560	12320
3	Монтажник	510	11220
4	Складальщик	505	11110
5	Налаштовувач	520	11440
Разом		2725	59950

Оклад працівників наступний:

1. Керівник – 630 грн;
2. Розробник – 560 грн;
3. Складальщик – 505 грн;
4. Монтажник – 510 грн;
5. Налаштовувач – 520.

Трудомісткість роботи по розробці колісного робота приведено у табл 8.3.

Таблиця 8.3 – Розрахунок трудомісткості робіт

№ п/п	Вид робіт	Тривалість, дні	Трудомісткість, чол/дні	Виконавець				
				Керівник	Розробник	Складальщик	Монтажник	Налаштовувач
1	Постановка задачі	1	2	+	+			
2	Розробка ТЗ	4	8	+	+			
3	Погодження та затвердження ТЗ	2	4	+	+			
4	Розробка ескізного проекту	5	10	+	+			

Продовження таблиці 8.3 – Розрахунок трудомісткості робіт

№ п/п	Вид робіт	Тривалість, дні	Трудомісткість, чол/дні	Виконавець				
				Керівник	Розробник	Складальник	Монтажник	Настроювач
5	Комплектування	4	4			+		
6	Збірка і монтаж комплектації	5	10			+	+	
7	Збори системи	8	24		+	+	+	
8	Налагодження продукту	5	4					+
9	Перевірка відповідності продукту	2	4	+	+			
10	Випробування і здача продукту в експлуатацію	5	20		+	+	+	+
Разом		41	91	14	27	22	18	10

Далі обчислена основна заробітна плата робітників з загальними витратами:

$$\text{ОЗП} = \sum N_i \cdot \text{ЗП}_{\text{ср}}, \quad (8.2)$$

де N_i – кількість відпрацьованих днів,

$\text{ЗП}_{\text{ср}}$ – денний оклад.

Тоді основна зарплата дорівнює:

$$\text{ОЗП} = 630 \cdot 14 + 560 \cdot 27 + 505 \cdot 22 + 510 \cdot 18 + 520 \cdot 10 = 49430 \text{ грн.}$$

Отже основна зарплата усіх робітників за місяць дорівнює 49430 грн. Далі розрахована додаткова заробітна плата (становить 15% від основної):

$$\begin{aligned} \text{ДЗП} &= \text{ОЗП} \cdot 15\%; \\ \text{ДЗП} &= 49430 \cdot 0.15 = 7414.5 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (8.3)$$

Далі визначені компоненти, з яких складається колісний робот. Дані компоненти представлені у таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Перелік покупних виробів і матеріалів

№ п/п	Назва матеріалів	Кількість виробів, шт.	Ціна, грн/шт.
1	Raspberry Pi Compute Module	1	2500
2	Raspberry IO Module	1	1600
3	Raspberry Pi Camera	2	350
4	MPU6050	1	120
5	Драйвер TB6612FNG	2	70
6	BMS 2S	2	40
7	DC – DC перетворювач	1	60
8	Порт для зарядки DC2250	1	10
9	Колесо з двигунами	4	75
10	Акумулятор NCR 18650B	2	150
11	Комутаційні дроти	20	5
Ціна покупних виробів			5910

Крім основних компонентів, з яких складається колісний робот, необхідне певне обладнання, яке приведене у таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Вартість основних засобів

№ п/п	Основні засоби	Кількість, шт.	Ціна, грн.
1	Робочий стіл з лещатами	2	6800
2	Лампа	2	450
3	Робочий стілець	5	1500
4	ПК	1	25000
5	Паяльна установка	2	1600
Всього		12	50200

Амортизація розраховується наступним чином:

$$A = \frac{Ob \cdot 25\%}{Dm \cdot M} \cdot PK = \frac{50200 \cdot 25\%}{22 \cdot 12} \cdot 41 \sim 1949.05 \text{ грн}, \quad (8.4)$$

де Об – ціна обладнання;

Дм – робочі дні за місяць;

М – кількість місяців у році;

Мр – кількість затрачених днів.

Далі основні витрати були занесені у таблицю 8.6.

Таблиця 8.6 – Отримані значення економічної частини

№	Статті	Сума, грн.	Примітки
1	Основна заробітна плата (ОЗП)	49430	
2	Додаткова заробітна плата (ДЗП)	7414.5	15% від ОЗП
3	Єдиний соціальний податок	12505.68	22%*(ОЗП+ДЗП)
4	Матеріали й куплені вироби	5910	Із табл. 8.4
5	Амортизація	1949.05	25%от Сп/ Нднів* Пр
6	Позавиробничі витрати	19772	40% від ОЗП
7	Собівартість (С)	96981.23	п.1+п.2+п.3...п.6
8	Прибуток (П)	19396.25	20% від С
9	Ціна без НДС (ПДВ)	116377.48	П + С
10	НДС (ПДВ)	23275.5	20% від ціни без НДС
11	Ціна з НДС (ПДВ)	139652.98	п.9 + п.10

Тобто було визначено, що ціна робота без ПДВ складає 116377.48 грн, з – 139652.98 грн

Далі розрахована рентабельність виробу, вона становить:

$$P_n = \frac{Ц-С}{С} \cdot 100\% = \frac{139652.98 - 96981.2}{96981.2} \cdot 100\% = 44\%, \quad (8.5)$$

де

Ц – вартість за одну одиницю товару;

С – розрахована собівартість.

8.5 Розрахунок точки безбитковості

Дані була визначена ціна кінечного продукту. Для чого необхідно брати до уваги мінімально допустиму ціну у якій закладена вартість розробки робота, компонентів, заробітної плати та загальну собівартість.

Для визначення точки безбитковості розраховуються усі надбавки, які були розраховані у минулому розділі, отже точка безбитковості буде дорівнювати:

$$N_{\text{Тб}} = \frac{K}{C - C} = \frac{116377.48}{139652.98 - 96981.2} = 2.72 \approx 3 \text{ шт}, \quad (8.6)$$

де:

K – умовно-постійні витрати, приймаємо відпускній ціні без ПДВ;

C – вартість продукту з врахованим ПДВ;

C – вартість одинці продукту.

Точка безбитковості представлена на рисунку 8.1.

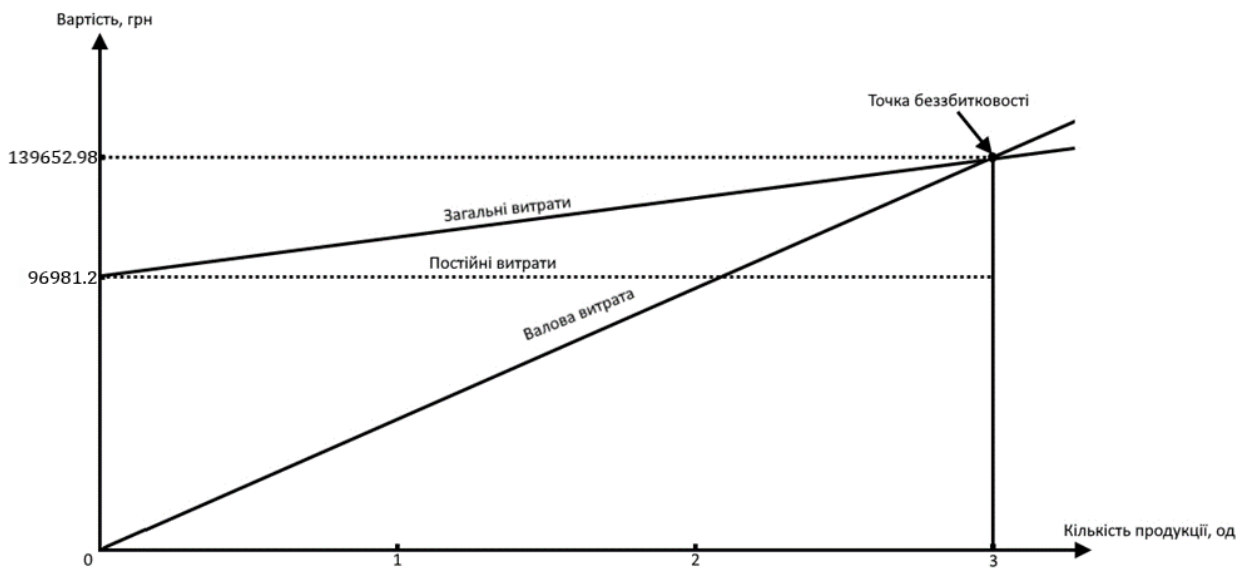


Рисунок 8.1 – Графік точки безбитковості

З отриманого графіку слід відмітити те, що при продажі 3 і більше робіт підприємство буде отримувати прибуток, тобто для того, щоб переkritи усі витрати необхідно продати усього 3 роботи.

8.6 Висновки

Даний розділ містить у собі розрахунки, пов'язані з економічною частиною проекту, у результаті якого були розраховані були отримані основні показники, які необхідні для того, щоб отриманий робот приносив прибуток. Після усіх розрахунків були отримані наступні значення: собівартість продукту становила 96981.23 грн, ціна з ПДВ - 139652.98 грн, без – 116377.48 грн. Визначено що рентабельність робота становить 44% а вартість придбання усіх компонентів – 5910 грн.

Собівартість становить 96981.23 грн., ціна без ПДВ - 116377.48 грн., з ПДВ - 139652.98 грн., рентабельність – 44%, а ціна покупних виробів і матеріалів склала 5910 грн.

Оскільки розроблений робот є одним з найкращих рішень на ринку за свою ціну, проблем з продажем не буде. Тобто окупність проекту буде дуже швидкою.

ВИСНОВКИ

Завдання дипломного проекту було створення системи керування роботизованого комплексу, який спосібний ідентифікувати та будувати маршрут для об'їзду перешкоди. Унаслідок чого була сформована система, яка повністю виконує необхідні вимоги, задані у технічному завданні.

Перший розділ слугував для ознайомлення з проблематикою та проблемами усіх існуючих колісних роботів, спосібних для виконання об'їзду перешкод. Як з'ясувалось, дана проблема досі актуальна. У результаті виконання цього розділу були складені основні задачі для формування готового пристрою.

Другий розділ містить у собі опис об'єкта автоматичного керування, а також представлення зовнішнього виду. Далі проведене формування функціональної схеми самого ОУ, та взаємозв'язок між компонентами. Проведено порівняння усіх використовуємих елементів методом вагових коефіцієнтів і обрані найбільш оптимальні.

Третій розділ описує математичну модель колісного роботизованого комплексу. Після виведення математичної моделі були визначені передаточні функції об'єкту та проаналізована отримана система у програмному забезпеченні Simulink. Оскільки система виявилась нестійкою, показники якості визначити було неможливо і є необхідність у синтезі коригуючого елемента.

Четвертий розділ представляє інформацію про систему з виведеним коректуючим елементом завдяки ЛАЧХ. У результаті чого була отримана система з відмінними показниками якості, яка повністю улаштовують наданим у технічному завданні вимогам. Моделювання системи також проводилось у середовищі Simulink

П'ятий розділ інформує які саме датчики і виконавчі пристрої використовуються у роботі. Також представлений їх опис та схеми з'єднання і електрична.

У шостому розділі виконана перевірка усіх використовуємих датчиків та модулів. Для початку на основний комп'ютер Raspberry Pi Compute Module 4 була завантажена офіційна операційна система, а далі сформовані тестові коди, які перевіряли працездатність датчиків гіроскопа та акселерометру, драйверу TB6612FNG та камер Raspberry Pi Camera.

У цьому розділі був розроблений код, завдяки якому стала можливість розраховувати кут повороту корпусу, проведене налаштування та калібрування стереопари, після чого отримане зображення з картою глибини. Також була досліджена реальна система колісного робота, результат якого близький до моделювання Simulink.

У останньому, восьмому розділі, проведені економічні розрахунки та сегментація ринку. Після усіх розрахунків були отримані наступні значення: собівартість продукту становила 96981.23 грн, ціна з ПДВ - 139652.98 грн, без – 116377.48 грн. Визначено що рентабельність робота становить 44% а вартість придбання усіх компонентів – 5910 грн.

Собівартість становить 96981.23 грн., ціна без ПДВ - 116377.48 грн., з ПДВ - 139652.98 грн., рентабельність – 44%, а ціна покупних виробів і матеріалів склала 5910 грн.

Результатом дипломної роботи став готовий роботизований комплекс з розробленою системою керування, спосібній безпроблемно об'їжджати перешкоди. Даний робот на даний момент є одним з найкращих виборів серед конкурентів, оскільки поєднує у собі невисоку ціну, якісні компоненти та сучасні рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методи моделювання об'єктів автоматичного управління: навчальний посібник. – Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ» ім. М.Є. Жуковського, А.С. Кулік, С.М. Пасічник, 2018р. – 168с.;
2. Дергачов К.Ю. Інтелектуальні транспортні системи. Конспект лекцій, 2020/2021 навчальний рік.
3. Дергачов К.Ю. Інтелектуальні транспортні системи. Лабораторні роботи, 2020/2021 навчальний рік.
4. Дергачов К.Ю. Проектування інтелектуальних транспортних систем. Конспект лекцій, 2021/2022 навчальний рік.
5. Дергачов К.Ю. Проектування інтелектуальних транспортних систем. Лабораторні роботи, 2021/2022 навчальний рік.
6. Методи синтезу системи автоматичної стабілізації та позиціонування: навчальний посібник. – Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ» ім. М.Є. Жуковського, А.Е. Басова, А.С. Кулік, С.М. Пасічник, Н.Н. Харіна, 2019р. – 192с.;
7. Тези доповідей десятої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми автоматизації» – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Харків, 2022;
8. Жукевич А.Б. Проектування систем управління. Конспект лекцій, 2021/2022 навчальний рік.
9. Кулік А.С. Конспект лекцій по курсу «Теорія автоматичного управління» / А.С. Кулік – Харков, ХАІ, 2019 – 2020.
10. Кулік А.С., Джулгаков В.Г., Гавриленко О.И., Дыбская И.Ю., Руденко К.Н. Проектирование систем автоматического управления с использованием метода полунатурного моделирования. Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк авиац. ин-т», 2007.
11. Методи синтезу систем автоматичної стабілізації та позиціонування: навч. посібник / А. Е. Басова, А. С. Кулік, С. М. Пасічник, Н. Н. Харіна. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», 2019. -192 с.
12. Картунов В.І., Дибська І.Ю. Моделювання динамічних систем в середовищі SIMULINK: Учеб. Посібник по курсовому та дипломному проектуванню. Харків, ХАІ, 1999.
13. G. Ryan, R. Roelofs. Simultaneous Localization and Mapping, Swarthmore College. Dept. of Engineering, 2013

14. <https://papers.readthedocs.io/en/latest/imagedetection/focalloss/>
15. <https://medium.com/@14prakash/the-intuition-behind-retinanet-eb636755607d>
16. <https://www.electronicwings.com/raspberry-pi/mpu6050-accelerometergyroscope-interfacing-with-raspberry-pi>
17. <https://www.raspberrypi.org/>
18. P. Fankhauser, M. Bloesch, D. Rodriguez, R. Kaestner, M. Hutter, R. Siegwart. “Kinect v2 for Mobile Robot Navigation: Evaluation and Modeling”, Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2015
19. H. Hirschmuller. “Stereo Vision in Structured Environments by Consistent Semi-Global Matching”, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. V. 2, CVPR 2006

ДОДАТОК А

Таблиця А1 – Результати патентного пошуку

Код патенту	Країна, рік	Назва	Автор	Реферат
167531	Україна, 2018	Спосіб гасіння пожежі мобільним роботом	Дейнеко Наталя Вікторівна, Поспелов Борис Борисович, Андронов Володимир Анатолійович, Рибка Євгеній Олексійович	Спосіб гасіння пожежі мобільним роботом, який полягає в тому, що виявляють небезпечні чинники пожежі, визначають координати, площу загорання та відстань до неї, здійснюють подачу вогнегасної речовини до осередку горіння, який відрізняється тим, що вимірюють та контролюють температуру від осередку горіння в середовищі, що безпосередньо оточує мобільний робот, порівнюють величину цієї температури з температурою, яка визначає критичну температуру для надійної експлуатації мобільного робота, при наявності неузгодженості між ними переміщують мобільний робот у напрямку осередку горіння до усунення цієї температурної неузгодженості, кут розпилу вогнегасної речовини фіксують у напрямку вздовж осі переміщення мобільного робота та адаптують величину кута діаграми спрямованості струменя розпилу вогнегасної речовини до площі осередку горіння та відстані між осередком горіння і мобільним роботом.

Продовження таблиці А1 – Результати патентного пошуку

Код патенту	Країна, рік	Назва	Автор	Реферат
98660	Україна, 2015	Система управління колісним транспортним роботом	Кулік Анатолій Степанович, Дергачов Костянтин Юрійович	Система управління колісним транспортним роботом, що містить платформу, три колеса, два колісні вали із змонтованими на них колесами, два електродвигуни, датчик кута повороту першого колеса, датчик швидкості обертання першого колеса, датчики кута повороту другого колеса і датчик швидкості обертання другого колеса, виходи датчиків першого та другого коліс з'єднані з входами контролерів управління електродвигунами першого та другого коліс, виходи яких з'єднані з електродвигунами першого та другого коліс, джерело живлення, електрично сполучене з бортовою обчислювальною машиною, входи якої з'єднані з входами контролерів управління електродвигунами першого та другого коліс, головний контролер, яка відрізняється тим, що в неї додатково введено четверте колесо з датчиком кута повороту і датчиком швидкості обертання третього і четвертого коліс, виходи яких з'єднані з входами контролера управління електродвигуном третього і четвертого коліс, виходи контролера управління електродвигуна третім і четвертим колесами з'єднаний з електродвигуном третього та четвертого коліс і з входом бортової обчислювальної машини, вихід якої з'єднаний зі входом монітора, ультразвуковий датчик, встановлений на платформі, вихід якого з'єднаний з входом головного контролера.

ДОДАТОК Б

Лістниг Б.1 – Програмний код для виміру кутової швидкості та кутового прискорення з датчику MPU6050

```

import smbus                #імпортувати бібліотеку SMBus з протоколом I2C
from time import sleep      #імпортування функції сну

# реєстри MPU6050 та їх адреси
P_M_1    = 0x6B
SMPLRT_DIV = 0x19
CONF     = 0x1A
GYRO_CONF = 0x1B
INT_ENABLE = 0x38
A_X_OUT  = 0x3B
A_Y_OUT  = 0x3D
A_Z_OUT  = 0x3F
G_X_OUT  = 0x43
G_Y_OUT  = 0x45
G_Z_OUT  = 0x47

def MPU_I():
    bus.write_byte_data(Dev_Ads, SMPLRT_DIV, 7)
    bus.write_byte_data(Dev_Ads, P_M_1, 1)
    bus.write_byte_data(Dev_Ads, CONFIG, 0)
    bus.write_byte_data(Dev_Ads, GYRO_CON, 24)
    bus.write_byte_data(Dev_Ads, INT_ENABLE, 1)

def read_raw_data(addr):
    h = bus.read_byte_data(Device_Address, addr)
    l = bus.read_byte_data(Device_Address, addr+1)
    v = ((h << 8) | l)

    #to get signed value from mpu6050
    if(value > 32768):
        value = value - 65536
    return value

bus = smbus.SMBus(1)
Device_Address = 0x68

MPU_Init()

print (" Зчитування даних акселерометра та гіроскопу")

while True:

    #Отримання сирих даних даних акселерометру
    acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H)
    acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H)
    acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H)

    #Отримання сирих даних даних гіроскопу
    gyro_x = read_raw_data(GYRO_XOUT_H)
    gyro_y = read_raw_data(GYRO_YOUT_H)
    gyro_z = read_raw_data(GYRO_ZOUT_H)

    #Full scale range +/- 250 degree/C as per sensitivity scale factor
    Ax = acc_x/16384.0
    Ay = acc_y/16384.0
    Az = acc_z/16384.0

```

```

Gx = gyro_x/131.0
Gy = gyro_y/131.0
Gz = gyro_z/131.0

print ("Gx=%.2f" %Gx, u'\u00b0'+ "/s", "\tGy=%.2f" %Gy, u'\u00b0'+
"/s", "\tGz=%.2f" %Gz, u'\u00b0'+ "/s", "\tAx=%.2f g" %Ax, "\tAy=%.2f g" %Ay,
"\tAz=%.2f g" %Az)
sleep(1)

```

Лістниг Б.2 – Програмний код для калібрування камери

```

#використовуємо бібліотеки
import os
import time
from datetime import datetime
import picamera
from picamera import PiCamera
import cv2
import numpy as np

# Ознайомлення користувача як вийти з програми
print("Для виходу з програми натисніть Q)

# Налаштування камери для калібрування камери
cab_photo = 50 # Кількість готових фото для калібрування
cd = 5 # Інтервал у секундах між фотографіями
font=cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX # Таймер зворотнього відліку

# Налаштування розширення камери
res_w = 1280 # Кількість пікселів по горизонталі
res_h = 720 # Кількість пікселів по вертикалі
counter = 0 # Оновлення лічильника

# Масштабування
scale = 1

# Роздільна здатність
res_w = int((res_w+31)/32)*32
res_h = int((res_h+15)/16)*16
print ("Розширення фото: "+str(res_w)+" x "+str(res_h))

# буфер зображень
photo_w = int (res_w * scale)
photo_h = int (res_h * scale)
Cap = np.zeros((photo_h, photo_w, 4), dtype=np.uint8)
print ("Масштабоване зображення: "+str(photo_w)+" x "+str(photo_h))

# Підключення камери
Cam = PiCamera(stereo_mode='side-by-side', stereo_decimate=False)
Cam.resolution=(res_w, res_h)
Cam.framerate = 25

t2 = datetime.now()
for frame in cam.capture_continuous(capture, format="bgra", \
use_video_port=True, resize=(photo_w,photo_h)):
    t1 = datetime.now()
    cntdwn_timer = cd - int ((t1-t2).total_seconds())
    if cntdwn_timer == -1:
        counter += 1

```

```

filename = './scenes/scene_'+str(img_width)+'x'+str(img_height)+'_'+\
           str(counter) + '.png'
cv2.imwrite(filename, frame)
print (' ['+str(counter)+' of '+str(Cab_photo)+'] '+filename)
t2 = datetime.now()
time.sleep(1)
cntdwn_timer = 0      # To avoid "-1" timer display
next

k = cv2.waitKey(1) & 0xFF

# Функція виходу з програми по натисканню на клавішу Q
if (k == ord("q")) | (counter == Cab_photo):
    break

print ("При успішному виконанні програми, фотографії зроблені")

```

Лістниг Б.3 – Програмний код для побудови карти глибини

```

#використовуємо бібліотеки
from picamera import PiCamera
import time
import cv2
import numpy as np
import json
from datetime import datetime

print ("Натисніть клавішу 'Q' для завершення програми")
time.sleep (5)

# Налаштування візуалізації
sD = True
sUI = True
sCD = True

# Стандартне налаштування карти глибини
SWS = 5
PFS = 5
PFC = 29
MDS = -30
NOD = 160
TTH = 100
UR = 10
SR = 14
SPWS = 100

# Налаштування розширення камери
res_w = 1280
res_h = 480

# Остаточні налаштування захоплення зображення
scale_ratio = 0.5

# Роздільна здатність
res_w = int((res_w+31)/32)*32
res_h = int((res_h+15)/16)*16
print ("Розширення фото: "+str(res_w)+" x "+str(res_h))

```



```

# буфер зображень
photo_w = int (res_w * scale)
photo_h = int (res_h * scale)
Cap = np.zeros((photo_h, img_w, 4), dtype=np.uint8)
print ("Масштабоване зображення: "+str(photo_w)+" x "+str(photo_h))

# налаштування кольорів карти глибини
autot_min = 10000000
autot_max = -10000000

# налаштування точок
foc_l = 165.0
tx = 65
q = np.array([
    [1, 0, 0, -photo_w/2],
    [0, 1, 0, -photo_h/2],
    [0, 0, 0, foc_l],
    [0, 0, -1/tx, 0]
])

# Налаштування камери
cam = PiCamera(stereo_mode='side-by-side',stereo_decimate=False)
cam.resolution=(res_w, res_h)
cam.framerate = 25

# Ініціалізація вікон інтерфейсу
cv2.namedWindow("Image")
cv2.moveWindow("Image", 75,125)
cv2.namedWindow("left")
cv2.moveWindow("left", 500,125)
cv2.namedWindow("right")
cv2.moveWindow("right", 900,125)

disp = np.zeros((photo_w, photo_h), np.uint8)
sbm = cv2.StereoBM_create(numDisparities=0, blockSize=21)

def stereo_depth_map(rectified_pair):
    dmL = rec_p[0]
    dmR = rec_p[1]
    disp = sbm.compute(dmL, dmR)
    loc_max = disp.max()
    loc_min = disp.min()
    disp_grayscale = (disp-autot_min)*(65535.0/(autot_max-autotune_min))
    disp_fixtype = cv2.convertScaleAbs(disparity_grayscale,
alpha=(255.0/65535.0))
    disp_color = cv2.applyColorMap(disp_fix, cv2.COLORMAP_JET)
    if (showDisparity):
        cv2.imshow("Image", disparity_color)
        key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
        if key == ord("q"):
            quit();
    return disp_color, disp_fixtype, disparity

def load_map_settings( fName ):
    f=open(fName, 'r')
    data = json.load(f)
    SWS=data['SADWindowSize']
    PFS=data['preFilterSize']
    PFC=data['preFilterCap']
    MDS=data['minDisparity']
    NOD=data['numberOfDisparities']

```

```

TTH=data['textureThreshold']
UR=data['uniquenessRatio']
SR=data['speckleRange']
SPWS=data['speckleWindowSize']
#sbm.setSADWindowSize(SWS)
sbm.setPreFilterType(1)
sbm.setPreFilterSize(PFS)
sbm.setPreFilterCap(PFC)
sbm.setMinDisparity(MDS)
sbm.setNumDisparities(NOD)
sbm.setTextureThreshold(TTH)
sbm.setUniquenessRatio(UR)
sbm.setSpeckleRange(SR)
sbm.setSpeckleWindowSize(SPWS)
f.close()

# Завантаження налаштувань карти глибини
load_map ("map_set.txt")

# Завантаження стереоскопічних даних калібрування
try:
    npz=
np.load('./calibration_data/{}p/stereo_camera_calibration.npz'.format(photo_h))
except:
    exit(0)

iS = tuple(npz['iS'])
l_Map_X = npz['l_M_X']
l_Map_Y = npz['l_M_Y']
r_Map_X = npz['r_M_X']
r_Map_Y = npz['r_M_Y']
TT = npz['disp_To_DM']

mw = 800
mh = 600

min_y = 10000
max_y = -10000
min_x = 10000
max_x = -10000
# Отримання кадр з камери
for frame in camera.capture_continuous(capture, format="bgra",
use_video_port=True, resize=(img_width,img_height)):
    t1 = datetime.now()
    pair_img = cv2.cvtColor (frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    imgLeft = pair_img [0:img_height,0:int(img_width/2)]
    imgRight = pair_img [0:img_height,int(img_width/2):img_width]
    imgL = cv2.remap(imgLeft, leftMapX, leftMapY, interp = cv2.INTER_LINEAR,
borderMode=cv2.BORDER_CONSTANT)
    imgR = cv2.remap(imgRight, rightMapX, rightMapY, interp = cv2.INTER_LINEAR,
borderMode=cv2.BORDER_CONSTANT)

    # Взяття смужки з нашого зображення для лідарного режиму (і збереження ЦП)
imgRcut = imgR [80:160,0:int(img_width/2)]
imgLcut = imgL [80:160,0:int(img_width/2)]
re_pair = (imgLcut, imgRcut)

# Розрахунок карти диспаратності
disparity, disparity_bw, native_disparity = depth_map(rect_pair)

maximized_l = nate_disp

maxInCol = np.amax(maxim_l,0)

```

```

p = cv2.reprojectImageTo3D(maxInCol, TT)
xy_proj = np.zeros((map_h , map_w, 1), dtype=np.uint8)

# Захист від «перестрибуючих кольорів» для візуалізації карти глибини
if autot_max < np.amax(maxim_line):
    autot_max = np.amax(maxim_line)
if autot_min > np.amin(maxim_line):
    autot_min = np.amin(maxim_line)

# Виберіть «найближчі» точки в кожному стовпчику
maximized_line[0:80,] = maxInCol

for n, points in enumerate(points):
    cur_y = -points[0][0]
    cur_x = points[0][1]
    max_y = max(cur_y, max_y)
    min_y = min(cur_y, min_y)
    max_x = max(cur_x, max_x)
    min_x = min(cur_x, min_x)
    xx = int(cur_x*map_zoom_x) + int(map_width/2)
    yy = map_height - int((cur_y-min_y)*map_zoom_y)
    if (xx < map_width) and (xx >= 0) and (yy < map_height) and (yy >= 0):
        xy_projection[yy, xx] = max_line_gray[0,n]
    if (showUndistortedImages):
        cv2.imshow("Ліво", imgLcut)
        cv2.imshow("Право", imgRcut)
    if (showColorizedDistanceLine):
        cv2.imshow("Максимальна дистанція", max_line_color)
cv2.imshow("проекція горизонтальної та вертикальної", xy_projection_color)
t2 = datetime.now()

```