

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

«На правах рукопису»
УДК 62-523.8, 510.5

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ
(підпис)
«_____» _____ січня _____ 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему:
«Робастна система керування рухом крокуючого мобільного робота»**

Виконав:
студент II курсу, групи ПГ-21мп
Короленко Ярослав Русланович

(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., проф.,
завідувач кафедри Бурау Н.І.

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:
д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна

(підпис)

Рецензент:
Доцент, к.т.н., доцент
Стельмах Наталія Володимирівна

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Короленку Ярославу Руслановичу

1. Тема дисертації «Робастна система керування рухом крокуючого мобільного робота»,
науковий керівник Бурау Надія Іванівна, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації: 07 січня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: процес руху крокуючого мобільного робота.
4. Предмет дослідження: методи і засоби керування рухом крокуючого мобільного робота з урахуванням структурної невизначеності.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Огляд стану проблеми: огляд мобільних роботів (МР), аналіз крокуючих МР та систем керування їх рухом, формування вимог до системи керування в умовах невизначеності.
 - 5.2 Аналіз математичної моделі крокуючого МР, обґрунтування та врахування невизначеності в математичній моделі.
 - 5.3 Аналіз алгоритмів руху МР при відмові однієї ноги. Обґрунтування обраного алгоритму руху МР.
 - 5.4 Обґрунтування та розробка програмної моделі руху МР.

5.5 Моделювання та аналіз переміщення МР при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги.

5.6 Розробка структури робастної системи керування рухом МР.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у збірнику матеріалів доповідей НТК

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 1. Огляд стану розвитку крокуючих мобільних роботів та систем керування їх рухом.			
РОЗДІЛ 2. Розробка математичної моделі крокуючого мобільного робота.			
РОЗДІЛ 3. Комп'ютерне моделювання руху та обґрунтування автоматичної системи керування рухом мобільного робота.			
РОЗДІЛ 4. Розробка стартап-проекту.	Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання «10» жовтня 2023 року

Календарний план

№ з/ п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд стану проблеми	31.10.2023	
2.	Розробка математичної моделі крокуючого МР	10.11.2023	
3.	Обґрунтування алгоритмів руху гексапода при відмові однієї ноги	20.11.2023	
4.	Розробка програмної моделі руху МР	30.11.2023	
5.	Моделювання переміщення МР при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги	10.12.2023	
6.	Розробка структури робастної системи керування рухом МР	15.12.2023	
7.	Оформлення рукопису магістерської дисертації	29.12.2023	
8.	Оформлення презентації, підготовка до захисту	05.01.2024	

Студент

Науковий керівник дисертації

Ярослав КОРОЛЕНКО

Надія БУРАУ

РЕФЕРАТ

У даній роботі розроблено робастну систему керування рухом мобільного робота. Створена математична та програмна модель руху гексаподу. Досліджено переміщення МР при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги. Розроблено та обґрунтовано робастну систему керування рухом гексаподу.

Актуальність теми. Автоматизація виробничо-технологічних процесів в усіх сферах людської діяльності є головною та довготривалою тенденцією розвитку сучасного суспільства. Як логічний розвиток даного питання наразі значного поширення набуває галузь робототехніки. Мобільна робототехніка станом на сьогодні відіграє важливу роль у нашому повсякденному житті та в різних сферах суспільства.

На сучасний момент мобільна робототехніка визначається як одна з галузей, які найбільш стрімко розвиваються. Можливості мобільних роботів дозволяють їм ефективно замінювати людей у різних сферах, таких як: спостереження; патрулювання; аварійно-рятувальні операції; розвідка; промислова автоматизація; розваги та інші. Більшість з цих роботів вже доступні на ринку.

Існують природні області, які недосяжні для людини, такі як вулкани, розвідка корисних копалин, дослідження планет, рятувальні місії та очищення небезпечних відходів. Мобільні роботи, такі як колісний, гусеничний та багатоногий крокуючий робот, вирішують ці проблеми. Дослідження показують, що колісний робот ефективний на рівних поверхнях, гусеничні роботи адаптуються до нерівних місць, а багатоногі роботи мають унікальні прохідні можливості.

Через це крокуючі роботи наразі є більш пріоритетною галуззю наземної робототехніки, бо вони дозволяють проводити розвідку важкодоступних місць або розвідку на пересічній місцевості, що є в більшості своїй недоступним для інших видів наземних роботів.

Мета роботи і завдання.

Метою роботи є забезпечення стійкого (стабільного) руху гексаподу при відмові однієї з ніжок.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд мобільних роботів (гексаподів), аналіз крокуючих гексаподів та систем керування їх рухом, формування вимог до системи керування в умовах невизначеності.
2. Аналіз математичної моделі крокуючого мобільного робота, обґрунтування та врахування невизначеності в математичній моделі.
3. Аналіз алгоритмів руху гексаподу при відмові однієї ноги. Обґрунтування обраного алгоритму руху гексаподу.
4. Обґрунтування та розробка програмної моделі руху гексаподу.
5. Моделювання та аналіз переміщення гексаподу при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги.
6. Розробка структури робастної системи керування рухом гексапода.

Об'єктом дослідження є процес руху крокуючого мобільного робота.

Предметом дослідження є методи і засоби керування рухом крокуючого мобільного робота з урахуванням структурної невизначеності.

Апробація результатів дисертації. Часткові результати роботи були обговорені на наступній конференції:

- XIX Наукова-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20-21 грудня 2023 року.

Публікації. За матеріалами дисертації було опубліковано матеріали доповідей на науково-практичній конференції.

Короленко Я.Р. Методика моделювання кінематики руху крокуючого робота в середовищі Matlab. Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні (20-21 грудня 2023 року), КПІ ім. Ігоря Сікорського, приладобудівний факультет, Київ, 2023.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 42 рисунків, 23 таблиць, списку використаної літератури із 41

позиції. Загальний обсяг роботи 124 сторінки.

Ключові слова: мобільний крокуючий робот, робастні системи, моделювання руху, кінематичні схеми, гексапод.

ABSTRACT

In this paper, a robust motion control system for a mobile robot is developed. A mathematical and programmatic model of hexapod movement was created. The movement of the MR in the absence and presence of damage to one leg is investigated. A robust system for controlling the movement of a hexapod was developed and substantiated.

Actuality of theme. Automation of production and technological processes in all spheres of human activity is the main and long-term trend in the development of modern society. As a logical development of this issue, the field of robotics is now becoming widespread. Today, mobile robotics plays an important role in our everyday life and in various spheres of society.

At the moment, mobile robotics is defined as one of the fastest growing industries. The capabilities of mobile robots allow them to effectively replace humans in various fields, such as: surveillance; patrolling; rescue operations; intelligence; industrial automation; entertainment and others. Most of these robots are already available on the market.

There are natural areas that are beyond the reach of humans, such as volcanoes, mineral exploration, planetary exploration, rescue missions, and hazardous waste cleanup. Mobile robots, such as wheeled, crawler, and multi-leg walking robots, address these challenges. Research shows that wheeled robots are efficient on flat surfaces, crawlers adapt to uneven terrain, and multi-leg robots have unique walking capabilities.

Because of this, walking robots are currently a higher priority area of ground robotics, as they allow for reconnaissance of hard-to-reach places or reconnaissance on rough terrain, which is mostly inaccessible to other types of ground robots.

Purpose of the work and objectives.

The aim of the work is to ensure stable (steady) movement of the hexapod in case of failure of one of the legs.

To achieve this goal, the following tasks are solved:

1. Review of the state of the problem: an overview of mobile robots

(hexapods), analysis of walking hexapods and their motion control systems, and the formation of requirements for a control system under conditions of uncertainty.

2. Analysis of the mathematical model of a walking mobile robot, justification and consideration of uncertainty in the mathematical model.
3. Analysis of hexapod movement algorithms in case of one leg failure. Justification of the selected hexapod movement algorithm.
4. Substantiation and development of a software model of hexapod movement.
5. Modeling and analysis of hexapod movement in the absence and presence of damage to one leg.
6. Development of the structure of a robust hexapod motion control system.

The object of research is the process of movement of a walking mobile robot.

The subject of the research is methods and means of controlling the movement of a walking mobile robot with regard to structural uncertainty.

Approbation of work. Partial results of the work were discussed at the following conference:

- XIX Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation", December 20-21, 2023.

Publications. Based on the materials of the dissertation, the materials of the reports at the scientific and practical conference were published.

Korolenko Y.R. Methods of modeling the kinematics of the motion of a walking robot in the Matlab environment. Efficiency and automation of engineering solutions in instrumentation (December 20-21, 2023), Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Faculty of Instrumentation, Kyiv, 2023.

Structure and scope of the work. The work consists of an introduction, four chapters, conclusions, 42 figures, 23 tables, a list of references with 41 items. The total volume of the work is 124 pages.

Keywords: mobile walking robot, robotic systems, motion modeling, kinematic schemes, hexapod.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ РОЗВИТКУ КРОКУЮЧИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЇХ РУХОМ.....	14
1.1 Загальна характеристика крокуючих мобільних роботів	14
1.1.1. Базові поняття про мобільні роботи	15
1.1.2. Типи мобільних роботів.....	16
1.1.3. Сфери використання мобільних роботів.....	19
1.2 Умови роботи крокуючих роботів	20
1.3 Можливі пошкодження при роботі	21
1.4 Методи керування в умовах невизначеності.....	24
1.4.1 Керування в умовах невизначеності	24
1.4.2 Робастні системи керування	25
1.4.3 Класифікація невизначеностей.....	26
1.4.4. Методи синтезу робастної системи.....	28
1.5 Огляд попередніх робіт за темою дослідження	29
1.6 Мета і завдання даних наукових досліджень	33
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА	36
2.1 Постановка завдання математичного моделювання	36
2.2 Побудова тіла гексаподу	39
2.3 Моделювання ноги гексаподу. Прямі кінематичні рівняння	40
2.4 Зворотні кінематичні рівняння	45
2.5 Обґрунтування фаз циклу руху та алгоритму переміщення ніг.....	48
2.6 Алгоритм моделювання в середовищі MATLAB	55
Висновки до розділу 2:	59
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ	

МОБІЛЬНОГО РОБОТА	61
3.1 Методика комп'ютерного моделювання.....	61
3.2 Моделювання та аналіз отриманих результатів	63
3.2.1 Моделювання руху гексаподу без пошкоджень ніжок	63
3.2.2 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 1	65
3.2.3 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 5	67
3.2.4 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 3	70
3.3 Структурно-функціональний синтез робастної системи керування рухом	73
3.3.1 Загальна схема системи керування гексаподом	73
3.3.2 Канал керування ногою 1 системи керування гексаподом.....	75
3.3.3 Канал керування ногою 3 системи керування гексаподом.....	77
Висновки до розділу 3	79
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ ВИКОРИСТАННЯ РОБАСТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГЕКСАПОДОМ.....	81
4.1 Опис ідеї та технологічний аудит проекту	81
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	84
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	93
4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	97
4.5. Розроблення бізнес-моделі стартап-проекту.....	101
Висновки до розділу 4	103
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106
Додаток А Лістинг програмного коду	112
Додаток Б	124

ВСТУП

Автоматизація виробничо-технологічних процесів у всіх сферах людської діяльності визначається як головна та стійка тенденція розвитку сучасного суспільства. Як логічний розвиток даного питання наразі галузь робототехніки набуває значного поширення. Мобільна робототехніка на сьогоднішній день відіграє ключову роль у нашому повсякденному житті та в різних сферах суспільства.

На сучасний момент мобільна робототехніка визначається як одна з галузей, яка найбільш стрімко розвивається. Можливості мобільних роботів (МР) дозволяють їм ефективно замінювати людей у різних сферах, таких як спостереження, патрулювання, аварійно-рятувальні операції, розвідка, промислова автоматизація, розваги та інші. Більшість з цих роботів вже доступні на ринку.

Наземні роботи можуть використовуватися в різних робочих середовищах, включаючи відкриті або закриті місця, структуровані або неструктуровані, статичні або динамічні середовища. Кожне з цих середовищ створює різні виклики для застосування роботів. Загальна конфігурація системи робота в основному залежить від відповідного робочого середовища; наприклад, робот, призначений для статичного середовища, не може ефективно адаптуватися до динамічних ситуацій, що виникають в середовищі.

Існують природні області, які недосяжні для людини, такі як вулкани, розвідка корисних копалин, дослідження планет, рятувальні місії та очищення небезпечних відходів. Мобільні роботи, такі як колісний, гусеничний та багатоногий крокуючий робот, вирішують ці проблеми. Дослідження показують, що колісний робот ефективний на рівних поверхнях, гусеничні роботи адаптуються до нерівних місць, а багатоногі роботи мають унікальні прохідні можливості.

Таким чином, крокуючі МР наразі вважаються більш пріоритетною галуззю наземної робототехніки, оскільки вони дозволяють проводити розвідку

важкодоступних місць або розвідку на пересічній місцевості, що залишається недосяжним для інших видів наземних роботів.

На сьогоднішній день існує значний науковий та практичний інтерес до створення та вдосконалення мобільних роботів, зокрема, крокуючих. Активно проводяться дослідження, які охоплюють різні аспекти розробки крокуючих МР, які стосуються конструкції, системи керування, моделювання, алгоритмічного та програмного забезпечення, експериментальних досліджень. Але недостатньо дослідженим є те, що під час руху крокуючий робот може отримувати пошкодження, які впливають на його рух або навіть унеможливають його. Через це постає необхідність розробки таких систем керування роботом, які б забезпечували можливість стійкого руху МР у разі непрацездатності чи втрати однієї з кінцівок.

Найбільш ефективним рішенням зазначеної проблеми є створення робастної системи, яка здатна працювати в умовах невизначеності, під яку підпадають несправності крокуючого робота. Але для розробки системи необхідно дослідити кінематику руху гексапода, розглянути та обрати алгоритми для його переміщення.

Об'єктом дослідження є процес руху крокуючого мобільного робота.

Предметом дослідження є методи і засоби керування рухом крокуючого мобільного робота з урахуванням структурної невизначеності.

Метою роботи є забезпечення стійкого (стабільного) руху гексаподу при відмові однієї з ніжок.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд мобільних роботів (гексаподів), аналіз крокуючих гексаподів та систем керування їх рухом, формування вимог до системи керування в умовах невизначеності.
2. Аналіз математичної моделі крокуючого мобільного робота, обґрунтування та врахування невизначеності в математичній моделі.
3. Аналіз алгоритмів руху гексаподу при відмові однієї ноги. Обґрунтування обраного алгоритму руху гексаподу.

4. Обґрунтування та розробка програмної моделі руху гексаподу.
5. Моделювання та аналіз переміщення гексаподу при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги.
6. Розробка структури робастної системи керування рухом гексапода.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- Розроблено, обґрунтовано та підтверджено модельними експериментами алгоритми стабільного руху МР при пошкодженні окремих ніжок.
- Запропоновано та обґрунтовано функціональну модель робастної системи керування МР, яка забезпечує сталий рух МР при відсутності та наявності пошкодження однієї ноги

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та програмній реалізації моделі руху гексаподу, у розробці алгоритмічного та програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ РОЗВИТКУ КРОКУЮЧИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЇХ РУХОМ

1.1 Загальна характеристика крокуючих мобільних роботів

Автоматизація виробничо-технологічних процесів в усіх сферах людської діяльності є головною та довготривалою тенденцією розвитку сучасного суспільства. Значну популярність отримали промислові роботи, які стали ключовими технологічними компонентами галузей машинобудування, приладобудування та електроніки у всьому світі.

Протягом останнього десятиліття сформувався новий напрямок у сфері робототехніки - автономні мобільні роботи з вбудованим комп'ютером. Потреба у широкому впровадженні мобільних роботів обумовлена збільшенням продуктивності праці та зменшенням ризику для життя людини, особливо через зростання кількості техногенних катастроф, природних катаклізмів та екологічних проблем. Існують ситуації в екстремальних умовах, де єдиними засобами проведення робіт в небезпечних ситуаціях для людини стають мобільні роботи.

Мобільна робототехніка станом на сьогодні відіграє важливу роль у нашому повсякденному житті та в різних сферах суспільства. Медична галузь вже протягом багатьох років активно використовує мобільних роботів для транспортування матеріалів та, частково, для проведення хірургічних операцій. Склади активно користуються роботами для точного переміщення матеріалів або палет з полиць на зону обробки замовлень. Мобільні роботи (МР) також широко застосовуються в сільському господарстві, військовій сфері, хімічній та гірничій промисловості. Вони використовуються для дослідження небезпечних зон і поверхонь, розвідки, саперних операцій, надання допомоги в робочих процесах і навіть виконання завдань у місцях, де життя людини під загрозою [1, 2].

1.1.1. Базові поняття про мобільні роботи

Роботи представляють собою комплексні механізми, спроектовані для виконання завдань у різноманітних, часто неструктурованих середовищах, і вони функціонують без постійного втручання людини. Повністю автономний робот обладнаний низкою ключових характеристик. Серед них можна визначити [3]

- Отримання даних про оточуюче середовище: автономні роботи мають інтегровані системи датчиків, які надають інформацію про навколишнє середовище.
- Незалежна робота: вони здатні працювати без постійного втручання оператора, функціонуючи протягом тривалого періоду часу.
- Маніпулятори та інші пристрої для взаємодії: ці роботи включають в себе рухомі маніпулятори, шасі та інші пристрої, які дозволяють їм взаємодіяти з оточуючим середовищем.
- Можливість самооновлення: автономні роботи можуть отримувати нові можливості під час експлуатації, такі як нові алгоритми для виконання завдань або алгоритми, які дозволяють їм адаптуватися до змінних умов. Це досягається через перепрограмування їхніх мікросхем безпосередньо на платі.
- Технічне обслуговування: незважаючи на їхню високу автономність, автономні роботи все ще потребують регулярного технічного обслуговування, подібно до інших машин.

Також мобільні роботи мають кілька електронних систем, які відповідають за різні функції робота [4], до яких відносяться інформаційно-вимірювальна, керуюча та система зв'язку.

Інформаційно-вимірювальна система використовується для збору і обробки даних про навколишнє середовище. Вона складається з різних датчиків, які можуть включати в себе відеокамери, ультразвукові сенсори, радары, тактильні та контактні датчики, датчики положення, тахометри, акселерометри та інші подібні пристрої.

Керуюча система відповідає за обробку і аналіз сигналів, що надходять від сенсорної системи, а також за прийом сигналів керування від оператора або автоматизованої системи з елементами штучного інтелекту. Вона передає управляючі сигнали виконавчій системі робота, яка відповідає за реалізацію рухів і зміну конфігурації робота.

Система зв'язку робота використовується для обміну даними та отримання команд з зовнішніх джерел.

Виконавча система робота забезпечує можливість виконувати рухи, обробляючи управляючі сигнали з метою зміни положення та конфігурації елементів та агрегатів робота [4, 5].

1.1.2. Типи мобільних роботів

Найголовнішим критерієм розподілу роботів на категорії слід вважати середовище, на роботу в якому розрахований робот. На основі цього, перший, найбільший розподіл буде відбуватись наступним чином [6]:

- Безпілотний літальний апарат (БПЛА) - літальний апарат, який може злітати, здійснювати політ і сідати без фізичної присутності пілота на його борту. Політ БПЛА може здійснюватися під дистанційним керуванням людини-оператора, як віддалено пілотований літальний апарат (англ. RPA), або з різним ступенем автономності, як-от допомога автопілоту, аж до повністю самостійного, який не передбачає втручання людини.
- Дистанційно-керований підводний апарат (ДКА) — занурюваний під воду підводний апарат без наявного екіпажу на борту, що переміщається в товщі води і (або) по дну, і який керується з поверхні командою пілотів-техніків з борту надводного судна, оснащений спеціальним обладнанням, приладами та інструментами для наукових досліджень, пошукових і аварійно-рятувальних операцій, виробничих робіт під водою, а також у військових цілях. У цей клас підводних

апаратів входять різноманітні за призначенням і конструкцією прив'язні, буксирувані і автономні телекеровані підводні апарати.

- Безпілótний наземний транспортний засіб (БНТЗ) — це наземний транспортний засіб, який функціонує без наявності на борту людини. БНТЗ можуть бути використані для багатьох застосувань, якщо це може бути незручним, небезпечним або неможливим для присутності оператора-людини. Як правило, транспортний засіб має набір датчиків для спостереження за навколишнім середовищем і буде або самостійно ухвалювати рішення щодо своєї поведінки, або передавати інформацію оператору-людині, яка керує ним по радіоканалу [4, 6].

В даній роботі нас більше цікавлять БНТЗ, тому БПЛА та ДКА розглядатись в подальшому огляді не будуть. БНТЗ ж надалі діляться на типи відповідно від своєї ходової системи [7-9]:

- Гусенична ходова система: Гусенична система складається з гумових або металевих гусениць, які дозволяють роботу пересуватися по різних типах поверхні. Гусениці зазвичай надають високу плавність руху та добре впорядковану підтримку на м'яких або нерівних ґрунтах.
- Колісна ходова система: Колісна система використовує колеса для переміщення робота. Вона зазвичай дозволяє швидше переміщення на твердих дорогах або гладких поверхнях, але може бути менш ефективною на м'яких або нерівних ґрунтах.
- Лапкова ходова система: Деякі роботи мають лапкову систему, яка складається з набору ніг, які дозволяють роботу пересуватися подібно до ходьби. Це може бути корисним для руху по важкодоступним територіях або для подолання перешкод [9].

Нас цікавить саме лапкова ходова система, бо конструкція робота, яка буде розглядатись в цій роботі, має саме таку ходову систему.

Основою класифікації наземних мобільних роботів з лапковою ходовою

системою є їх конструкція, яка здебільшого характеризується кількістю ніг. Відповідно до кількості ніг, наземні роботи з лапковою ходовою системою поділяються на [9]:

- Роботи з однією ногою

"Hoppers" [9, 10] є прикладом роботів з лише однією ногою. Одноногі роботи, як Uniroo [9, 11], мають лише одну ногу і, як вказано в їхньому описі, найбільшою проблемою з ними є те, що вони не можуть стояти нерухомо. Для збереження рівноваги їм потрібно постійно стрибати.

- Роботи з двома ногами або гуманоїдні роботи

Гуманоїдні роботи є роботами з двома ногами, які стараються відтворити людські здібності до пересування. Вони використовують датчики для того, щоб ходити, говорити, виражати емоції та виконувати інші дії, подібні до людських. Один із важливих викликів полягає у збереженні рівноваги під час руху.

- Роботи з трьома ногами

Роботи з трьома ногами не є дуже поширеними через непарну кількість ніг. STriDER [9, 12] - це приклад такого трьохногового робота, який має просту кінематичну структуру, схожу на камерний штатив. Вони є стійкими, легкими для управління та енергоефективними, і вони працюють на принципі того, що під час руху дві ноги виступають в якості опори, а третя нога - як рухлива нога.

- Роботи з чотирма ногами (quadropods)

Квадроходи мають чотири ноги і використовуються, коли потрібні підвищена безпека або можливість перевезення великої ваги. Вони статично стабільні, коли не рухаються, але для ходьби вони потребують динамічного управління, оскільки центр тяжіння робота повинен легко переміщуватися під час ходьби. Управління і координація ніг у таких великих роботів є більш складними. Для таких систем потрібна висока обчислювальна швидкість. Такий квадроход, як BigDog [9,13], є хорошим прикладом. Він може бігти зі швидкістю 6,5 км/год, підніматися на схили під кутом 35 градусів та перевозити вантаж вагою до 150 кг.

- Роботи з п'ятьма ногами

Роботи з п'ятьма ногами є рідкісними через непарну кількість ніг. Один з

прикладів - це робот, натхненний будовою морської зірки, представлений авторами Besari et al [9]. Метою їх розробки є пошук оптимальної ходи для 5-ти кінцівок під час руху робота. При дослідженні здебільшого використовується метод проб і помилок для навчання робота взаємодіяти з робочим середовищем на основі системи нагород та покарань.

- Роботи з шістьма ногами (гексаподи)

Роботи з шістьма або більше ногами можуть бути статично стабільними на трьох або більше ногах, тому їх можна керувати за допомогою статичних технік ходьби, що спрощує керування. Однією зі спільних архітектур для ходячих роботів є гексаподи. Гексаподна хода зазвичай є стабільною, навіть на нерівному майданчику.

- Роботи з більш, ніж шістьма ногами

Найпоширенішими в цій категорії є роботи з вісьмома ногами, які інспіровані павуками, підводними ходулями та іншими арахнідами. Один з прикладів - це робот Dante II [9,14], який був розроблений для дослідження активних вулканічних кратерів. Він брав участь у експедиції на віддалений вулкан що знаходиться в Алясці для демонстрації своїх можливостей в реальних умовах дослідження, в розпечених місцях та в суворих антарктичних умовах [9].

1.1.3. Сфери використання мобільних роботів

У сучасному світі існує значна кількість мобільних наземних технічних засобів. Вони довели свою корисність у різних сферах і в основному використовуються для вирішення завдань, які ставлять під загрозу життя та безпеку людей. Ці технічні засоби стали невід'ємною частиною багатьох сфер і продовжують розвиватися для підвищення ефективності та безпеки в різних галузях. Багато з цих сфер включають [4, 8, 9]:

- Військове використання: роботи використовуються для знешкодження вибухових речовин та пристроїв, обладнаних можливістю піднесення важких предметів та роботи в умовах, де потрібна додаткова сила або де люди не можуть безпечно працювати.

- Військові операції: роботи включають у себе функції спостереження, розвідки та вогневого ураження цілей, а також можуть замінювати солдатів у бойових умовах.
- Космічні програми: роботи використовуються для дослідження планети Марс. Наприклад, марсоходи «Спіріт» і «Оппортьюніті» були використані для вивчення Марса і подовжили термін служби понад очікування.
- Виробничі середовища: роботи використовуються для автоматизації процесів у виробничих середовищах, для транспортування матеріалів і автоматизації операцій.
- Транспортування матеріалів: виробничі підприємства використовують роботів для точного позиціонування та транспортування важких деталей між виробничими станціями.
- Пошуково-рятувальні операції: роботи використовуються для рятування людей під час аварій, таких як надзвичайні ситуації та пожежі [15-17].

З огляду на це можна стверджувати, що наземні мобільні роботи є перспективною сферою сучасних технологій і знаходять своє застосування в багатьох сферах людської діяльності, іноді пропонуючи унікальні можливості, неможливі без використання роботів.

1.2 Умови роботи крокуючих роботів

Використання автономних мобільних робототехнічних систем швидко розповсюджується по багатьох наукових і комерційних галузях, і завдяки постійним науковим і промисловим дослідженням можливості цих роботів зростають. Мобільні роботи застосовуються в промисловості і сферах, недоступних або небезпечних для людини, наприклад, під водою, а також в умовах високої температури і радіації. Для цих середовищ було розроблено і продовжує розроблятися багато різних типів платформ для роботів, що забезпечує постійний розвиток робототехніки.

Наземні роботи можуть використовуватися в різних робочих середовищах, включаючи відкриті або закриті місця, структуровані або неструктуровані, статичні або динамічні середовища. Кожне з цих середовищ створює різні виклики для застосування роботів. Загальна конфігурація системи робота в основному залежить від відповідного робочого середовища; наприклад, робот, призначений для статичного середовища, не може ефективно адаптуватися до динамічних ситуацій, що виникають в середовищі [18].

Розробка наземних робототехнічних систем особливо складна, коли запланована сфера застосування автономних наземних роботів відноситься до категорії неструктурованого бездоріжжя, що робить це дуже важливою проблемою для сучасної робототехніки, і як наслідок - активною галуззю досліджень.

Головні труднощі в основному виникають через слабе розуміння свого оточення роботами в цих неструктурованих сценаріях. Нещодавно мобільні наземні роботи продемонстрували все більш високу здатність розуміти своє оточення в закритих приміщеннях (наприклад, роботи-склади від Amazon Robotics [4, 19]). Проте в навігації роботів на вулицях, навколишнє середовище зазвичай набагато менше структуроване і непередбачуване (наприклад, освітлення, тіні, закриття і текстура), ніж в сценаріях навігації роботів в закритих приміщеннях. Через ці конкретні виклики та більш обмежений рівень прогресу, досягнутого до цього часу для їх вирішення, виникає необхідність вичерпного огляду існуючих дослідницьких робіт у цій галузі з метою визначення напрямків розвитку навігації роботів в неструктурованих зовнішніх середовищах.

1.3 Можливі пошкодження при роботі

Як показано в роботі [20], МР піддаються ризику пошкодження під час роботи в різних навколишніх середовищах.

Зазвичай роботи використовуються в тих місцях, де перебування людини ставило б під загрозу її життя. Тому здебільшого роботи працюють в небезпечному та агресивному навколишньому середовищі. Це призводить до

підвищеного ризику отримання пошкоджень роботом, що в свою чергу загрожує виконанню роботом своєї місії.

Порівнюючи з колісними роботами, крокуючі роботи мають більше переваг у неструктурованих середовищах, які і складають більшість середовищ використання роботів, зокрема вони виграють в адаптивності і гнучкості на нерівній місцевості. Проте, вони піддаються ризику різних видів пошкоджень, які можуть призвести до втрати функціональності [20].

Серед типових пошкоджень можна виділити наступні види [4, 18, 20]:

- Пошкодження ніг - зламані або пошкоджені крокуючі механізми, пошкодження або втрата крокуючих ніг або кінцівок, застрягання або зношування крокуючих механізмів.
- Пошкодження сенсорів - пошкодження візуальних сенсорів (камери, лазерні дальноміри, інфрачервоні датчики тощо), вихід з ладу сенсорів обмеженої дальності (наприклад, ультразвукові сенсори), Відсутність зв'язку зі супутниковими системами (наприклад, GPS).
- Пошкодження електроніки та обладнання - перебої в живленні або втрата енергозберігаючого обладнання, пошкодження мікроконтролерів, процесорів або інших обчислювальних пристроїв, втрата або пошкодження комунікаційного обладнання (радіо, Wi-Fi, Bluetooth).
- Пошкодження корпусу та механічні пошкодження - пошкодження корпусу або обшивки, пошкодження інших механічних елементів, занурення у воду або пил, що може призвести до корозії або короткого замикання.
- Програмні пошкодження - віруси або зловмисний код, які можуть вплинути на програмне забезпечення робота, помилки в програмному коді, які можуть призвести до втрати контролю або некоректної поведінки робота.

Кожне з цих пошкоджень ставить завдання, яке виконує робот, під загрозу.

Найбільш розповсюдженим пошкодженням є пошкодження ноги, тому основна увага дослідників сконцентрована на ній. Зазвичай розрізняють два типи руйнувань [20]: зафіксоване та неконтрольоване руйнування, які позначаються як FI та FII. При FI пошкоджений суглоб не може рухатися і може використовуватися для опори. У випадку FII пошкоджений суглоб рухається вільно і не може бути використаний як опора.

Деякі дослідники використовують машинне навчання для створення відмовостійких моделей ходи. Наприклад, в роботі [21] було проведено дослідження з інтелектуального алгоритму спроб і помилок для адаптації шестиногих роботів до різних видів збоїв, створивши детальну карту "поведінка-ефективність". Автори роботи [22] впровадили алгоритм навчання під назвою "Спроби і помилки без перезавантаження", що дозволило реалізувати ходьбу шестиногих роботів з різними видами відмов.

Також багато дослідників працюють над розробкою відмовостійких моделей ходи для роботів з урахуванням обох видів пошкоджень. Більшість таких моделей розроблено для шестиногих роботів, які мають кращу стійкість порівняно з чотириногими роботами через більшу кількість ніг. Дослідники в роботі [23] розробили відмовостійкі моделі ходи для шестиногих роботів, які дозволяють роботу продовжувати рухатися з урахуванням FI і FII пошкоджень. Вони оптимізували ходи, регулюючи порядок і відстань рухів тіла і кінчика стопи, щоб забезпечити статичну стійкість.

Що стосується чотириногих роботів, вони мають меншу стійкість порівняно з шестиногими, оскільки мають менше ніг. Розробка відмовостійких моделей ходи для чотириногих роботів є викликом. В роботі [23], що зазначена вище, описана розробка моделі ходи для чотириногих роботів з урахуванням FI, наприклад, триногу ходу та двофазну переривчасту ходу.

Однак варто зазначити, що розробка відмовостійких моделей ходи для чотириногих роботів є складнішим завданням порівняно зі шестиногими роботами через їхню меншу кількість ніг. Велике значення має оптимізація та розробка алгоритмів, які дозволять роботам підтримувати стабільність і

ефективність у разі пошкоджень [20].

Усі ці дослідження та розробки спрямовані на покращення функціональності та надійності наземних роботів. Але, як можна побачити, несправності є дуже серйозною проблемою для розробки наземних роботів через те, що вони вносять додаткову невизначеність в основу програми керування для даних роботів.

Додаючи до несправностей роботів невизначеність середовища їх роботи, розуміємо, що система керування повинна мати певний запас стійкості навіть при роботі в умовах, які ми не можемо передбачити заздалегідь. Тому одним з можливих рішень є використання методів керування в умовах невизначеності, які називають робастними системами керування.

1.4 Методи керування в умовах невизначеності

1.4.1 Керування в умовах невизначеності

У випадках, коли розглядаються моделі із системами керування, які мають точний математичний опис, можна спостерігати ідеалізовану ситуацію. Проте в реальних завданнях завжди існує певний рівень невизначеності. Ця невизначеність виникає з того факту, що фізичні системи в реальності та умови їхньої роботи не завжди можна моделювати з абсолютною точністю. Вони можуть зазнавати непередбачуваних змін та піддаватися різним збуренням. Термін "невизначеність" відображає неможливість отримання абсолютних знань та відображає неоднозначність параметрів. Модель реальної фізичної системи завжди буде неповною з наступних причин [24]:

- Зміна параметрів через різні обставини;
- Динамічні властивості, які не можна точно врахувати в моделі;
- Запізнення за часом, яке не враховується;
- Зміна положення робочої точки, тобто положення рівноваги;
- Шум від датчиків та похибки вимірювальних приладів;
- Непередбачені зовнішні впливи та збурення.

Це властивості, які роблять реальну фізичну систему менш точною у порівнянні із її математичним описом.

Майже в будь-якій інженерній задачі проектування системи керування існує певна ступінь невизначеності у моделі об'єкта (математичній моделі об'єкта, отриманій на основі теорії або під час ідентифікації, яка може відрізнятися від реальної технічної системи), а також у визначенні характеру вхідних збурень. Але спроектована система повинна залишатись працездатною навіть при наявності даних невизначеностей. Тож наявність невизначеності у моделі дозволяє точніше описати об'єкт керування, що, у свою чергу, сприяє розробці більш ефективної системи управління. Такі системи, які спроектовані з врахуванням невизначеностей, називають робастними [24].

1.4.2 Робастні системи керування

Сучасні системи управління переважно базуються на цифровій апаратурі, у вигляді цифрових автоматів, мікропроцесорів або комп'ютеризованих систем. Це стало можливим після появи попиту на високоточні, технологічно складні та гнучкі технічні системи на ринку управління.

На відміну від складних адаптивних систем, які можуть автоматично коригувати свою роботу у процесі функціонування, робастні системи розробляються так, щоб зберігати свої характеристики в межах визначених параметрів, навіть при їхніх невеликих змінах.

Робастне керування - це набір методів управління, спрямованих на створення контролера або регулятора, які забезпечують високу якість управління та стійкість, навіть якщо об'єкт управління відрізняється від розрахункового або математичної моделі, яка є невідомою [25]. Отже, робастність означає мінімальні зміни у виході системи управління при невеликих змінах параметрів об'єкта управління. Системи, що мають цю робастність, відомі як робастні (гнучкі) системи. Зазвичай робастні контролери використовуються для управління об'єктами з невідомою або неповною математичною моделлю та невизначеностями.

Робастні системи не завжди конкурують за якість управління з адаптивними системами, які можуть оптимізовувати свою роботу відповідно до змін зовнішніх впливів. Однак в ситуаціях, коли висока якість управління не є критичною, робастні системи мають значні переваги завдяки їхній простоті в реалізації. Створення робастних систем автоматичного управління може базуватися на різних концепціях, методах та індивідуальних підходах [25]. Важливою частиною цього процесу є використання результатів, які були отримані в рамках теорії чутливості та теорії інваріантності. Час від часу використовується метод мінімаксу, коли система синтезується як оптимальна (наприклад, з точки зору мінімізації середньоквадратичної помилки) в умовах найбільших невизначеностей зовнішніх впливів.

Основним завданням створення робастних систем управління є розробка правил управління, які гарантують стабільні виходи системи та сигнали помилок в рамках встановлених лімітів, незалежно від наявності невизначеностей у ланцюзі керування. Невизначеності можуть приймати різні форми, проте основними є шуми, нелінійності та неточності в моделі об'єкта управління [25,26].

1.4.3 Класифікація невизначенностей

Відповідно до властивостей та прояву у математичній моделі розглядаються кілька видів невизначеностей [24, 26]:

- Невизначеність параметрів. У випадку, коли модель описує фізичний об'єкт, зазвичай не відомо точні значення його параметрів, і в багатьох випадках ці значення взагалі недоступні, оскільки вони можуть змінюватися в процесі експлуатації.
- Афінна невизначеність. Ситуація, коли самі коефіцієнти поліномів стають невизначеними, є відносно рідкісною, оскільки зазвичай ці коефіцієнти не мають прямого фізичного визначення і залежать від параметрів більш складним способом. Афінна невизначеність є найпростішою моделлю такого роду структури невизначеності.

- Дробово-лінійний опис невизначеності. Дробово-лінійний опис невизначеності зазвичай зустрічається в завданнях, пов'язаних з так званою М- Δ -конфігурацією. Ця загальна схема аналізу завдань з невизначеністю здобула популярність у сучасних дослідженнях. Вона базується на ідеї того, що систему можна зобразити так, як це показано на рис. 1.1.

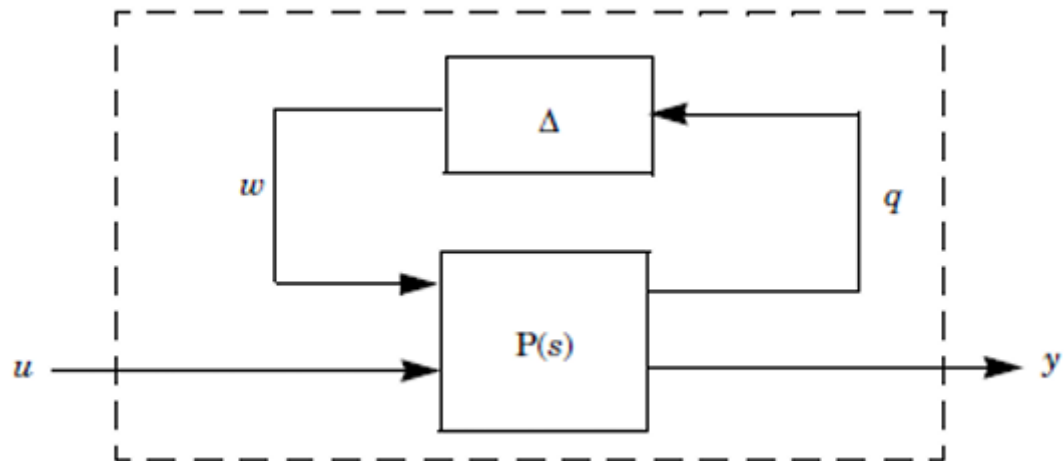


Рисунок 1.1 Приклад схеми системи з М- Δ -конфігурацією [24]

На рис. 1.1 позначено:

- система $P(s)$ що включає всі відомі компоненти об'єкту, який розглядається (контролер, номінальну модель, датчики, виконавчі механізми,...);
- вхідний вектор u включає в себе всі зовнішні впливи на систему (збурення, шум,...), а вектор y складається з усіх вихідних сигналів, що генеруються системою;
- Δ є структурований опис невизначеності, де кожен блок невизначеності визначається для одного конкретного джерела невизначеності (динаміка, нелінійність, невизначеність параметрів і т.д.).

Таким чином блок Δ відображає наближено описану невизначеність для її врахування при роботі системи

- Нестационарні та нелінійні збурення. В теорії автоматичного управління, важливо враховувати наявність нестационарних та нелінійних збурень. Нестационарність означає, що параметри системи можуть змінюватися з часом, і ці зміни пов'язані з різними факторами, такими як зношування, температурні зміни та інші динамічні впливи. Ця невизначеність може впливати на стабільність та продуктивність системи [24].

Для кожного з представлених типів невизначеностей існує своя методика синтезу систем керування. Відповідно до типу невизначеності обирається підхід до синтезу робастної системи керування.

1.4.4. Методи синтезу робастної системи

Синтез надійних систем управління включає в себе два основних завдання: визначення структури регулятора та оптимізацію його параметрів для досягнення оптимальної якості роботи системи [27].

Зазвичай процес синтезу вимагає "повної інформації про об'єкт" та моделювання об'єкта у вигляді лінійної неперервної системи з фіксованими параметрами. Структура регулятора обирається так, щоб забезпечити задовільну реакцію системи, відповідну встановленим критеріям якості.

З початку 50-х років минулого століття було розроблено численні методи та алгоритми для робастного синтезу систем управління [25-27]. Робастні системи управління можуть включати як класичні, так і адаптивні або нечіткі елементи. Нижче наведено основні технології для синтезу надійних систем управління [27]:

- Метод p -синтезу - цей метод спрямований на забезпечення як стійкості, так і чутливості системи. Він має переваги, такі як завжди стійкий замкнутий контур та точне формування передавальної функції контролера. Однак недоліком є значна кількість ітерацій.
- LQG-синтез - лінійно-квадратичне управління Гауса (LQG управління) представляє собою набір методів та математичних інструментів для синтезу систем управління з від'ємним зворотнім зв'язком для лінійних систем з гаусовими аддитивними шумами. Синтез виконується за допомогою

мінімізації квадратичного функціоналу. Цей метод використовує доступну інформацію про шуми, хоча не гарантує стійкості і вимагає точної моделі об'єкта та багато ітерацій.

- LQR-синтез - лінійний квадратичний регулятор (LQR) представляє собою один з видів оптимальних регуляторів в теорії управління, який використовує квадратичний функціонал якості. Цей метод гарантує робастну стійкість, але потребує зворотного зв'язку для всього вектора стану, точну модель об'єкта та значну кількість ітерацій.
- Метод H_∞ -синтезу - цей метод також забезпечує як стійкість, так і чутливість системи. Замкнутий контур завжди залишається стійким, і метод має прямий однопрохідний алгоритм синтезу. Але метод H_∞ вимагає особливої уваги до параметричної робастності об'єкта управління [24].

1.5 Огляд попередніх робіт за темою дослідження

В роботі [28] розглядається задача зменшення обмежених за модулем зовнішніх збурень для стабілізації гелікоптера в режимі висіння та методи її розв'язання. Автори даної роботи представляють два методи синтезу системи поліпшення стійкості та керованості гелікоптера: метод ЛМН (лінійних матричних нерівностей) і метод H_∞ -оптимізації [28].

Спочатку розглядається метод ЛМН для вирішення задачі. Цей метод включає три основні етапи:

- На першому етапі проводять синтез мінімального регулятора для динамічної системи з використанням лінійно-квадратичної задачі, і важливо, щоб цей регулятор гарантував виконання умов обмеження на ступінь придушення збурень, що діють на систему.
- На другому етапі розв'язують обернену лінійно-квадратичну задачу для синтезованого регулятора, визначають вагові матриці для задачі H_∞ -оптимізації та виконують процедуру мінімізації скаляра λ , що обмежує спектральну норму стабілізаційного регулятора.

- На третьому етапі синтезується H_2 -оптимальний регулятор і формується статичний зворотний зв'язок за виходом системи. Якщо об'єкт керування нестійкий, вводиться параметр μ , який спрощує вибір початкового значення матриці коефіцієнтів підсилення регулятора.

У результаті розв'язання задачі оптимізації визначають оптимальні значення параметра μ і коефіцієнтів підсилення регулятора, що задовольняють заданим умовам [28].

Серед позитивних сторін використання даного методу можна відзначити те, що він є більш формалізованим і через це більш надійним при проектуванні та менш залежним від досвіду дослідника, що робить його більш доступним. До мінусів же відносимо більшу ресурсовитратність, меншу спектральну норму отриманого регулятора та менший ступінь зниження зовнішніх впливів у порівнянні з H_∞ -оптимізацією/

Метод H_∞ -оптимізації керування є ефективним інструментом для синтезу стабілізаційного регулятора в задачі придушення зовнішніх збурень. Він базується на теорії H_∞ -оптимізації керування, де основний наголос робиться на найгірший із можливих сценаріїв, і дає змогу врахувати невизначеність у моделі об'єкта керування та характеристиках збурень. Цей метод являє собою процес синтезу регулятора, який мінімізує нескінчену H -норму функції зваженої чутливості та забезпечує робастність системи. Метод ∞H_∞ -оптимізації містить ітераційний процес, під час якого регулятор підлаштовують для досягнення заданих вимог на якість і робастність системи [28].

До переваг цього методу можемо віднести високий рівень придушення зовнішніх збурень, порівняно з методом ЛМН. До недоліків же відносимо складність вибору вагових функцій та складність практичної реалізації.

Не дивлячись на недоліки, властиві двом розглянутим методам, результати синтезу і моделювання демонструють досить високий рівень придушення зовнішніх збурень для нестійкої системи. А отже обидва методи є ефективними у даній задачі.

В роботі [29] розглядається синтез робастної системи для стабілізації та керування орієнтацією вимірювальних осей пристроїв, що функціонують на рухомій основі. Синтез системи проходить за змішаним критерієм, який поєднує методи H_2 -оптимізації та H_∞ -оптимізації, що дозволяє поєднувати переваги цих двох методів. Таким чином, завдяки використанню H_2 -оптимізації ми отримуємо високу точність синтезованої системи, яка при цьому залишається чутливою до зовнішніх збурень і параметричних збурень об'єкта керування. Застосування при цьому H_∞ -оптимізації дозволяє забезпечити стійкість системи до зовнішніх збурень за умови її параметричної невизначеності. Синтезована таким чином система може характеризуватись оптимальною якістю за умови можливості її функціонування за наявності збурень [29].

Судячи з результатів, отриманих в роботі [29], можна зробити висновок, що метод синтезу робастної системи, використаний в даній роботі є ефективним, адже результати моделювання показують, що отриманий алгоритм структурно-параметричного синтезу системи стабілізації вимірювальних пристроїв на рухомій основі дозволяє підвищити стійкість системи та точність отриманих значень.

У статті [30] розглядається синтез системи керування польотом з використанням μ -синтезу для стабілізації висоти та швидкості польоту при впливі зовнішніх збурень, обмежених по модулю. Важливим аспектом є те, що μ -синтез здатний вирішувати цю задачу навіть в умовах невизначеності не лише щодо параметрів, але і щодо структури об'єкта, включаючи повністю нелінійну модель літального апарата (ЛА). Загалом, метод μ -синтезу виявляється більш ефективним у порівнянні з процедурою H_∞ -оптимізації для цієї конкретної задачі стабілізації польоту.

При використанні даного методу робастного синтезу регулятора на основі технології μ -синтезу, як показано в роботі [30], основна процедура полягає в пошуку структури та параметрів регулятора за допомогою одночасного вирішення двох рівнянь Ріккаті. Метод μ -синтезу показує свою ефективність для одновимірних систем, однак в багатовимірних системах його результати можуть

бути поліпшені. Використання даної методики відзначається можливістю отримання ефективних результатів у порівнянні з відомою процедурою H_∞ -синтезу.

В якості результату дослідження в роботі [30] отриманий робастний регулятор, в результаті застосування μ -синтезу, забезпечує збереження робастної стійкості та робастної якості при значних змінах швидкості літака, що неможливо досягти застосовуючи процедуру H_∞ -синтезу. Результати моделювання з використанням повної нелінійної моделі ілюструють функціональність синтезованої системи управління польотами як для структурованих, так і для неструктурованих параметричних збурень.

На основі цього бачимо, що метод μ -синтезу є також ефективним методом синтезу робастної системи керування.

Робота [31] присвячена дослідженню синтезу робастного регулятора для керування турбогенератором в електроенергетичній системі. Турбогенератори стикаються з низькочастотними коливаннями, викликаними різними факторами, такими як зміна навантаження, комутації та несинхронні увімкнення. Для забезпечення стійкості системи застосовуються автоматичні регулятори збудження та автоматичні регулятори частоти обертання турбіни (АРЗ і АРЧО). Однак, незалежний синтез цих регуляторів може негативно вплинути на їх сумісну роботу через спільні канали регулювання. Тому в роботі виникає завдання синтезу системи взаємозв'язаного керування турбогенератором, яка корегує роботу АРЗ і АРЧО для забезпечення функцій системного стабілізатора.

Автори вважають, що μ -синтез є відповідним методом для досягнення поставленої мети. Використання алгоритму μ -синтезу дозволяє забезпечити робастну стійкість системи відносно параметрів режиму, включаючи такі невизначеності, як неточності електромагнітних і механічних параметрів турбогенераторів, нелінійна залежність параметрів від режимів, такі як насичення або зміна активних опорів від температури, тощо. Цей метод, який базується на теорії керування, дозволяє створити регулятор, який залишається стійким та ефективним навіть у разі наявності цих невизначеностей.

Загальна практична застосовність цього підходу демонструється через реалізацію алгоритму μ -синтезу в середовищі MATLAB і використання бібліотеки Robust Control Toolbox для автоматизації процесу синтезу робастного регулятора. Результати дослідження показують, що запропонований підхід є ефективним і дозволяє поліпшити стійкість та якість керування турбогенератором в електроенергетичній системі.

В роботі [32] представлено дослідження, спрямоване на синтез робастної системи наведення твердого тіла з використанням теорії робастного керування. Робота розглядає методику побудови такої системи з метою гарантувати необхідну якість наведення при наявності невизначеності в параметрах моделі. Важливими вимогами до робастної системи є низька чутливість до великого діапазону змін параметрів, стійкість, висока якість, і використання підходу "Nominal Performance-Robust Stability" (NPRS).

Дослідження використовує H_2 -норму та H_∞ -норму для оцінки якості та робастності системи під час детермінованих і випадкових збурень. Синтез системи наведення проводився з використанням H_2/H_∞ -робастної оптимізації. Результати показують, що синтезована система має високу якість та робастність, і може бути додатково покращена для підвищення робастності.

Аналіз чисельних результатів показує, що номінальна система близька до системи з параметричними збуреннями. Максимальні значення відхилення кута атаки та кута відхилення рулів не перевищують необхідних характеристик. Порівняння значень середньоквадратичних відхилень підтверджує ефективність оптимізації з урахуванням обмеження коливальності системи.

Отже, робота [32] демонструє успішний синтез робастної системи наведення твердого тіла з використанням робастних методів керування та може бути корисною для подальших досліджень у цій галузі.

1.6 Мета і завдання даних наукових досліджень

Огляд стану проблеми показав значний науковий та практичний інтерес до створення та вдосконалення мобільних роботів, зокрема, крокуючих. В оглянутих

наукових джерелах наведено результати досліджень, які охоплюють різні аспекти розробки крокуючих МР, які стосуються конструкції, системи керування, моделювання, алгоритмічного та програмного забезпечення, експериментальних досліджень. Але недостатньо дослідженим є те, що під час руху крокуючий робот може отримувати пошкодження, які впливають на його рух або навіть унеможлиблюючи його. Через це постає необхідність розробки таких систем керування роботом, які б забезпечували можливість стійкого руху МР у разі непрацездатності чи втрати однієї з кінцівок.

Найбільш ефективним рішенням цього є створення робастної системи, яка здатна працювати в умовах невизначеності, під яку підпадають несправності крокуючого робота. Огляд показав велику кількість робіт, в яких синтезуються чи вдосконалюються робастні системи керування різноманітними об'єктами та процесами. Але для розробки робастної системи керування рухом гексапода необхідно дослідити кінематику його руху, розглянути та обрати алгоритми для його переміщення, і лише на основі результатів таких досліджень можна розробити робастну систему керування, яка забезпечить стійкий рух гексапода при відмові однієї з його ніг.

Метою даних досліджень є забезпечення стійкого (стабільного) руху гексаподу при відмові однієї з ніжок.

Для досягнення поставленої мети в кваліфікаційній роботі виконуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд мобільних роботів (гексаподів), аналіз крокуючих гексаподів та систем керування їх рухом, формування вимог до системи керування в умовах невизначеності.
2. Аналіз математичної моделі крокуючого мобільного робота, обґрунтування та врахування невизначеності в математичній моделі.
3. Аналіз алгоритмів руху гексаподу при відмові однієї ноги. Обґрунтування обраного алгоритму руху гексаподу.
4. Обґрунтування та розробка програмної моделі руху гексаподу.

5. Моделювання та аналіз переміщення гексаподу при відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги.
6. Розробка структури робастної системи керування рухом гексапода.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

В попередньому розділі була розглянута загальна інформація, що стосується типів, будови, сфер використання та можливих пошкоджень при їх роботі. Серед великої кількості багатоногих роботів, роботи-гексаподи наразі користуються особливим попитом у виконанні різноманітних завдань.

Шестиногі роботи мають численні переваги порівняно з іншими видами багатоногих рухомих систем [33]:

- здатність легко утримувати рівновагу під час руху (мають статичну стійкість);
- можливість адаптуватися до різних нерівних поверхонь;
- можливість завдяки додатковим ногам продовжувати виконувати завдання навіть у випадку втрати однієї кінцівки;
- здатність переміщуватись в будь-якому напрямку і менше залежати від умов оточуючого середовища, ніж роботи на колесах.

Ці особливості роблять їх ідеальними для виконання завдань, які вимагають певного рівня автономності та високої надійності.

В даному розділі представлена методика та результати математичного моделювання окремо взятої конструкції ноги та будови малого крокуючого робота, який має 6 симетрично розташованих ніг та який може здійснювати поступальний рух по прямій лінії.

2.1 Постановка завдання математичного моделювання

Для моделювання була обрана конструкція гексапода, що має 6 ніг. Тіло гексаподу представлено у вигляді правильного шестикутника, вписаного у коло радіусом R_0 . Ноги розташовані на вершинах шестикутника і складаються з 3-х суглобів, які з'єднані 3-ма ланками. Обрана конструкція гексаподу представлена на рис. 2.1.

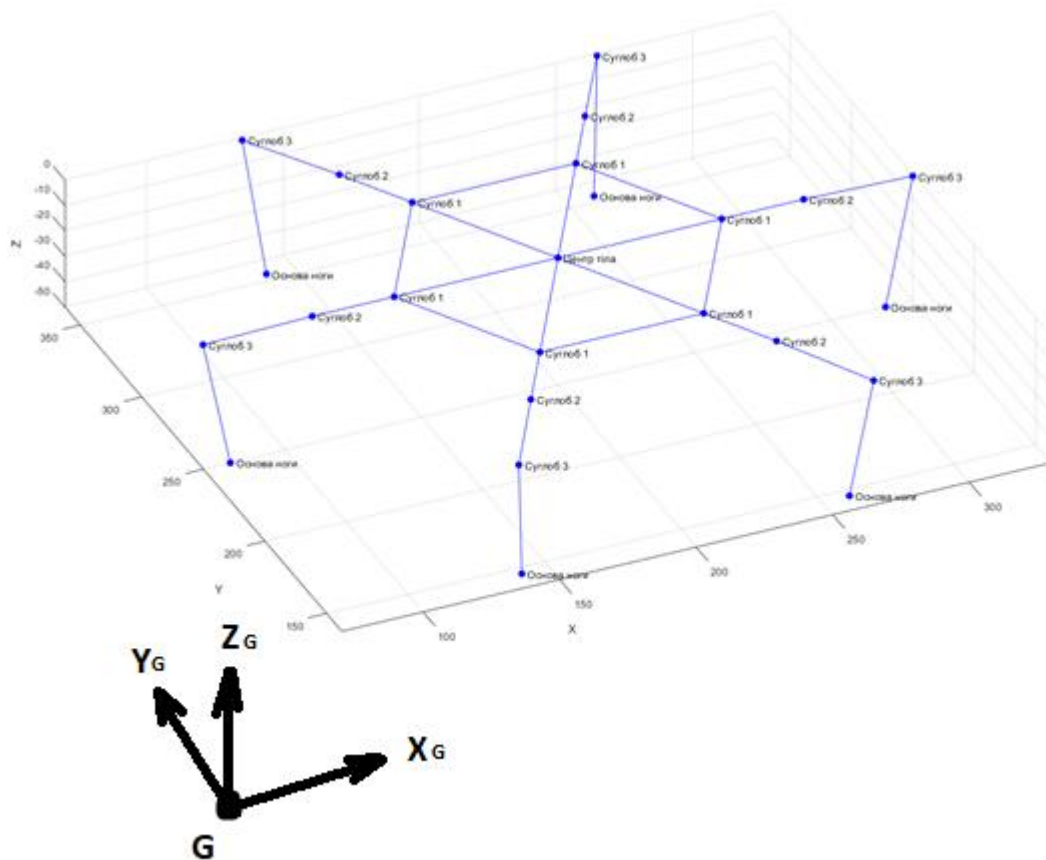


Рисунок 2.1. Зображення обраної моделі гексаподу

Успішне проектування шестиногих роботів в основному залежить від конструкції обраних ніг. Основні аспекти руху цих роботів визначаються фізичними обмеженнями їхніх кінцівок. Тому важливим етапом розробки крокуючого робота є вибір конструкції ноги, яка забезпечить максимальний діапазон рухів і не створить надмірних обмежень, що можуть впливати на рух робота. Цей робот має симетричну структуру, що складається з шести ідентичних ніг, кожна з яких має по три ступені свободи обертального типу.

Завдяки симетрії, аналіз може бути проведений на одній нозі. На рис.2.2 [33] наведено загальний вигляд ноги крокуючого робота, на якому зображено: Суглоб 1 - це місце, де нога з'єднується з тілом робота (яке називається "грудна клітка"); ланка 1 називається "кісточка"; ланка 2 - "стегнова кістка"; ланка 3 - "гомілкова кістка". Для розробки математичної моделі гексапода з такою будовою тіла, по-перше необхідно визначити, як саме буде будуватись тіло гексаподу в моделі.

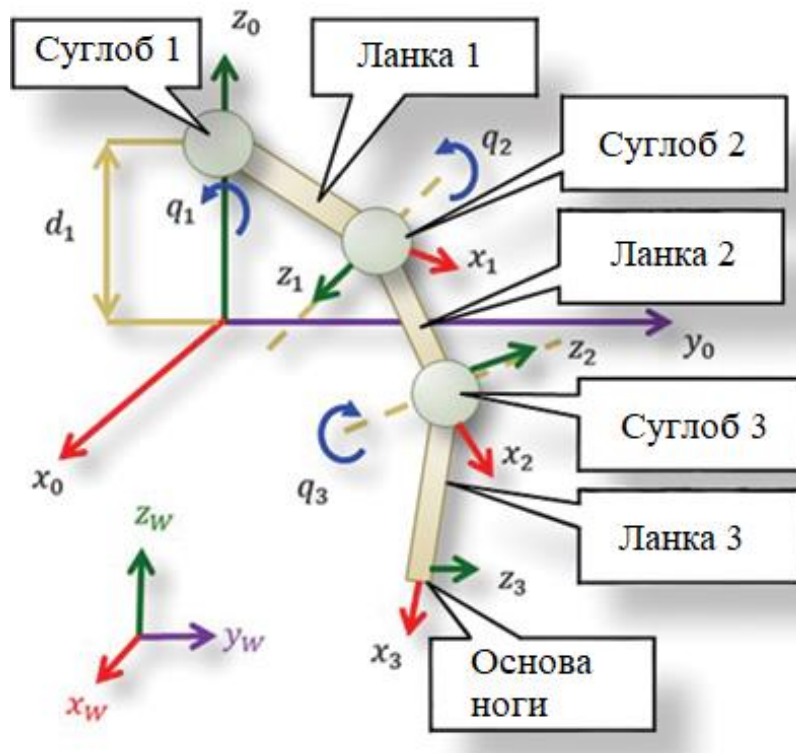


Рисунок 2.2. Модель ноги крокуючого робота [33]

Далі необхідно буде побудувати кінематичну модель ноги робота, що проектується, і приєднати її до тіла робота, отримавши таким чином повноцінні рівняння кінематики кінцівки робота, які будуть за поданими кутами поворотів суглобів задавати положення приєднаної до тіла робота ноги.

Задача з кінематики полягає в тому, щоб при відомих довжинах ланок та відомих кутах поворотів суглобів визначити позицію, в якій буде знаходитись основа ноги. Для вирішення цієї задачі або будують кінематичні рівняння на основі кінематики ноги, представленої на рис. 2.2, або використовують алгоритм Денавіта-Хартенберга [34]. В даній роботі ми будемо будувати рівняння кінематики на основі кінематики ноги, представленої на рис. 2.2.

Після отримання рівнянь кінематики ноги робота, наступним кроком стає отримання зворотних кінематичних рівнянь, які дозволять задавати кінцеву позицію ноги робота і отримувати необхідні кути повороту суглобів для переміщення ноги в цю позицію.

На відміну від проблеми прямої кінематики, процедура отримання рівнянь значною мірою залежить від конфігурації робота, що робить її складною

процедурою, оскільки систематично отримувати ці рівняння дуже складно, навіть просто неможливо. Здебільшого це зводиться до вирішення системи рівнянь з трьома невідомими. Але в даній роботі зворотні рівняння будуть отримуватись аналогічно до прямої кінематики – через кінематику з рис. 2.2.

Тільки після отримання зворотних кінематичних рівнянь стає можливим отримання кутів повороту суглобів ноги робота для переміщення основи його ноги в необхідне нам положення. На цьому етапі можна розпочинати програмну реалізацію моделі гексаподу.

2.2 Побудова тіла гексаподу

Розглянемо географічну систему координат $O_G X_G Y_G Z_G$ та систему координат $OXYZ$, пов'язану з тілом гексаподу. Для побудови тіла гексаподу необхідно мати координати центру тіла, який розмістимо в точці початку пов'язаної системи координат O (положення точки O у тривимірному просторі позначаємо O_x, O_y, O_z , відповідно). Від цієї точки буде проходити побудова усього гексаподу.

Далі необхідно побудувати тіло. Побудова тіла відбувається визначенням 6-ти точок, які будуть вершинами правильного шестикутника, який і буде представляти собою тіло гексаподу. Координати цих вершин, які позначаються як B_{xi}, B_{yi}, B_{zi} , отримуємо з рівнянь:

$$\begin{aligned} B_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x \\ B_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y \\ B_{zi} &= O_z \end{aligned}, \quad (2.1)$$

де O_x, O_y, O_z – координати центру тіла; φ – кут нахилу прямої, проведеної від центру тіла до вершини шестикутника тіла гексаподу, до вісі абсцис; R_0 – радіус кола, в яке вписаний шестикутник, відстань від центра до вершини.

Графічна побудова тіла гексаподу при заданих в умовних одиницях координатах центру тіла $O(200,250,0)$ та $R_0=57,5$ представлено на рис. 2.3.

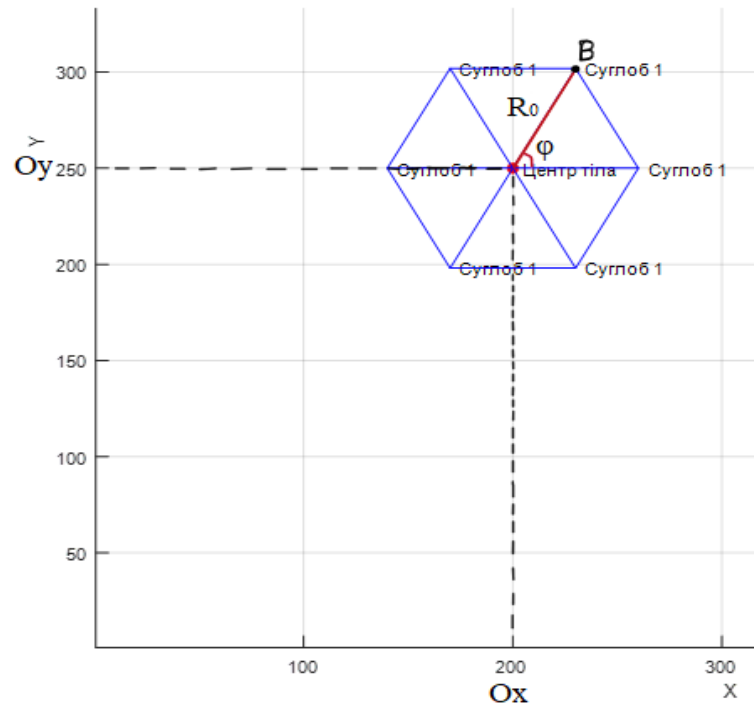


Рисунок 2.3. Графічне представлення побудови тіла гексаподу

Як результат моделювання тіла гексаподу отримуємо координати місць встановлення ніжок на гексаподі і можемо приступати до моделювання кінематики ноги гексаподу.

2.3 Моделювання ноги гексаподу. Прямі кінематичні рівняння

Як було зазначено вище, усі ноги гексаподу представляють собою абсолютно однакові конструкції. Це означає, що для моделювання необхідно отримати кінематичні рівняння лише однієї ноги, а інші ноги будуть мати такі самі кінематичні рівняння. За основну кінематичну модель приймаємо представлення ноги гексаподу, наведене на рис. 2.2. Суглоб 1, який приєднаний до тіла гексаподу, здатен повертатись лише навколо осі z , і кут його повороту позначаємо як α ; Суглоб 2 і Суглоб 3 обертаються навколо осі, перпендикулярній до площини ноги, і їх кути повороту відповідно будуть β та γ . Довжини ланок, що сполучають Суглоб 1, Суглоб 2 та Суглоб 3 відповідно позначимо як l_1 , l_2 , та l_3 .

Координати Суглобу 1 визначаємо з рівнянь (2.1), тому спочатку виведемо рівняння для знаходження координат Суглобу 2. Нехай точка Суглобу 2 буде

позначена як точка С, з координатами у тривимірному просторі C_{xi} , C_{yi} , C_{zi} . Схематично всі змінні для складання рівняння показані на рис. 2.4.

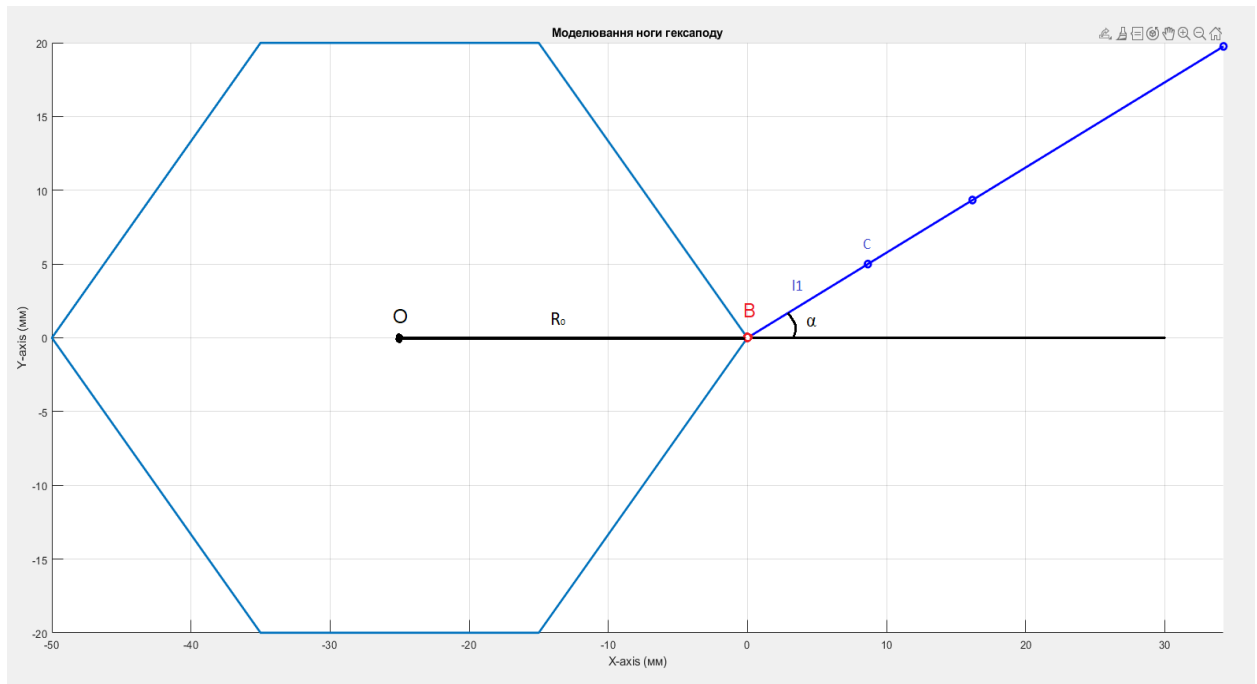


Рисунок 2.4. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою, вигляд зверху

За будовою ноги гексаподу, Суглоб 1 повертає ланку l_1 лише в площині Oxy , тому координата z в точці C залишається такою самою як і в точці B . Кут α є кутом повороту Суглобу 1, і знаючи довжину ланки l_1 ми можемо визначити положення точки C в площині Oxy аналогічно до переведення координат з полярної системи в декартову, тобто:

$$\begin{aligned} C_{xi} &= B_{xi} + l_1 \cdot \cos(\alpha) \\ C_{yi} &= B_{yi} + l_1 \cdot \sin(\alpha) \\ C_{zi} &= B_{zi} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Але в даних рівняннях не враховується кут φ , який також треба враховувати для правильного визначення положення точки C на різних ногах. Тому на рис. 2.5 наведемо інший випадок положення ноги гексаподу (він має місце, коли розглядаються ті ноги гексаподу, для яких лінія з'єднання центру тіла з Суглобом 1 має іншу орієнтацію на площині, зокрема не є паралельною прийнятому

розташуванню осі x).

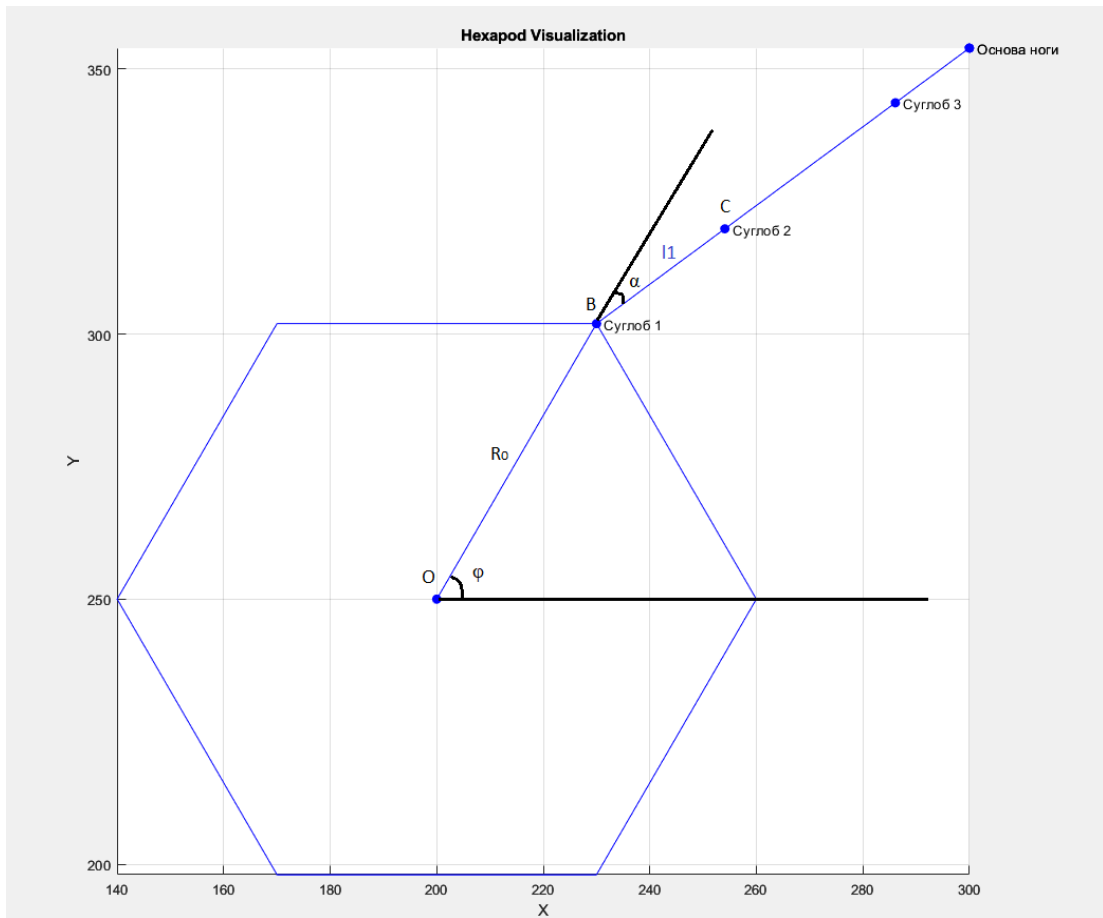


Рисунок 2.5. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою, вигляд зверху, варіант з кутом φ

Як можна побачити з рис. 2.5, кут нахилу ланки l_1 до осі абсцис складається з суми кутів φ та α , причому в даному випадку кут $\alpha < 0$, бо відносно прямої R_0 ланка l_1 відхиляється у протилежному до кута φ напрямку, який ми будемо вважати за додатній. З урахуванням викладеного, отримаємо скоректовані рівняння для визначення координат точки C:

$$\begin{aligned} C_{xi} &= B_{xi} + l_1 \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\ C_{yi} &= B_{yi} + l_1 \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\ C_{zi} &= B_{zi} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Якщо підставити у рівняння (2.3) рівняння (2.1), то отримаємо загальний

вигляд рівнянь для координат Суглобу 2:

$$\begin{aligned} C_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\ C_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\ C_{zi} &= O_z \end{aligned} \quad (2.4)$$

Далі знаходимо координати Суглобу 3, який позначимо як точку D, аналогічно до знаходження координат Суглобу 2. Знаючи довжину ланки l_2 , що з'єднує Суглоб 2 та Суглоб 3, координати положення Суглобу 2, а також кут β (кут нахилу ланки l_2 відносно площини, в якій знаходиться тіло гексаподу), знаходимо проекції ланки l_2 на координатні вісі, аналогічно до рівнянь (2.2)-(2.4). Графічно всі змінні представлені на рис. 2.6, а ті змінні, які не вказані на рис. 2.6, взяті аналогічно до рис. 2.5.

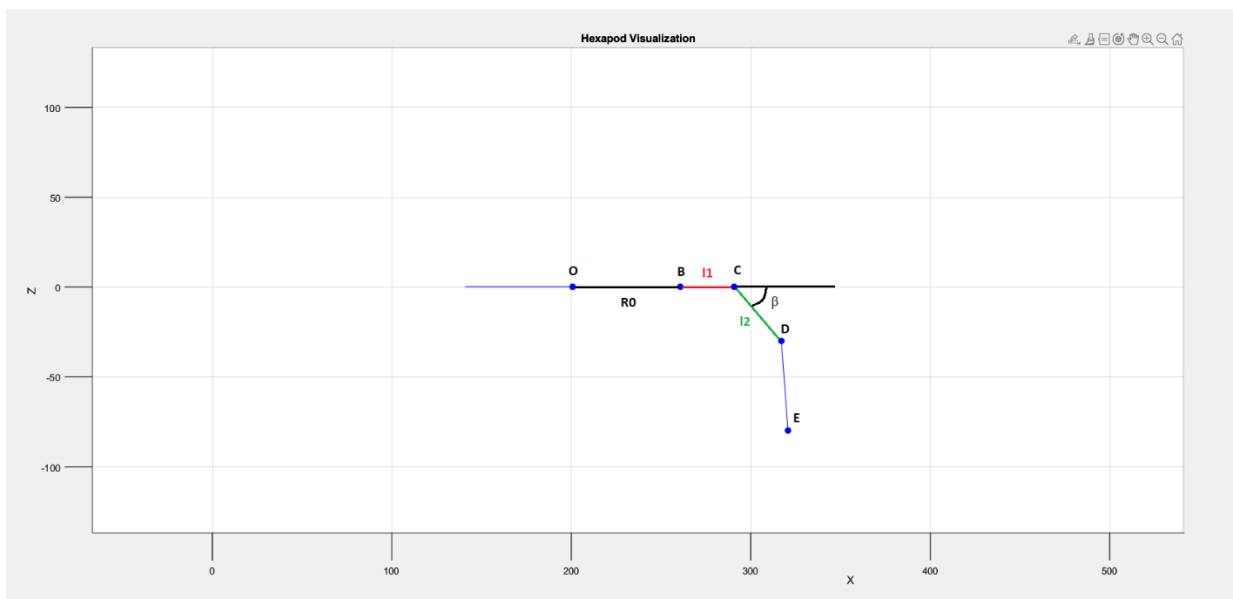


Рисунок 2.6. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою, вигляд перпендикулярно площі ноги

Як можна побачити з рис. 2.6, Суглоб 2 відхиляє ланку l_2 від площини Oxy на кут β , тому для отримання координат точки D по осі абсцис та ординат необхідно отримати проекцію ланки l_2 на площину Oxy , після чого знайти координати D_{xi} та D_{yi} аналогічно до C_{xi} та C_{yi} . Координата D_{zi} знаходиться як проекція ланки l_2 на вісь z . Складаємо рівняння:

$$\begin{aligned}
 D_{xi} &= C_{xi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\
 D_{yi} &= C_{yi} + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\
 D_{zi} &= C_{zi} + l_2 \cdot \sin(\beta)
 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Підставимо в рівняння (2.5) рівняння (2.4) і отримаємо загальні рівняння для визначення координат точки D:

$$\begin{aligned}
 D_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\alpha + \varphi) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\
 D_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\alpha + \varphi) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\
 D_{zi} &= O_z + l_2 \cdot \sin(\beta)
 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Визначення координат для основи ноги, яку ми позначимо як точку E, здебільшого аналогічне до отримання координат точки D, з поправкою на те, що кут нахилу до площини Oxy тепер складається з суми кутів β та γ . Схематичне зображення, необхідне для розуміння розрахунків, представлено на рис.2.7.

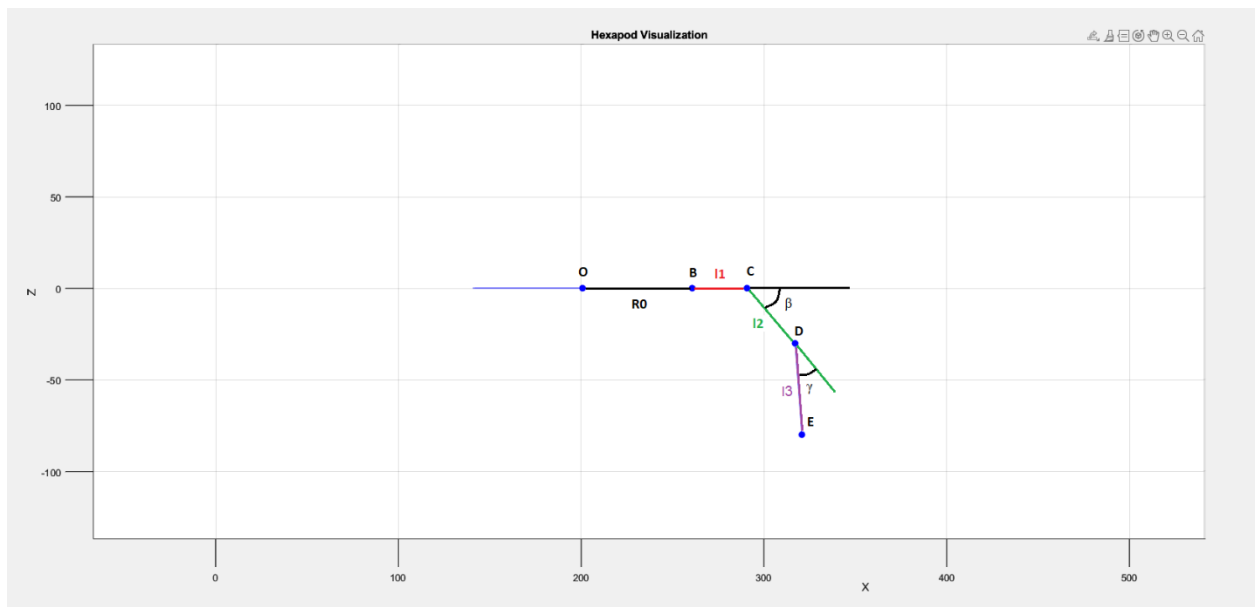


Рисунок 2.7. Схематичне зображення гексаподу з однією ногою, вигляд перпендикулярно площі ноги

Аналогічно до знаходження координат Суглобу 3, ми визначаємо координати точки E за проекцією ланки l3 на площину Oxy. Кут відхилення ланки від площини Oxy є сумою кутів β та γ . Процедура отримання рівнянь для

визначення координат точки E аналогічна виведенням рівнянь (2.5).

$$\begin{aligned} E_{xi} &= D_{xi} + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma) \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\ E_{yi} &= D_{yi} + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma) \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\ E_{zi} &= D_{zi} + l_3 \cdot \sin(\beta + \gamma) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Підставивши в рівняння (2.7) значення координат точки D, отримані в рівняннях (2.6), отримуємо повні рівняння для знаходження координат основи ноги відносно положення центру тіла гексаподу:

$$\begin{aligned} E_{xi} &= R_0 \cdot \cos(\varphi_i) + O_x + l_1 \cdot \cos(\alpha + \varphi) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha + \varphi) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma) \cdot \cos(\alpha + \varphi) \\ E_{yi} &= R_0 \cdot \sin(\varphi_i) + O_y + l_1 \cdot \sin(\alpha + \varphi) + l_2 \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha + \varphi) + l_3 \cdot \cos(\beta + \gamma) \cdot \sin(\alpha + \varphi) \\ E_{zi} &= O_z + l_2 \cdot \sin(\beta) + l_3 \cdot \sin(\beta + \gamma) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Рівняння (2.1), (2.4), (2.6) та (2.8) разом з точкою O є всіма необхідними точками для моделювання ноги гексаподу. В залежності від зміни кута φ та R_0 ми можемо обирати положення ноги на тілі гексаподу. Завдяки рівнянням (2.4), (2.6) та (2.8) ми можемо відобразити положення ноги гексаподу при наявних кутах α , β та γ . Також через те, що кожна нога гексаподу є ідентичною до інших, рівняння (2.4), (2.6) та (2.8) можна використати для моделювання усіх 6-ти ніг гексаподу.

2.4 Зворотні кінематичні рівняння

Рівняння (2.4), (2.6) та (2.8) корисні для графічного зображення гексаподу, але зі збільшенням складності системи бажано, щоб робот виконував максимальну кількість обчислень, оскільки обчислювальні можливості людини-оператора є обмеженими. Також, розрахунок кута повороту суглобів для 6 ніг, необхідний для переміщення робота-гексапода з позиції A в позицію B, представляє собою складне завдання для оператора. Отже, робот повинен виконати цей розрахунок самостійно і мати здатність перемістити основу ноги в задані координати. Це завдання вирішується за допомогою рівнянь зворотної кінематики, де обчислюються кути згину суглобів ноги, необхідні для того, щоб кінець ноги досягнув певних координат X, Y і Z.

Для отримання зворотних кінематичних рівнянь буде використовуватись

кінематика з рис. 2.2, аналогічно до методики отримання прямих кінематичних рівнянь, але кути α , β та γ тепер є невідомими, координати положення Суглобу 1 та основи ноги (В та Е відповідно) - відомі. На основі цих вхідних даних можемо одразу знайти кут α відповідно до наведеної на рис. 2.8 схеми.

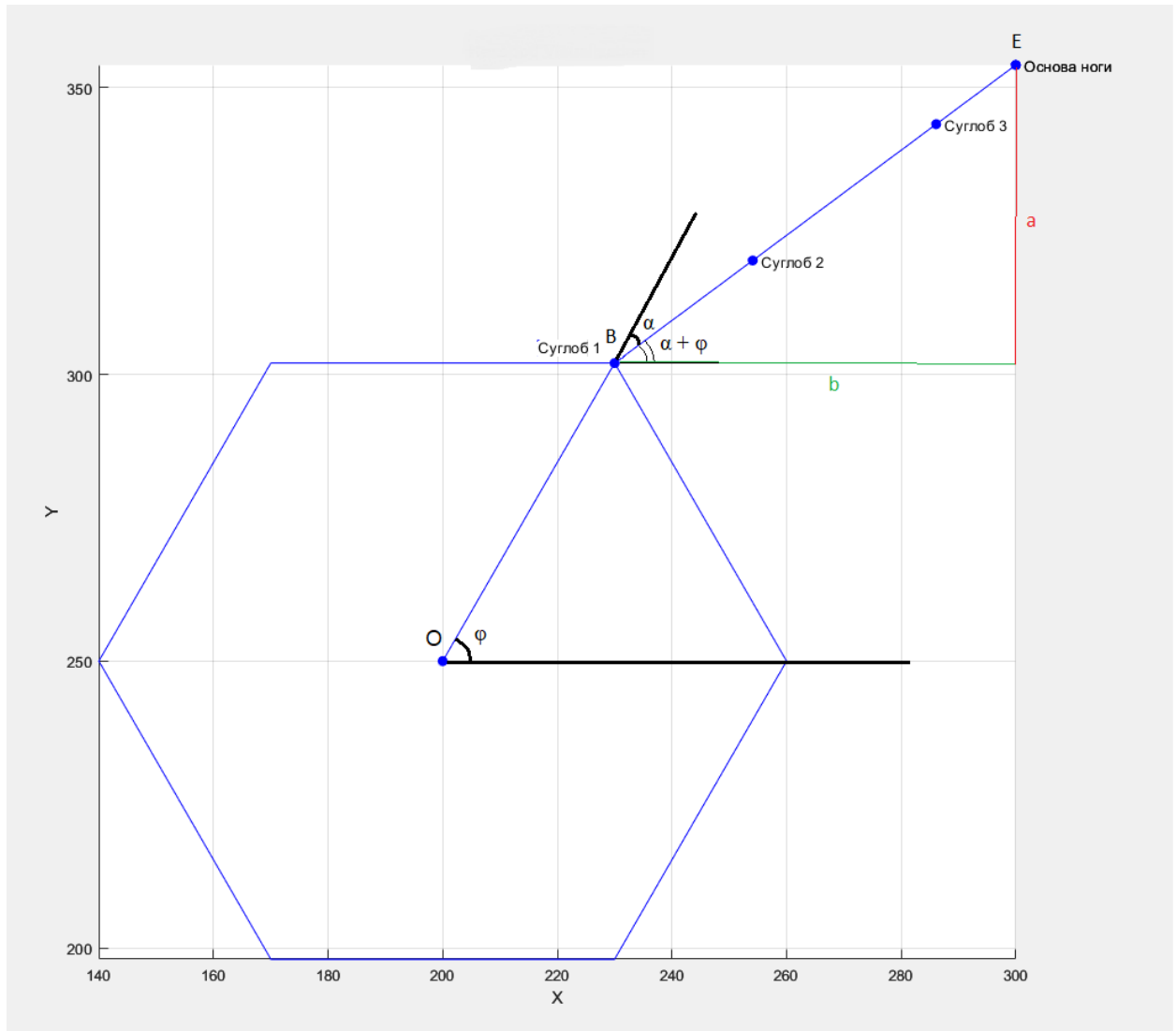


Рисунок 2.8. Вигляд зверху на гексапод. Схематичне зображення для визначення кута α

На рис. 2.8 показано вигляд зверху однієї ноги робота. Координати основи ноги визначені як (E_x, E_y) і кут повороту навколо осі Z визначається сумою $(\alpha + \varphi)$. Початок координат може бути визначений в точці Суглобу 1, так як єдиний вплив такого визначення початку координат перенесення центру координат в точку Суглобу 1 - це додавання зміщення для точки основи ноги гексаподу на величину

початкового положення Суглобу 1. Кут $(\alpha + \varphi)$ обчислюється як арктангенс відношення координати осі ординат до координати осі абсцис основи ноги. Тоді ми можемо виразити це у формулі:

$$\begin{aligned}\alpha + \varphi &= \arctan(a / b) \\ a &= E_{yi} - B_{yi} \\ b &= E_{xi} - B_{xi}\end{aligned}\quad (2.9)$$

З рівнянь (2.9) отримуємо кут $(\alpha + \varphi)$, з якого визначаємо кут α :

$$\alpha = \arctan(E_{yi} - B_{yi} / E_{xi} - B_{xi}) - \varphi_i \quad (2.10)$$

Для отримання кутів β та γ необхідно представити вигляд перпендикулярно площі ноги гексаподу, як показано на рис. 2.9 [35].

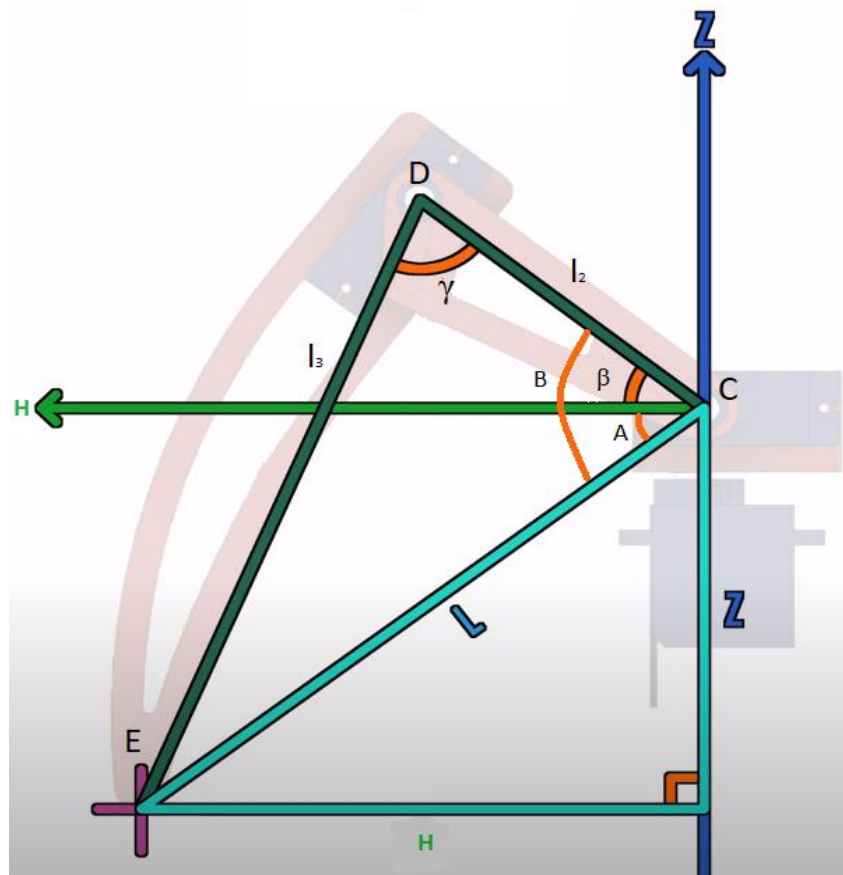


Рисунок 2.9. Графічна схема для розрахунку кутів β та γ [35]

Значення кутів β та γ може бути отримане завдяки використанню теореми косинусів. Для її використання необхідно знайти значення всіх сторін, що

утворюють трикутник CDE. Сторони CD та DE відомі, бо закладені конструкцією гексаподу. Сторону CE можна знайти за теоремою Піфагора з 2-х інших сторін, що утворюють прямокутний трикутник з гіпотенузою CE: координата по вісі Z для кінця ноги та сума проекцій ланок l_2 та l_3 на площину Oxy, яка представлена змінною H. Тоді:

$$H = \sqrt{(E_x - C_x)^2 + (E_y - C_y)^2} \quad (2.11)$$

$$L = \sqrt{H^2 + (E_z - C_z)^2} \quad (2.12)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - L^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right) \quad (2.13)$$

$$B = \arccos\left(\frac{L^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot L \cdot l_2}\right) \quad (2.14)$$

$$A = \arctan(Z^2 / H^2) \quad (2.15)$$

$$\beta = B - A \quad (2.16)$$

Рівняння (2.9)-(2.16) дозволяють визначити кути β та γ .

Як результат, при подачі на вхід комплексу кінематичних рівнянь (2.9)-(2.16) бажаного положення ноги гексаподу ми отримуємо кути, на які необхідно повернути суглоби для переміщення основи ноги в бажане положення.

2.5 Обґрунтування фаз циклу руху та алгоритму переміщення ніг

У цьому підрозділі представлено огляд фаз циклу руху ноги гексаподу, розібрано комбінації ніг, які застосовуються для одного циклу переміщення та обґрунтована таблиця послідовності використання ніг для руху при всіх працюючих ногах та при пошкодженні однієї ноги.

Цикл руху ноги, що складається з підйому і розміщення ноги, включає дві фази: фазу замаху і фазу опори. У фазі замаху нога переміщується з початкового в кінцеве положення в повітрі, як показано синьою пунктирною лінією на рис. 2.10 [36]. І навпаки, під час фази стійкості основа ноги підтримує контакт з землею, переходячи з кінцевого положення назад у початкове, приводячи робота в рух у

напрямку, протилежному напрямку червоної стрілки (рис. 2.10).

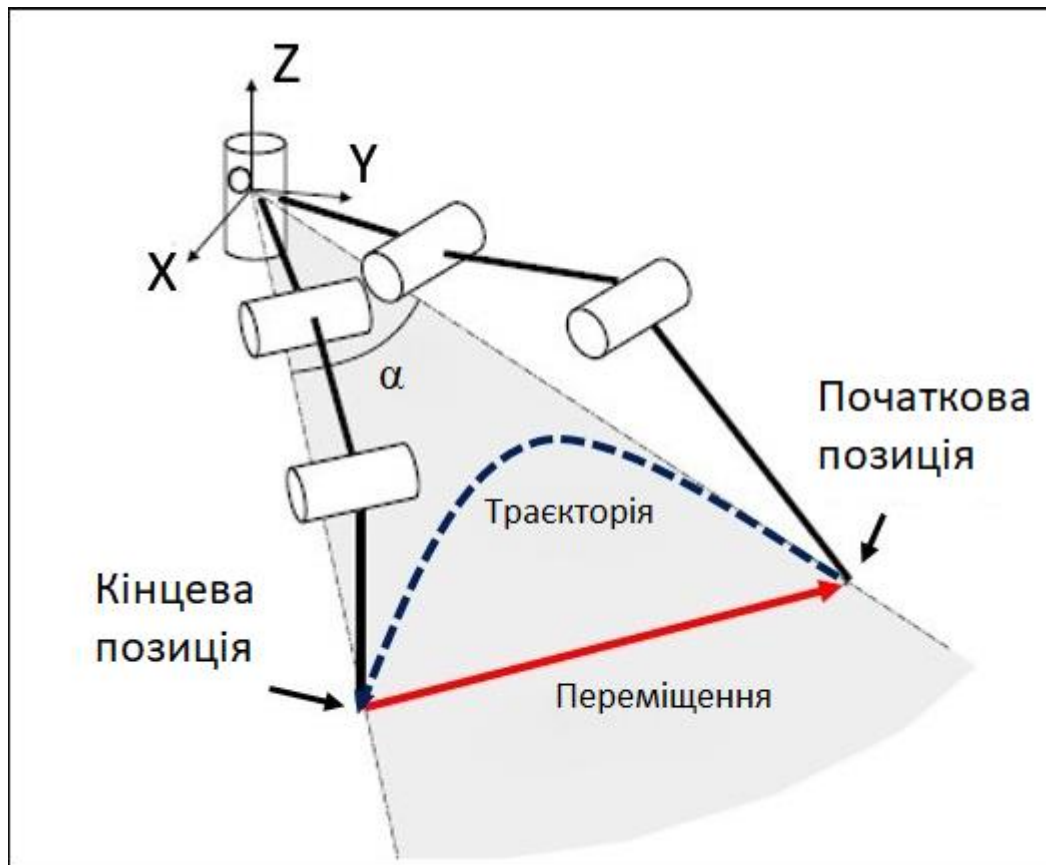


Рисунок 2.10. Ілюстрація переміщення ноги гексаподу у фазі замаху [36]

З цього виходить, що нога робота спочатку переміщується сама в задану нами точку в основному завдяки Суглобу 1 і після того, як знову починає контактувати з землею, основа ноги починає виступати як опора, а провертатися починає корпус. Таким чином здійснюється переміщення робота.

Сам рух ноги можна розділити на певний набір положень. Таким чином можна виділити 7 положень за одну фазу руху. Візуалізація цих положень представлена на рис. 2.11

Завдяки виділенню цих положень ми можемо проводити моделювання цих семи положень гексаподу і отримати дані, наближенні до імітації руху гексаподу. Надалі модель розробляється з розрахунком моделювання цих 7-ми положень як однієї фази руху для однієї ноги.

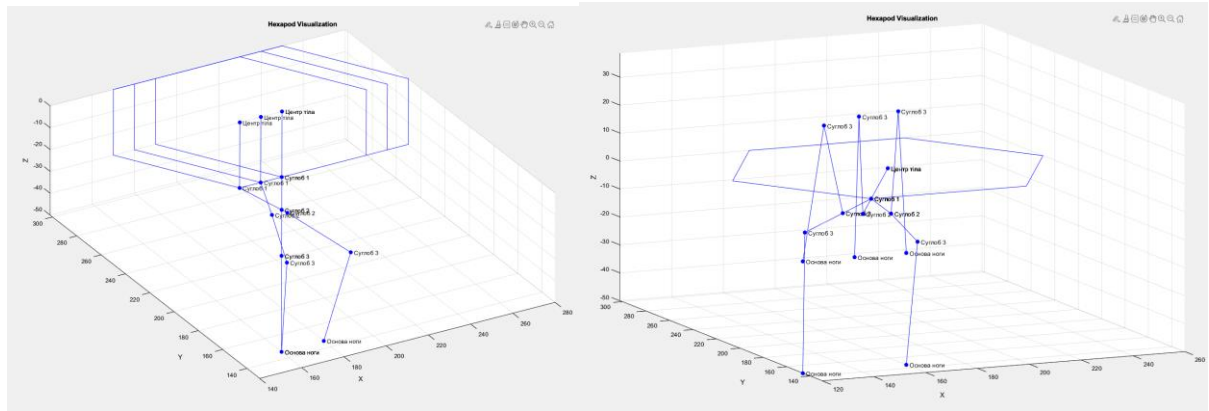


Рисунок 2.11. Візуалізація положень ноги гексаподу: а) положення ноги у фазі опори при виконанні руху б) положення ноги у фазі замаху при виконанні руху

У природі спостерігаються три найпоширеніші типи ходи: "тринога", "хвиляста" і "пульсуюча". Хвиляста хода, хоча і є найповільнішою з точки зору швидкості пересування, є найбільш стабільною. У хвилястій ході тільки одна нога одночасно перебуває у фазі маху, тоді як інші п'ять ніг - у фазі опори. Пульсуюча хода, повільніша за ходу на триногах, але швидша за хвилясту, передбачає одночасне перебування двох ніг з протилежних сторін у фазі маху зі зміщенням на 180 градусів. На рис. 2.12 зображено ці дві ходи, де суцільними лініями показано фазу замаху, а пунктирними - фазу стійкості.

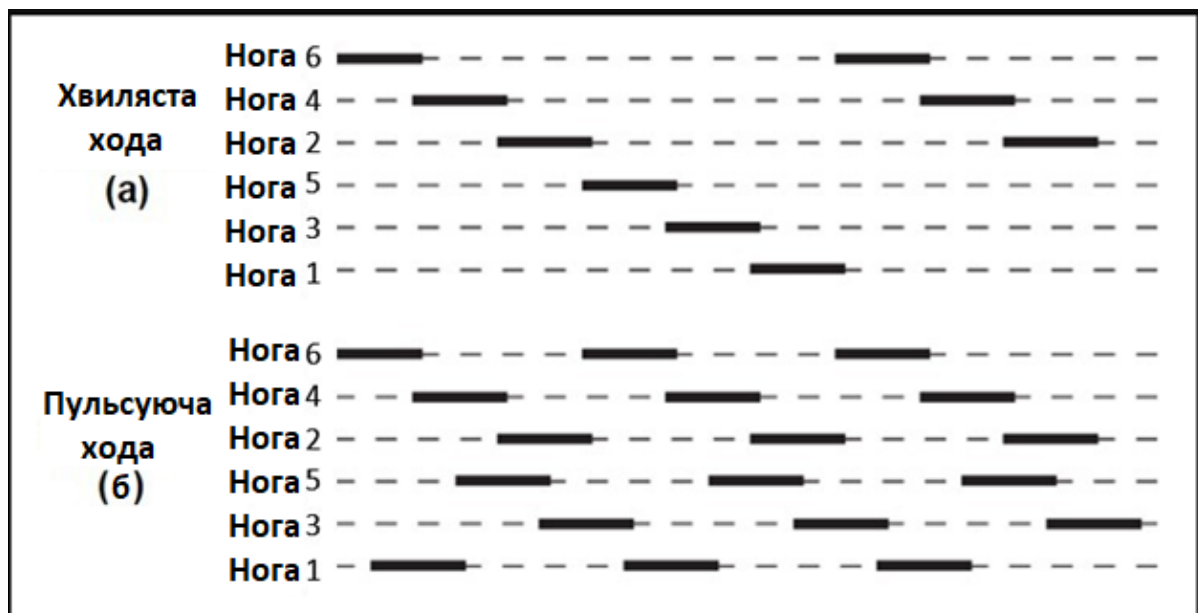


Рисунок 2.12. Послідовність фаз замаху і стійкості при ходьбі для: а) хвилястої ходи; б) пульсуючої ходи [37]

У цій роботі розглядається хода "тринога". На рис. 2.13 зображено фази стійкості та фази замаху при даному типі ходи.

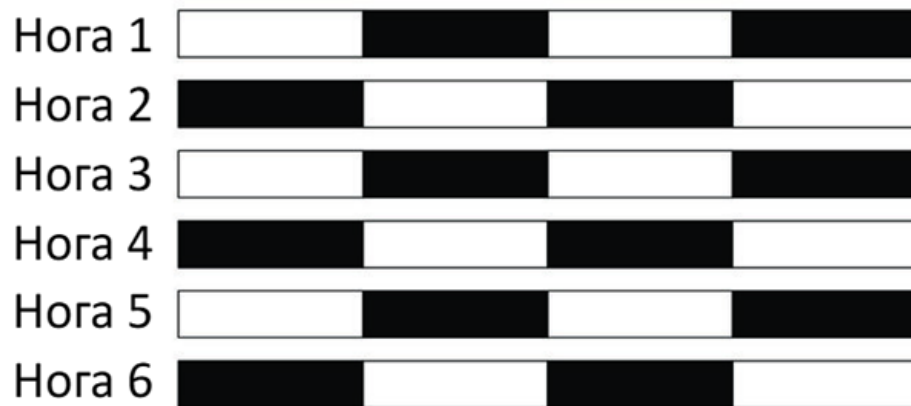


Рисунок 2.13. Послідовність фаз замаху і стійкості при ходьбі для триногої ходи

Для наглядної демонстрації принципу роботи даної ходи розглянемо приклад з комахою. У 6-ногих комах 3 ноги постійно стоять на землі, тоді як інші 3 ноги підняті в махових рухах [38].

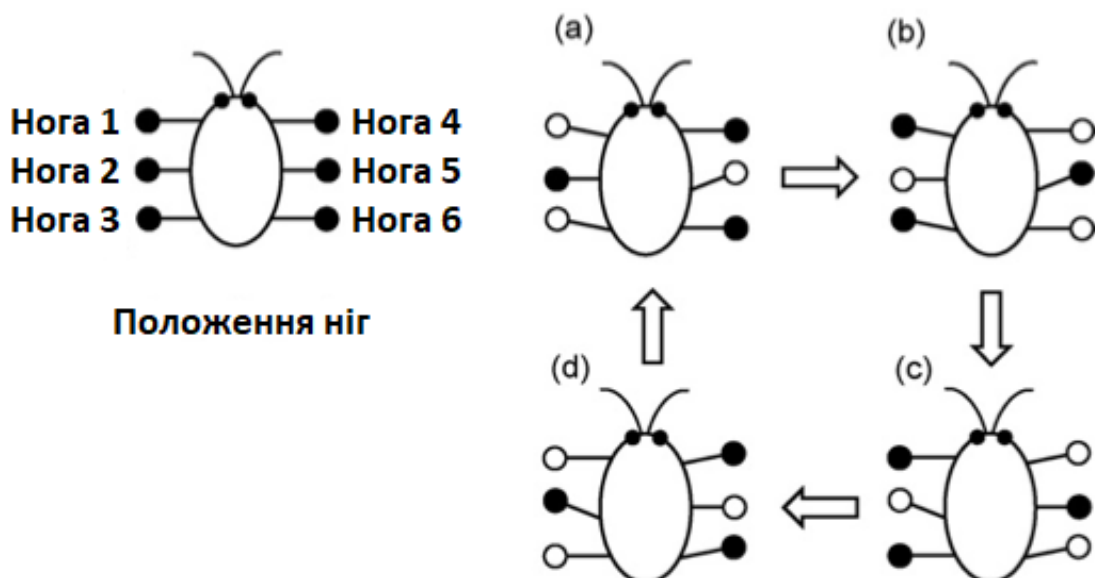


Рисунок 2.14. Характер ходи триноги комахи [38]

Тринога хода позиціонує тварину таким чином, що передня і задня ноги з

одного боку комахи рухаються/махають разом і працюють синхронно з однією середньою ногою з іншого боку. Крім того, що комахи мають принаймні 3 ноги, які рухаються у будь-який проміжок часу, рівень їхньої стійкості ще більше підвищується завдяки клейким структурам на кінцях придатків, що дозволяє їм ходити по вертикальних або горизонтальних структурах. Схематично це представлено на рис. 2.14.

Стійкість крокуючих роботів поділяється на дві категорії: статична стійкість і динамічна стійкість. Щоб вважатися статично стійким, робот повинен бути стійким протягом усього циклу ходи, без необхідності застосування будь-якої сили для балансування. Поки робот статично стійкий, вертикальна проекція його центру мас (ЦМ) знаходиться в межах опорного багатокутника, який утворюється між ногами, що знаходяться у фазі стояння. У випадку, коли ЦМ знаходиться на межі або за межами опорного багатокутника, робот падає, якщо він не є динамічно стійким, тобто робот збалансований під час ходьби за рахунок інерції, викликаной рухом, і статично нестійкий, коли він припиняє рух. На рис. 2.15 показано опорний полігон моделі гексаподу під час ходи на тринозі, де червоне коло позначає вертикальну проекцію його загального ЦМ [33].

З цього ми можемо винести, що при проектуванні послідовність фаз замаху і стійкості при ходьбі для гексаподу з усіма робочими ногами та з однією зламаною ногою нам необхідно намагатися тримати центр мас гексапода всередині опорного трикутника.

Для варіанту гексаподу з усіма працюючими ногами буде використана послідовність фаз з рис. 2.13.

У даному дослідженні ми аналізуємо також втрату однієї ноги гексаподу. Шестиногий робот-гексапод є ізотропним у напрямку кожної ноги; для уникнення повторного планування, ми припускали, що нога вийшла з ладу і не може функціонувати. Таким чином, робот піднімав її як вантаж безперервно.

Для вирішення даної проблеми запропонуємо відмовостійку триногу ходу із циклом, в якому як мінімум три ноги підтримують тіло, а дві знаходяться у стані маху. У розробленій ході кожна нога проходить дві стадії опори і одну стадію

замаху за цикл переміщення.

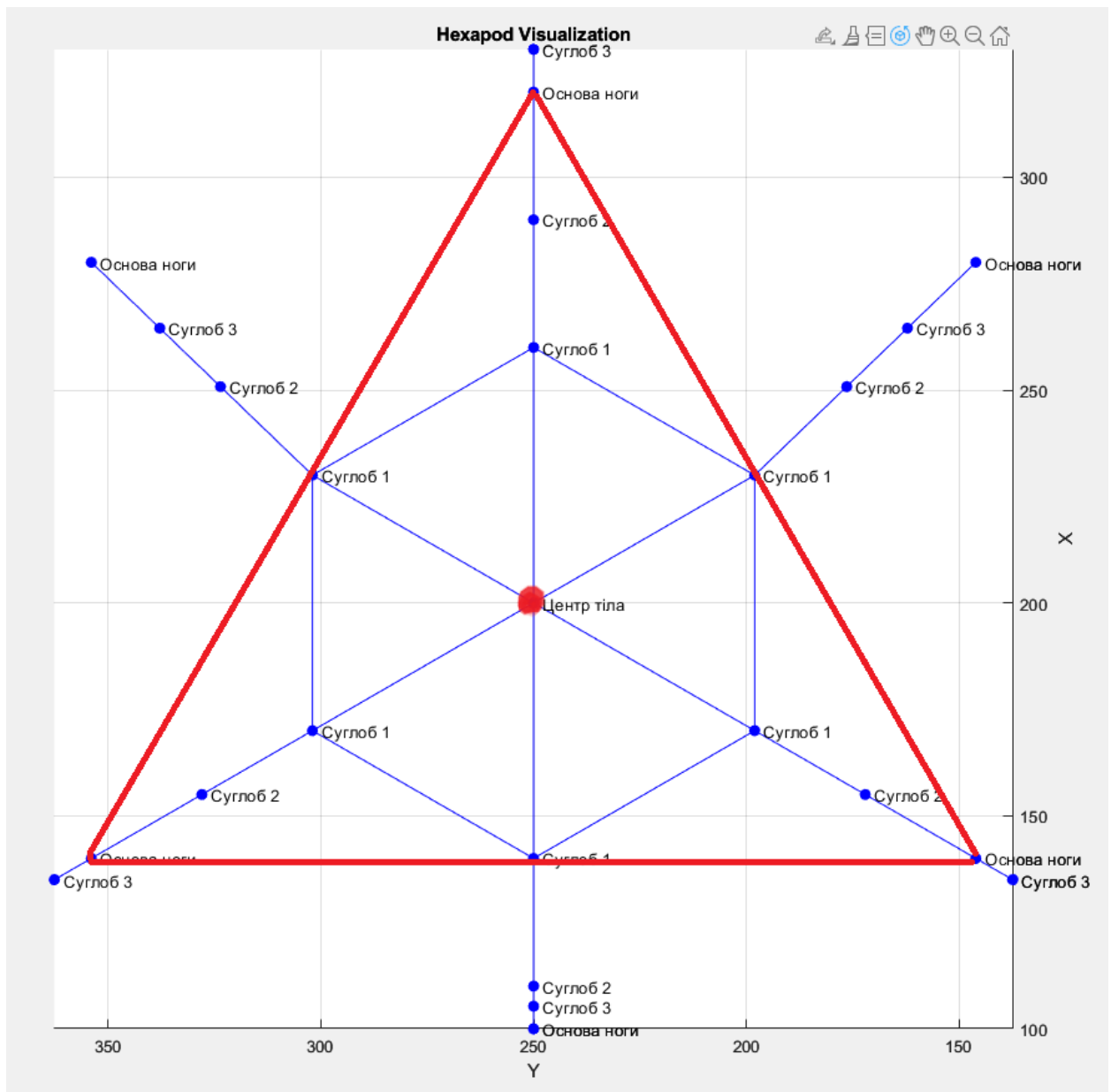


Рисунок 2.15. Вид зверху опорного трикутника гексапода

Для гексапода з однією пошкодженою ногою, наприклад ногою 1, необхідно визначити послідовність фаз, яка буде забезпечувати перебування центра мас гексапода всередині опорного трикутника. На діаграмі послідовностей відмовостійкої ходи на рис. 2.16, чорними лініями відображаємо фазу опори відповідної ноги 1 в циклі ходи, а білі проміжки представляють фазу маху. Очевидно, що тривалість двох фаз опори ноги відрізнялася.

	Цикл переміщення			Цикл переміщення		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Нога 1						
Нога 2						
Нога 3						
Нога 4						
Нога 5						
Нога 6						

Рисунок 2.16. Послідовність фаз ніг для руху гексапода з пошкодженою ногою 1

Таким чином ми можемо використати послідовність фаз, представлену на рис. 2.16, як основу для проектування послідовності фаз руху гексапода з однією зламаною ногою. При цьому розглядаємо те, що переміщення гексаподу здійснюється в 3-ри фази – спочатку гексапод переміщує 2-і ноги, потім ще 2-і і потім підіймає ногу, яка залишилась, та переміщує корпус. Таким чином, в кожному положенні гексапод має 3 опори, які утворюють опорний трикутник для підтримання його рівноваги. Усі можливі комбінації опорних фігур, визначені послідовністю фаз на рис.2.16, представлені на рис. 2.17.

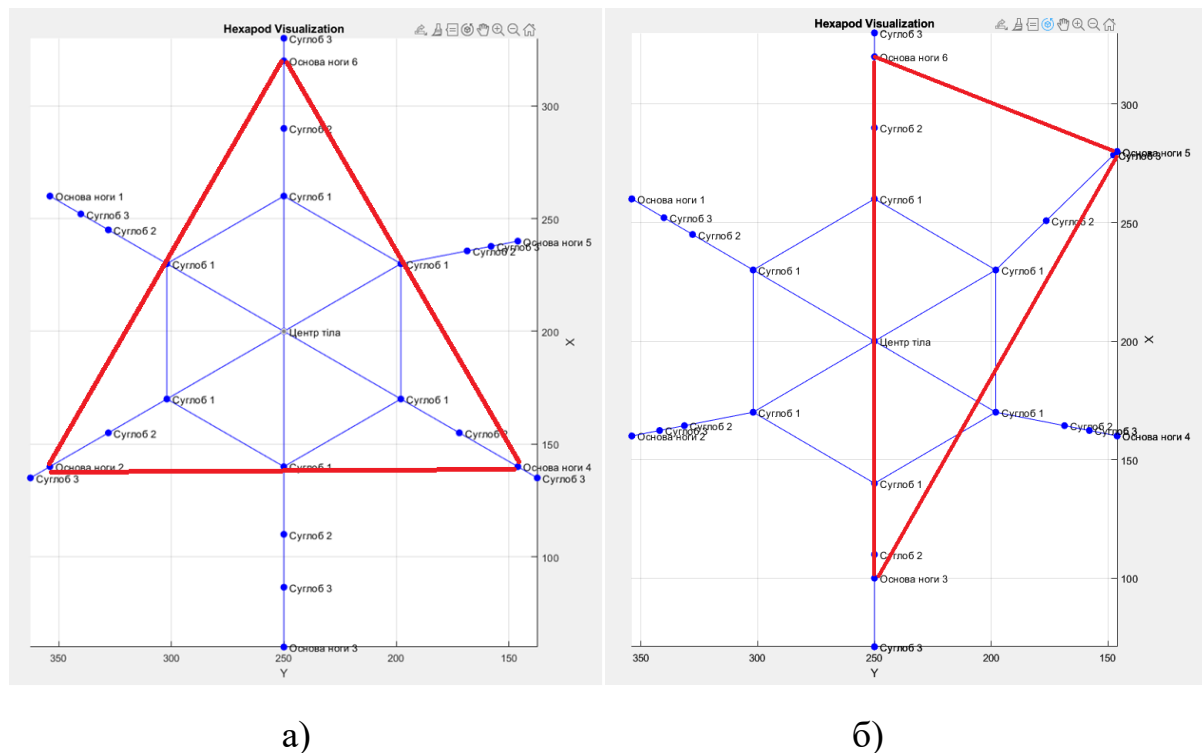


Рисунок 2.17. Опорні трикутники для першої (а) та другої (б) фаз в циклі руху

Як можна побачити з рис.2.16, фаза 3 для руху гексаподу зі зламаною ногою відрізняється тим, що має 4 точки опори, тому в даній фазі ми можемо спостерігати опорний чотирикутник, як і показано на рис. 2.18.

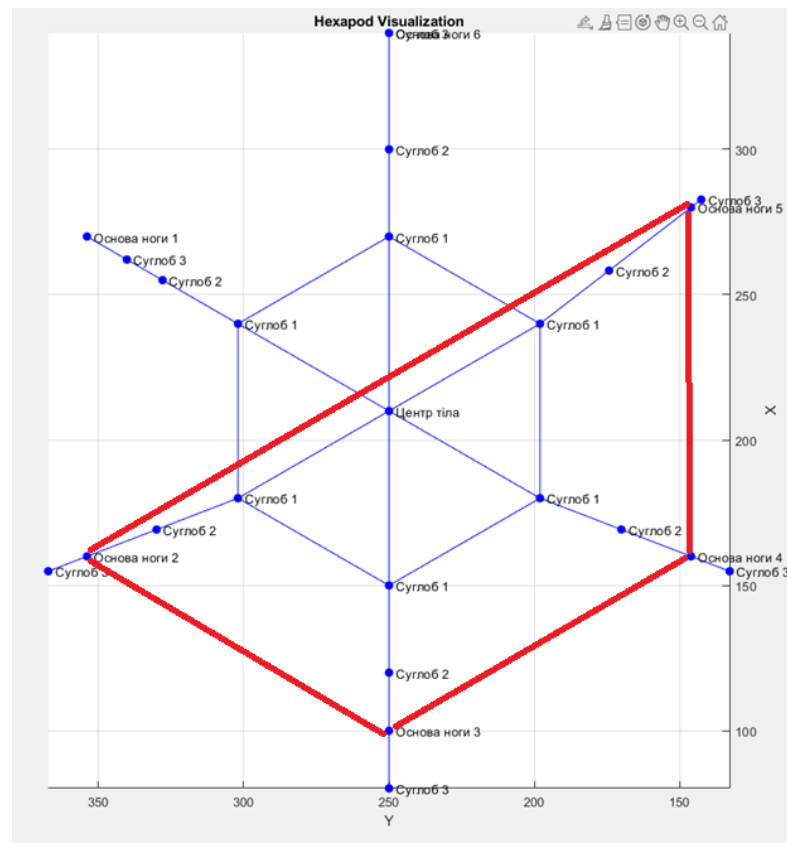


Рисунок 2.18. Опорний чотирикутник для третьої фази в циклі руху

Таким чином, спираючись на рис. 2.16 та рис. 2.17 можна розробити алгоритм переміщення для гексаподу з однією зламаною ногою.

2.6 Алгоритм моделювання в середовищі MATLAB

Отримані рівняння прямої кінематики (2.1), (2.4), (2.6), (2.8) та зворотної кінематики (2.11)-(2.16), а також розглянуті послідовності фаз для ніг гексаподу для випадку усіх функціонуючих ніг та для випадку пошкодження однієї ноги дозволяють нам розробити програму для моделювання простого руху гексаподу. Моделювання проходить в програмному середовищі MATLAB, тут викладена

схема алгоритмізації створеної моделі у вигляді блок-схем. Для початку розглянемо загальний алгоритм роботи моделі, який представлений на рис.2.19.

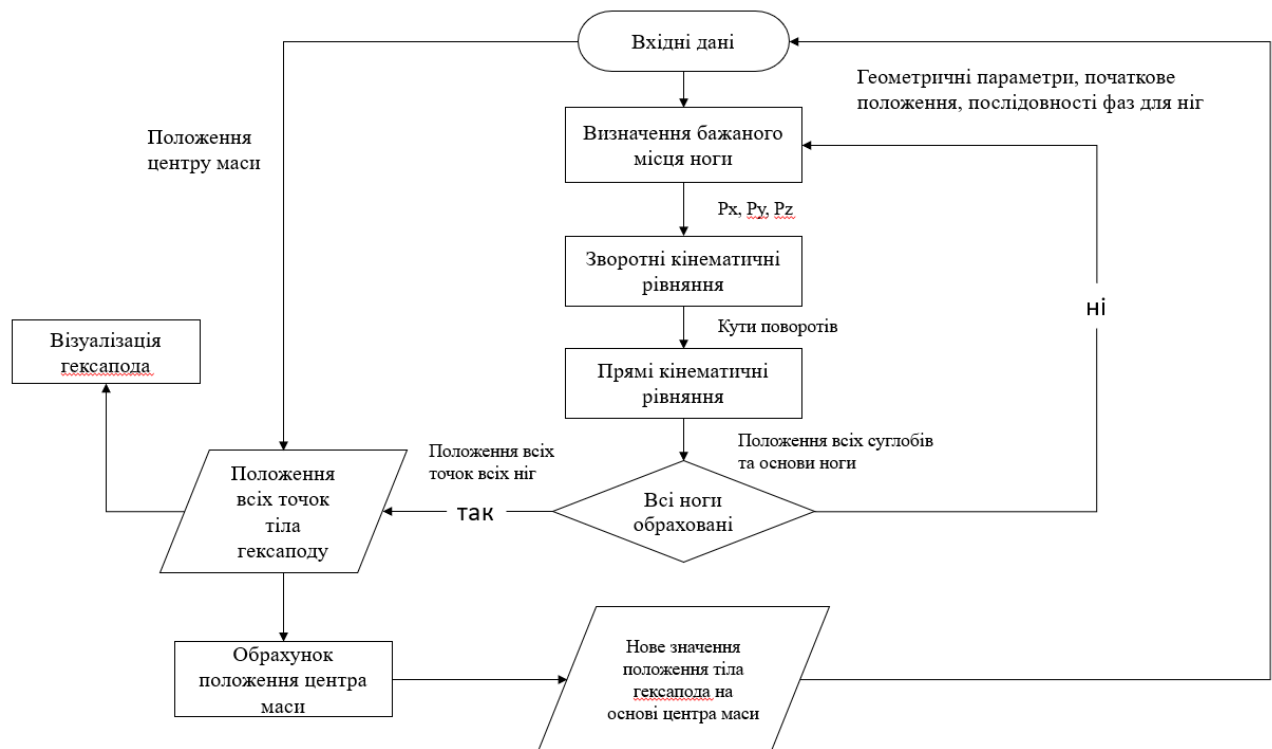


Рисунок 2.19. Блок-схема алгоритму роботи моделі гексаподу

Представлена на рис. 2.19 блок-схема відображає роботу створеної в середовищі MATLAB програми для моделювання гексаподу. За одне повне проходження блок-схеми отримуємо повне положення гексаподу, обраховуємо нове положення центру мас в даному положенні та передаємо це нове положення на початок моделі.

Програма складається з декількох функцій або блоків, які представляють собою фрагменти процесу моделювання гексаподу, для скорочення об'єму основної програми керування та кращого розуміння логіки роботи при створенні коду. Далі поданий опис основних складових побудованої моделі гексаподу.

Блок вхідних даних містить в собі всі дані, які відомі про модель гексаподу від початку моделювання. До них входять усі геометричні розміри гексаподу, початкове положення центру мас тіла, бажане переміщення центру мас за один

цикл руху гексаподу та визначені послідовності фаз замаху та стійкості для усіх ніг гексаподу. Всі ці дані задані від початку, на їх основі проводяться розрахунки для руху гексаподу. Після закінчення циклу руху положення тіла оновлюється для відображення руху гексаподу.

Блок визначення бажаного положення ноги отримує вхідні дані і на основі бажаного значення переміщення центра мас тіла обраховує бажане положення ноги гексаподу для здійснення цього переміщення за один цикл. Також враховується послідовність ніг в фазах руху таким чином, щоб бажане положення ноги, яка не повинна рухатись, не обраховувалось, так само як ноги, яка повинна переміститись для досягнення наступного положення гексаподу. Схема роботи блоку представлена на рис. 2.20.

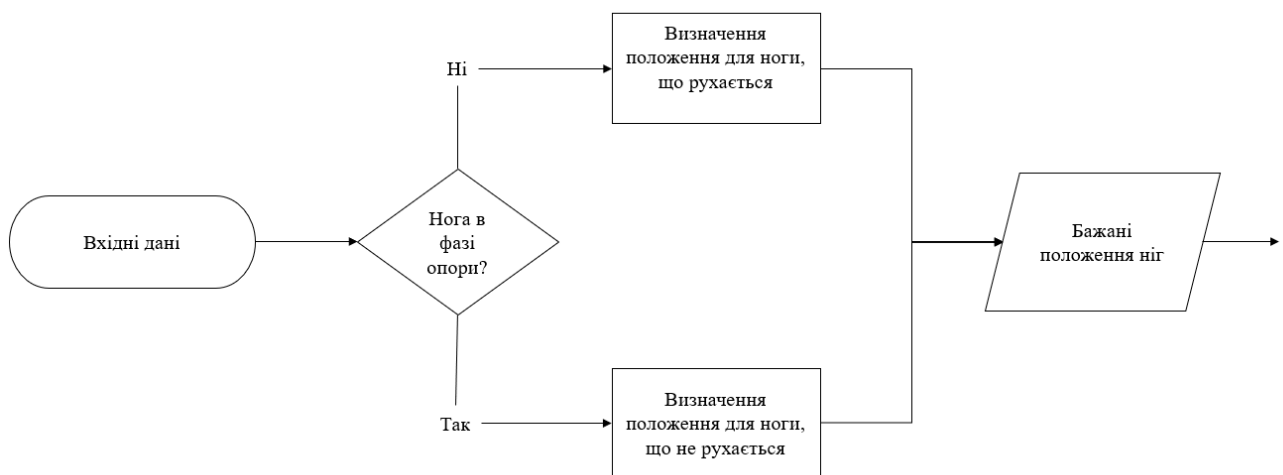


Рисунок 100. Схема роботи блоку визначення бажаного положення ніг

На виході блоку (рис. 2.20) отримуємо координати положення, в яке потрібно перемістити основу ноги.

Бажане положення ноги надходить далі до блоку зворотних кінематичних рівнянь разом з вхідними даними про геометрію та початкове положення гексаподу. За допомогою рівнянь (2.9 – 2.16), які і складають даний блок, ми отримуємо на виході значення кутів α, β, γ . Схематично це зображено на рис. 2.21.

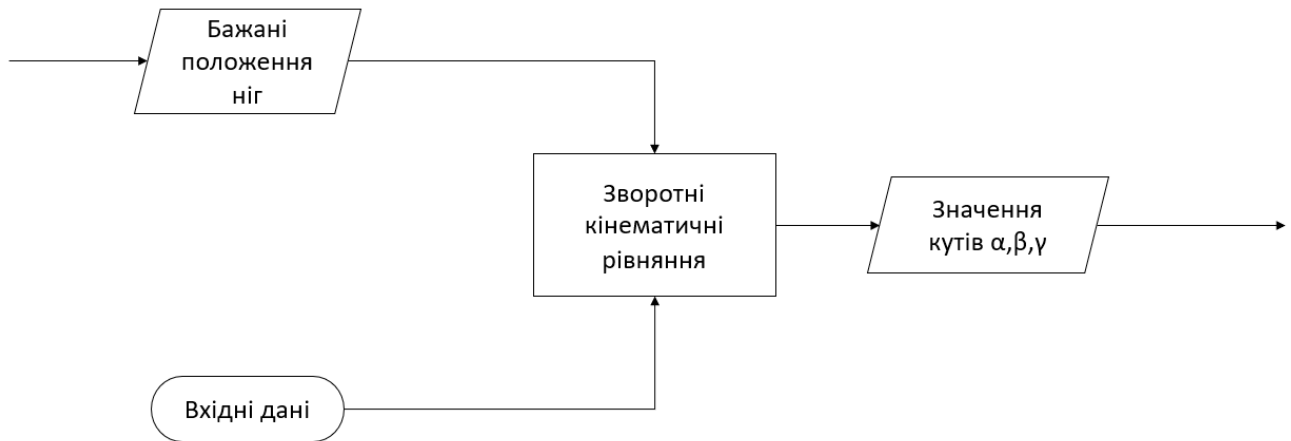


Рисунок 2.21. Схема роботи блоку зворотних кінематичних рівнянь

Значення кутів, як і вхідні дані, передаються до блоку прямих кінематичних рівнянь, які визначають положення кожного суглобу та кінця ноги, видаючи на виході повну інформацію про положення суглобів ноги та основи ноги у просторі. Схематично це зображено на рис. 2.22.

Все вищезазначене повторюється 6 разів для отримання інформації по кожній ніжці гексапода, після чого повний масив даних передається до блоку візуалізації гексапода. За допомогою вбудованої в середовище MATLAB функції plot програма візуалізує гексапод у каркасному вигляді, з'єднуючи вузли тіла гексапода. Приклад такої візуалізації був представлений на рис. 2.1.

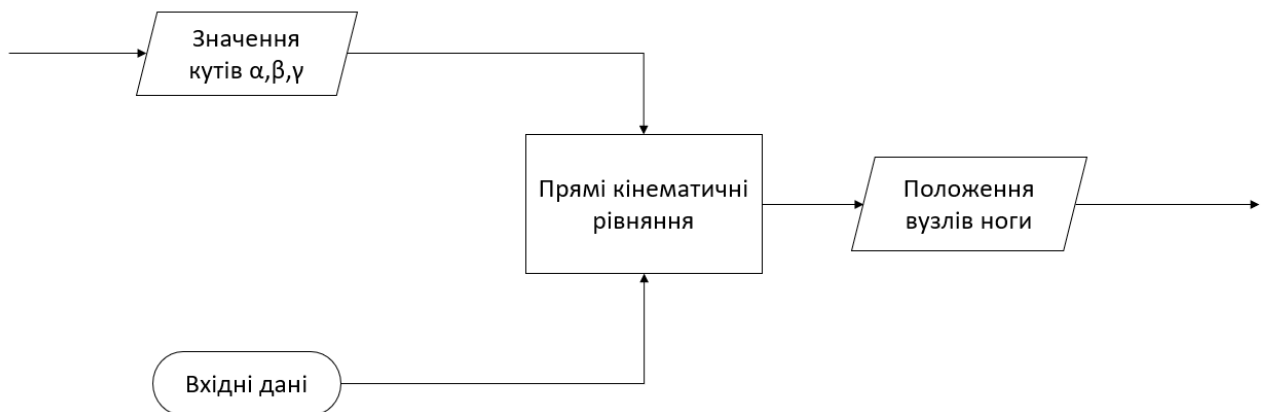


Рисунок 2.22. Схема роботи блоку прямих кінематичних рівнянь

Паралельно до візуалізації дані про положення всіх вузлів гексаподу передаються до блоку, який вираховує спочатку центри мас окремих кінцівок гексаподу, а потім вже усього гексаподу одразу, отримуючи таким чином поточне положення центру мас гексаподу у просторі. Це положення передається на вхідні дані, де воно стає новим початковим положенням, таким чином завершуючи цикл руху. Схематично це зображено на рис. 2.23.



Рисунок 2.23 Схеми роботи блоків обчислення положення центру мас та візуалізації гексаподу

Кожне положення центру мас записується у вектор значень, який потім використовується для побудови графіку переміщення гексаподу, який і отримується з даної моделі.

Висновки до розділу 2:

1. Було обрано та обґрунтовано тип та конструкцію крокуючого робота - гексаподу. Розглянуто будову ноги гексаподу, на основі якої розроблена кінематична схема ноги робота. На основі побудованої кінематичної схеми отримані прямі кінематичні рівняння, а також були складені обернені кінематичні рівняння. Отримані рівняння являють собою математичну модель, яка дозволяє за бажаним положенням ноги гексаподу визначити кути, на які необхідно повернути суглоби для

переміщення основи ноги в це бажане положення.

2. Розглянуто різні типи ходи для крокуючого робота та обрано ходу «тринога», як найбільш оптимальну для використання обраною конструкцією робота. Обрано та обгрунтовано послідовність фаз руху для ніг при такому варіанті ходи.
3. Розглянуто випадок пошкодження ноги гексаподу та послідовність фаз руху ніг для продовження руху гексаподу з однією пошкодженою ногою.
4. В результаті роботи, яка була проведена, на основі отриманих результатів побудовано модель переміщення гексаподу в програмному середовищі MATLAB. На основі отриманих систем рівнянь були розроблені функції для моделювання гексаподу. Принцип роботи моделі представлений у вигляді блок-схеми, яка ілюструє роботу створеної моделі.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

3.1 Методика комп'ютерного моделювання

На підставі отриманої у другому розділі програмної моделі проведено дослідження руху гексапода з постійною швидкістю паралельно вісі ОХ. Гексапод зорієнтовано у просторі так, щоб вершина його шестикутного тіла співпадала з прямою, проведеною через геометричний центр тіла гексапода паралельно до вісі ОХ. У зв'язку із таким розташуванням, Суглоб 1 у нозі 3 та 6 практично не бере участі в переміщенні, оскільки ланка 1 для цих ніг повинна постійно знаходитись паралельно до вісі ОХ. На рис. 3.1 представлено порядок розташування ніжок гексаподу в площині ОХУ.

Для дослідження обрано швидкість 20 умовних одиниць за один цикл руху, що означає, що центр маси гексапода повинен зміститись на 20 одиниць вздовж вісі ОХ за повний цикл руху. Моделюється переміщення гексаподу протягом 10 повних циклів руху.

У даному дослідженні не розглядається конкретна швидкість руху гексапода, розглядається лише його здатність рухатись по заданому простому маршруту. Геометричні параметри тіла гексапода, необхідні для моделювання руху, та початкове положення центру мас гексапода в глобальній системі координат задаються відомими значеннями і залишаються незмінними для всіх випадків моделювання, щоб забезпечити можливість порівняння результатів.

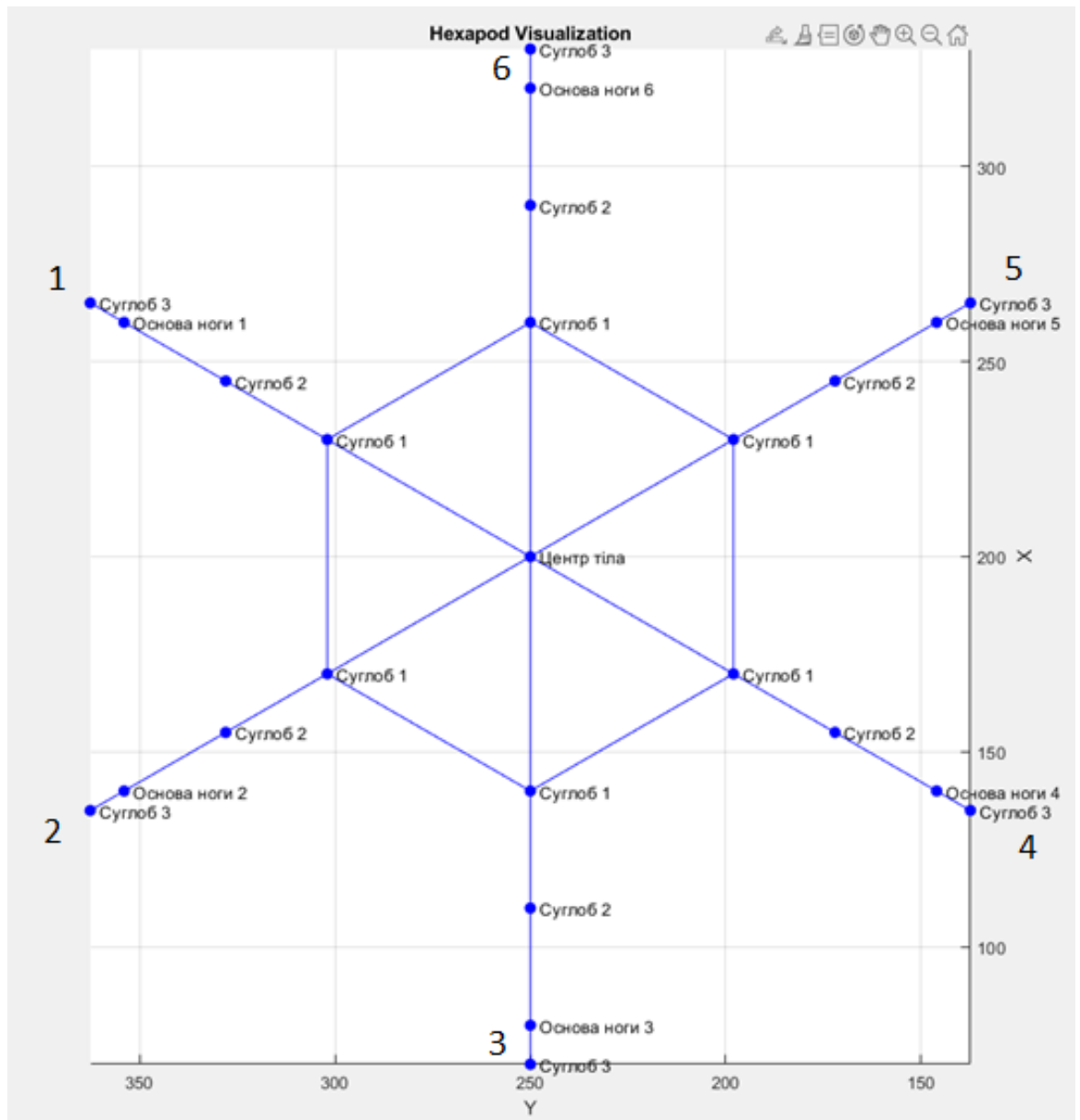


Рисунок 3.1 Вид гексаподу в площині ОХУ

Площину, паралельну ОХУ та опущену на 50 одиниць по вісі ОZ, вважаємо поверхнею, по якій крокує гексапод. У стані спокою ноги гексапода напрямлені колінеарно з відрізком, що сполучає центр тіла гексапода та вершину, на якій закріплена відповідна нога. У всіх досліджуваних випадках гексапод переміщує свій центр маси зі швидкістю 20 умовних одиниць за цикл руху паралельно вісі ОХ. Послідовності фаз для циклу руху будуть прописані окремо для кожного випадку. У всіх випадках досліджено переміщення центру маси гексапода на відстань в 200 умовних одиниць паралельно вісі ОХ.

Дані про переміщення робота збираються шляхом обчислення положення

центру маси тіла гексапода в кожному його положенні. Таким чином, можна отримати траєкторію руху гексапода при заданому русі. Введені вхідні дані однакові для всіх досліджуваних випадків: тіло гексапода є правильним шестикутником, вписаним в коло радіусом 60 умовних одиниць, з центром в точці $O(200;250;0)$ в глобальній системі координат G . Кожна нога гексапода однакова за будовою, із довжинами l_1 , l_2 та l_3 , які становлять відповідно 30, 40 та 50 умовних одиниць, розташована на вершинах шестикутника, що складає тіло гексапода.

Під час проведення дослідження передбачається аналіз початкового стану, коли всі ноги гексапода функціонують без пошкоджень, з метою отримання інформації щодо роботи крокуючого механізму в ідеальних умовах. Після цього розглядаються три сценарії пошкодження ніг, кожний з яких враховує розташування пошкодженої ноги в різних точках тіла робота відносно напрямку руху. При моделюванні пошкодження ніжок задаємо на рівні Суглобу 1, в той час, як Суглоб 2 та Суглоб 3 забезпечують одноразові підйом і підгинання кожної з пошкоджених ніжок, положення яких надалі не змінюється протягом всього моделювання руху.

Перший етап включає аналіз пошкодження першої ноги гексапода. Наступним етапом є дослідження пошкодження ноги 5, розташованої дзеркально відносно осі симетрії тіла гексаподу, яка співпадає з напрямком руху гексаподу на площині OXZ , з метою порівняння з попереднім експериментом. У завершення проводиться аналіз випадку пошкодження задньої ноги (нога 3) з аналогічним підходом до попередніх дослідів.

3.2 Моделювання та аналіз отриманих результатів

3.2.1 Моделювання руху гексаподу без пошкоджень ніжок

У даному підрозділі аналізуються результати моделювання руху гексапода з усіма функціонуючими ногами. Положення гексапода зображено на рис. 3.1. Протягом 10 циклів руху передбачено, що гексапод здійснить переміщення свого центру маси на 200 умовних одиниць вздовж осі абсцис (OX), утримуючи при

цьому своє положення по осі ОУ стабільним в порівнянні з початковим положенням. Слід зазначити, що для керування рухом використовується послідовність фаз руху, яка подана на рис. 2.13.

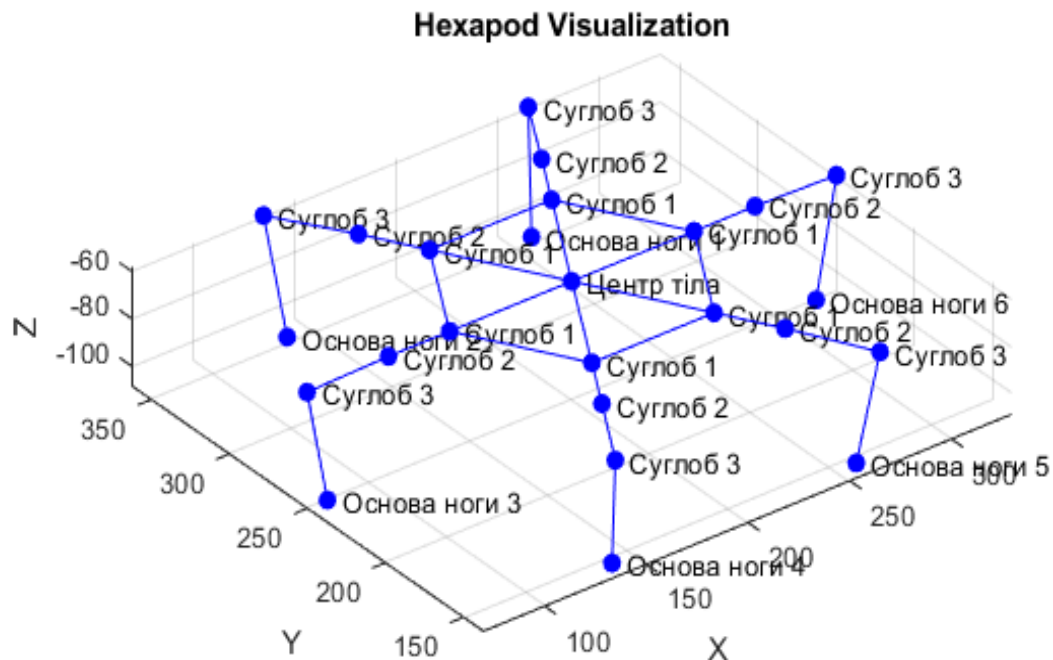


Рисунок 3.2. Початкове положення гексаподу без пошкоджень

На рис. 3.3 наведено графік, який ілюструє переміщення центру маси гексапода на площині ОХУ під час виконання заданого руху. Зауважимо, що гексапод ідеально пройшов задану відстань, що відповідає очікуваному результату. У цьому випадку гексапод є повністю стабільним під час руху, і відсутні будь-які фактори, які могли б зміщати його центр маси від геометричного центру тіла гексапода.

Під час руху гексапода за заданим сценарієм він піднімає ноги так, що під час кожного кроку ноги, які задіяні у фазі замаху, взаємодіють одна з однією таким чином, щоб вони врівноважували одне одного, не спричиняючи помітних зміщень у положенні центру маси гексапода. Результат підтверджує, що гексапод під час

руху не відхиляється від заданої траєкторії.

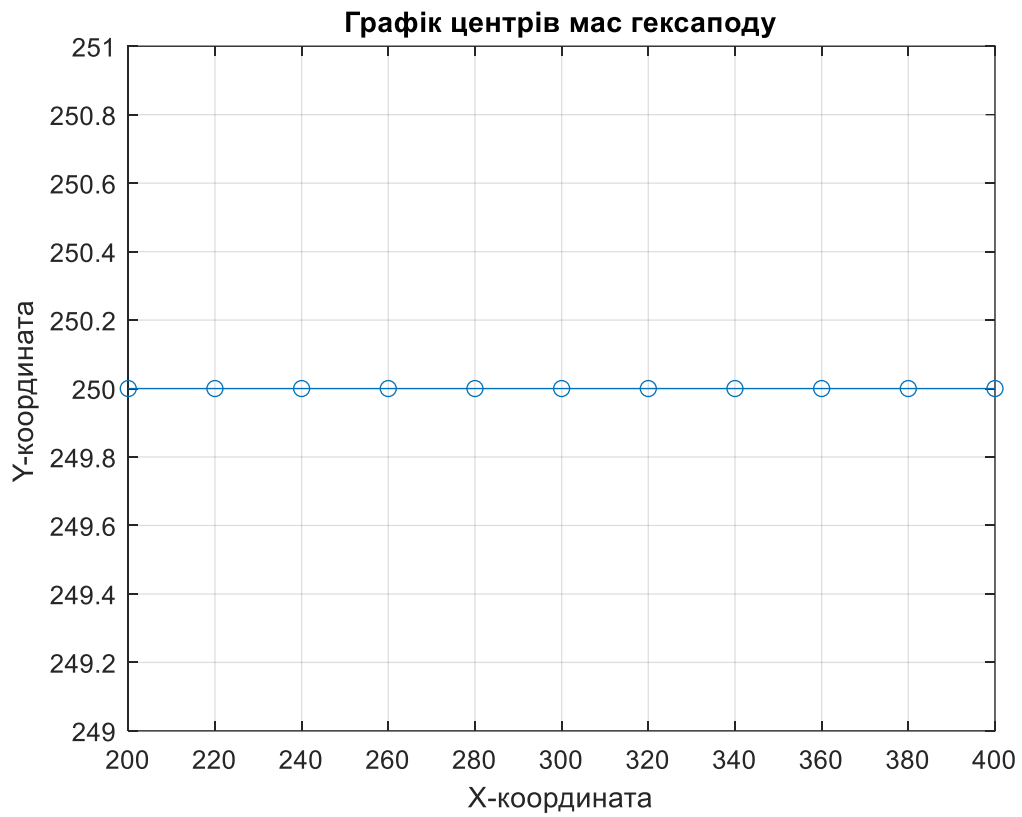


Рисунок 3.3. Графік переміщення центра мас гексаподу при усіх функціонуючих ногах

3.2.2 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 1

Розглянемо випадок, коли нога 1 виходить з ладу (не функціонує у відповідності до заданого алгоритму руху суглобів). В такому випадку вона перетворюється на вантаж, який гексапод повинен носити із собою. При моделюванні ми приймаємо, що гексапод підігнув пошкоджену ногу, як показано на рис. 3.4, і вимушений пересуватись без її застосування, що повинно забезпечуватись відповідним алгоритмом керування. В якості циклу переміщень візьмемо послідовність фаз руху, яка була представлена на рис. 2.16.

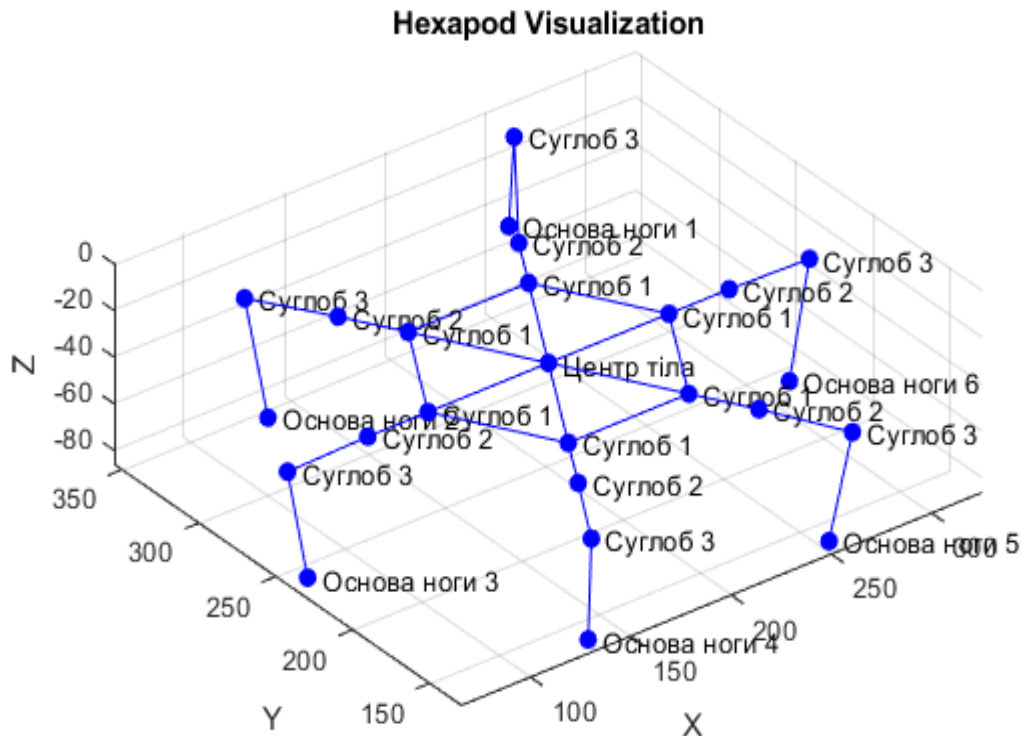


Рисунок 3.4. Початкове положення гексаподу з пошкодженою ногою 1

Результати моделювання руху гексаподу з пошкодженою ногою 1 наведено на рис. 3.4 у вигляді траєкторії переміщення центра мас гексаподу на площині ОХУ. Як можна побачити на рис. 3.4, при переміщенні гексаподу таким способом, виникає відхилення від бажаної траєкторії і гексапод починає зміщуватись у бік, протилежний до місця розташування пошкодженої ноги 1. Це стається через те, що підігнута нога і нерівномірне використання ніг в циклі переміщення призводять до постійного зміщення центру маси гексаподу. Як результат, робот при русі відхиляється від заданої траєкторії приблизно на 9 одиниць по осі ОУ при запланованому переміщенні по осі ОХ на 200 одиниць. При цьому, як видно з графіку на рис. 3.5, він не доходить до вказаного положення по осі ОХ.

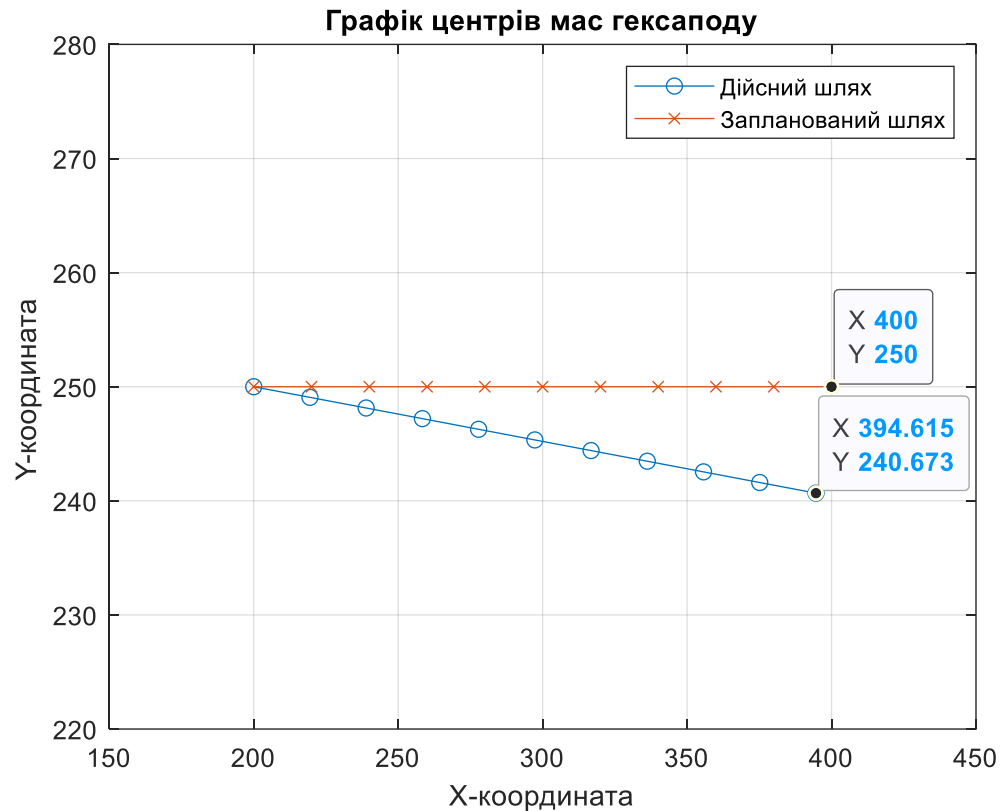


Рисунок 3.5. Графік переміщення центра мас гексаподу при пошкодженій нозі 1

З рис. 3.5 обчислимо пройдений центром мас шлях та оцінимо, наскільки він відрізняється від запланованого:

$$l_o = \sqrt{(394.625 - 200)^2 + (240.673 - 250)^2} = 194,85 \quad (3.1)$$

де l_o – це дистанція в умовних одиницях, яку пройшов гексапод.

Як можна побачити, реальний шлях, який пройшов гексапод, відрізняється по довжині від запланованого на 5,15 умовних одиниць.

3.2.3 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 5

Далі розглянемо випадок, коли пошкодження отримує нога 5. Як і в попередньому випадку, нога 5 гексапода виходить з ладу та перетворюється на додатковий вантаж, залишаючись протягом всього руху у піднятому та підігнутому положенні. Аналогічно до розглянутого вище, на рис. 3.6 показано початкове положення гексаподу з підігнутою ногою 5.

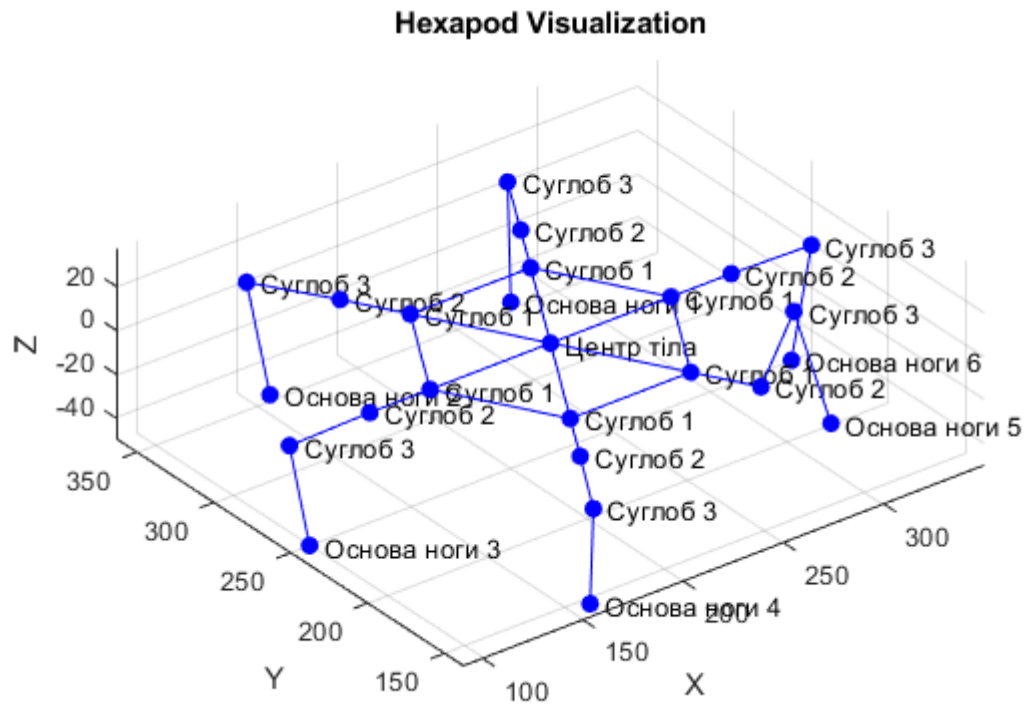


Рисунок 3.6. Початкове положення гексаподу з пошкодженою ногою 5

В якості циклу переміщень було розроблено окрему послідовність фаз опори та замаху для ніг, яку наведено на рис. 3.7. Вона є аналогічною до послідовності на рис. 2.16 і фактично лише зміщена таким чином, щоб перемістити зламану ногу в положення ноги 5. В кожній фазі при циклі руху центр мас повинен знаходитись всередині опорної фігури, що задовольняє потреби в стійкості.

	Цикл переміщення			Цикл переміщення		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Нога 1						
Нога 2						
Нога 3						
Нога 4						
Нога 5						
Нога 6						

Рисунок 3.7. Послідовність фаз опори та замаху для гексаподу з пошкодженою ногою 5

отриманого на рис. 3.5. Оцінімо, яку дистанцію пройшов гексапод:

$$l_o = \sqrt{(394.625 - 200)^2 + (259.327 - 250)^2} = 194,85 \quad (3.2)$$

де l_d – це дистанція в умовних одиницях, яку пройшов гексапод.

Таким чином, при пошкодженні однієї з двох розглянутих ніг гексапода, які розташовані симетрично відносно повздовжньої осі об'єкта і під час його переміщення знаходяться в одній фазі руху, результати моделювання співпадають. Переміщення (3.2) за значенням співпадає з переміщенням (3.1), що підтверджує однаковий за силою вплив даних пошкоджень на рух гексаподу.

3.2.4 Моделювання руху гексаподу з пошкодженням ноги 3

Останнім розглядається випадок, коли пошкодженою є нога 3, яка знаходиться позаду гексаподу. Так як для обраного типу руху гексаподу Суглоб 1 ноги 3 не повинен забезпечувати поворот ноги навколо вертикальної осі на кут α , то для ноги 3 припускаємо пошкодження на рівні Суглобу 2 чи Суглобу 3, в результаті чого нога 3 гексапода перетворюється на додатковий вантаж, залишаючись протягом всього руху у піднятому та підігнутому положенні, що повинно забезпечуватись відповідним алгоритмом керування. Проекція піднятої та підігнутої ноги 3 на площину, по якій відбувається рух гексаподу, залишається незмінною і паралельною осі ОХ. Аналогічно до попередніх випадків на рис. 3.9 показано початкове положення гексаподу з підігнутою ногою 3.

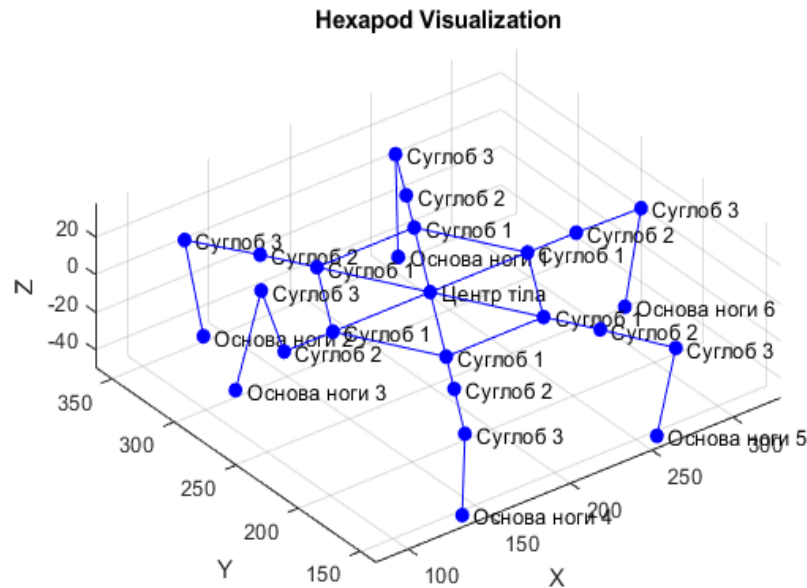


Рисунок 3.9 Початкове положення гексаподу з пошкодженою ногою 3

Послідовність фаз руху для цього випадку була розроблена аналогічно до послідовності на рис. 3.7 з розрахунком на те, що в кожній фазі циклу переміщення щонайменше три ноги завжди будуть в фазі опори. Послідовність представлена на рис. 3.10.

	Цикл переміщення			Цикл переміщення		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Нога 1						
Нога 2						
Нога 3						
Нога 4						
Нога 5						
Нога 6						

Рисунок 3.10 Послідовність фаз опори та замаху для гексаподу з пошкодженою ногою 3

Як можна бачити з результатів моделювання переміщення центру маси гексаподу, які представлені на рис. 3.11, пошкодження ноги 3 не забезпечує потрібного відштовхування і спричиняє зміщення лише по вісі ОХ, що проявляється на графіку як те, що центр мас гексаподу «поспішає» і проходить більшу відстань від заданої. При цьому додаткове переміщення становить 10,77 одиниць до бажаного переміщення у 200 одиниць за 10 циклів переміщення.

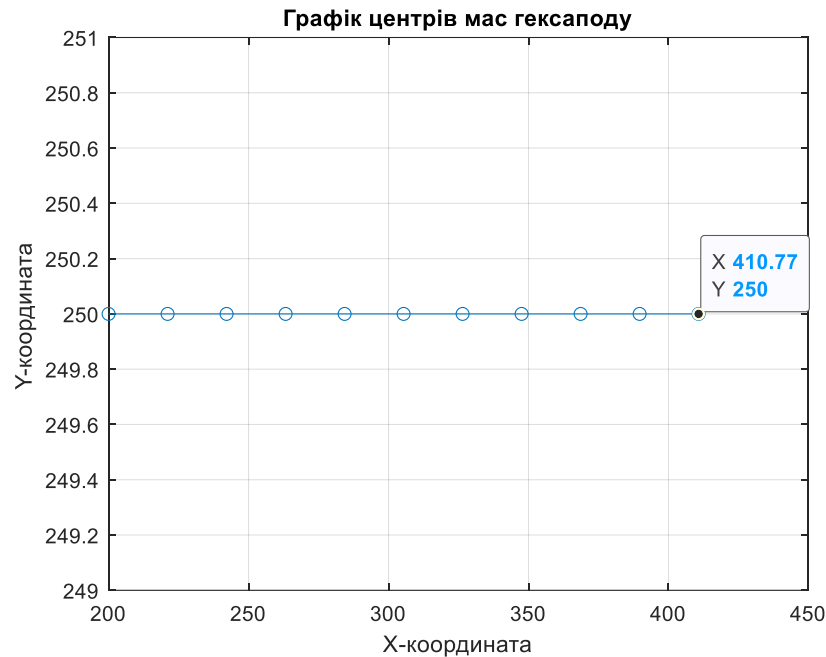


Рисунок 3.11. Графік переміщення центра мас гексаподу при пошкодженій нозі 3

Таким чином, моделювання гексаподу без пошкоджень дало результат відповідно до очікувань і демонструє повну відповідність переміщень гексапода до заданої траєкторії руху та значення пройденого шляху. Усі розглянуті сценарії пошкоджень та отримані з них результати свідчать про те, що при пошкодженні будь-якої ноги гексапода, навіть за умови його здатності продовжувати рух, виникає постійне відхилення від заданої траєкторії та/або довжини пройденого шляху. Це призводить до постійної похибки в переміщенні гексапода. Але відповідно до розроблених алгоритмів можливо досягти стабільного руху гексапода по заданій траєкторії.

Це ставить завдання не лише по створенню відповідних алгоритмів переміщення з урахуванням пошкоджень, а і необхідності створення функціоналу для діагностики поточного функціонального стану ніжок (суглобів) та функціоналу, який забезпечить вибір відповідного алгоритму керування за результатами встановленого діагнозу.

Робастні системи, які володіють здатністю працювати в умовах невизначеності, здатні забезпечити автоматичне перемикання між алгоритмами переміщення гексапода відповідно до поточного стану крокуючого робота.

Використання таких систем дозволить нам спроектувати систему керування гексаподом, яка буде відстежувати стан робота та автоматично перемикатися між алгоритмами керування для вибору того, який забезпечить рух за заданою траєкторією.

Додатково з метою вирішення проблеми відхилення можна вбудувати в створенні алгоритми механізм компенсації відхилення траєкторії гексапода для досягнення значно кращих результатів у виконанні запланованого маршруту роботом.

3.3 Структурно-функціональний синтез робастної системи керування рухом

Робастне керування представляє собою методологію проектування контролера, що систематично враховує невизначеність. Робастні методи керування спрямовані на забезпечення ефективної роботи системи за умови, що невизначені параметри чи збурення перебувають в межах конкретної (зазвичай компактної) множини. Основною метою робастних методів є досягнення надійної продуктивності та/або стабільності при наявності обмежень у точності моделювання [39].

В якості методу вирішення завдання по стабільному переміщенню гексаподу при наявності чи відсутності пошкоджень ніжок/суглобів було обрано створення робастної системи керування рухом. Були розроблені алгоритми стабільного руху крокуючого робота на випадок пошкодження кожної ноги та загальний алгоритм, який використовується, коли всі ноги працюють безвідмовно.

Розроблена система керування повинна приймати сигнали від датчиків тиску на кінцях ніжок та від сенсорів кутів повороту відповідних ланок ніг для отримання інформації про справність кожної ноги. У випадку, коли система фіксує відмови ноги, система повинна перемкнутися на інший алгоритм руху, забезпечивши таким чином продовження стабільного і керованого руху робота.

3.3.1 Загальна схема системи керування гексаподом

На рис. 3.12 представлена загальна схема системи, яка здійснює керування

гексаподом. Початкові умови, такі як геометричні розміри тіла робота, заздалегідь відомі та доступні для використання системою. Керуючий сигнал подається на вхід системи у вигляді запиту на зміщення центру маси тіла. Проходячи через блок «Бажане положення ніг» він перетворюється на масив положень для кожної ноги, який подається на обчислювальний блок, в якому використовуються обернені кінематичні рівняння відповідних ніг. Обернені кінематичні рівняння з бажаних/заданих позицій ніг вираховують необхідні кути поворотів суглобів і сигнали, пропорційні цим кутам, подаються на сервоприводи відповідних суглобів.

Для реалізації методу перемикавання різних алгоритмів руху відповідно до наявних пошкоджень необхідно до цього процесу додати процес діагностики кожної ноги на наявність пошкоджень.

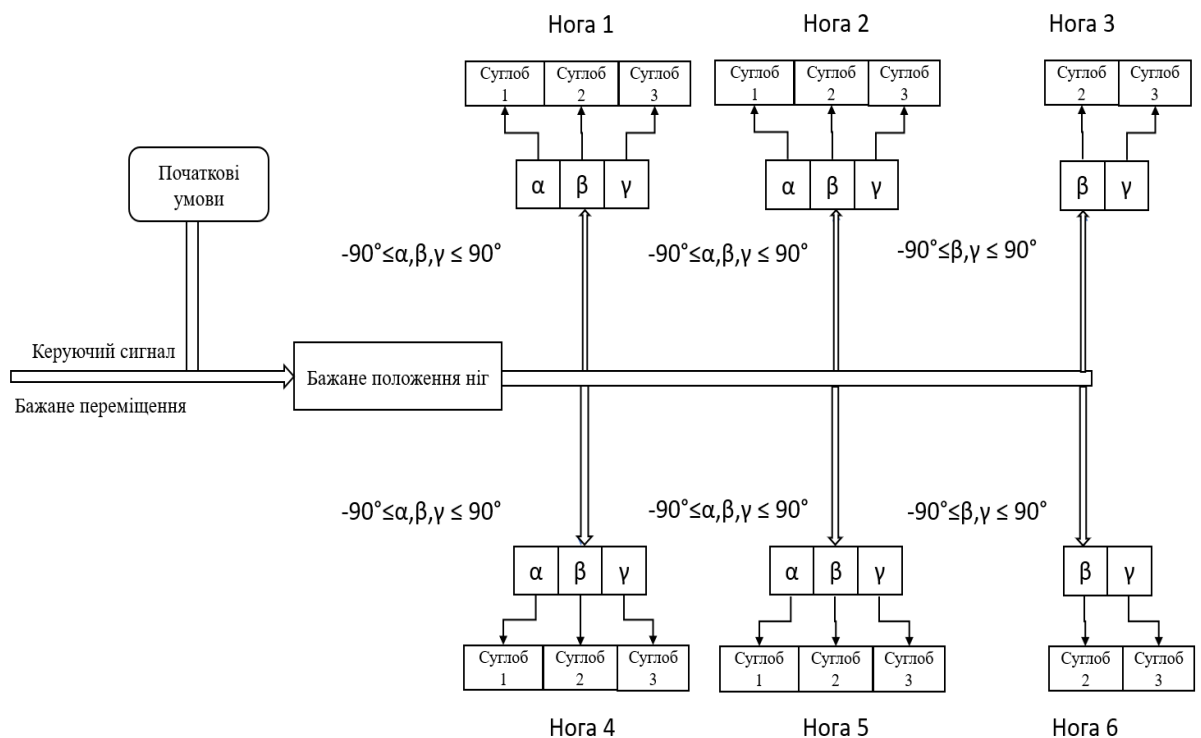


Рисунок 3.12. Загальна схема системи керування гексаподом

На рис. 3.13 представлена розроблена загальна функціональна модель керування рухом мобільного робота з наявною частиною, що відповідає за діагностику ніг. Як і в загальній схемі, сигнал про переміщення оброблюється та перетворюється на положення ніг для виконання руху, потім на кути для

сервоприводів суглобів ніг. А після сигналу про повертання сервоприводів на відповідні кути, блок керування гексаподу за допомогою сенсорів кутів повороту відповідних ланок ніг та датчиків тиску отримує інформацію про виконання сигналів на поворот сервоприводів і у разі їх невиконання сигналізує про наявність несправності. При надходженні такого сигналу, блок керування перемикає виконання алгоритму керування рухом на той алгоритм, який забезпечує рух гексаподу при пошкодженні певної ноги.

У випадку, якщо всі сервоприводи відпрацювали правильно, система не змінює стандартний (norm) алгоритм і продовжує працювати за ним.

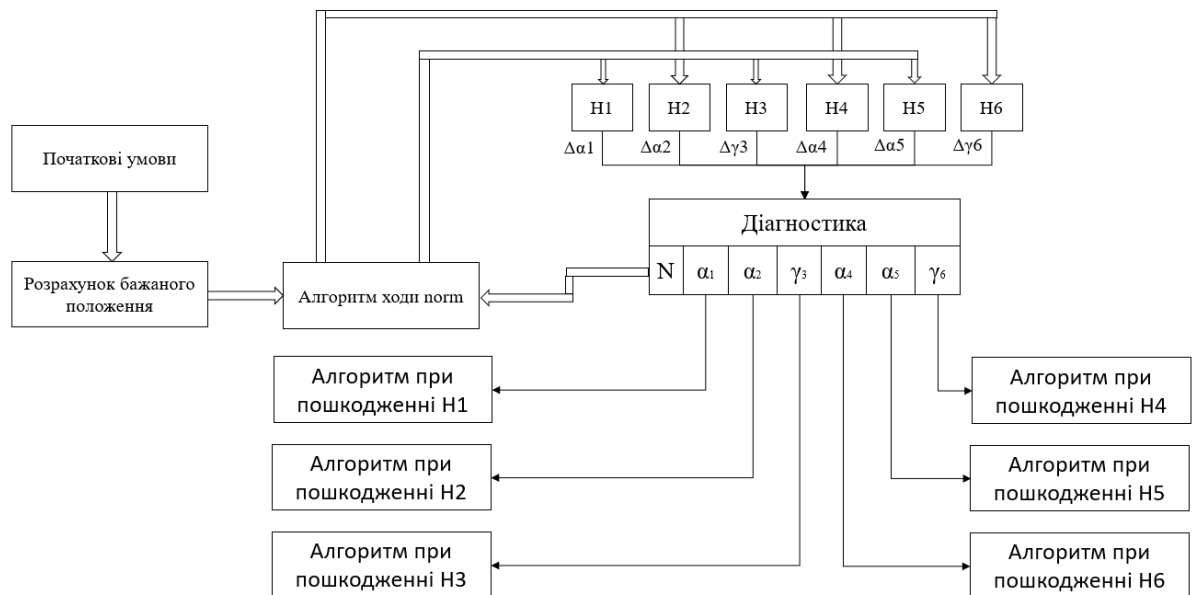


Рисунок 3.13. Загальна функціональна модель системи керування рухом

В даній роботі, як вже було зазначено раніше, через обрану будову гексаподу, його початкову орієнтацію та напрямок руху, для ніг 3 та 6 не виконується обрахунок кута α , тому в наданій функціональній схемі ці ноги перевіряються на наявність пошкоджень в Суглобі 3 (поворот по куту γ).

3.3.2 Канал керування ногою 1 системи керування гексаподом

На рис. 3.14 представлений канал керування ногою 1 в режимі norm, який здійснює керування переміщенням ноги 1. Як можна побачити на зображеній

схемі, після отримання сигналу від блока «Алгоритм ходи поgm», канал керування обраховує необхідний кут повороту α для сервоприводу Суглобу 1 (СП) та передає його на сервопривод, після чого отримує сигнал вимірювання реального кута повороту сервоприводу від сенсора (С) та порівнює його із заданим. Якщо значення заданого та виміряного кутів повороту співпадають, то виконання алгоритму руху продовжується стандартно і йде обрахунок та передача на сервоприводи відповідних кутів β та γ .

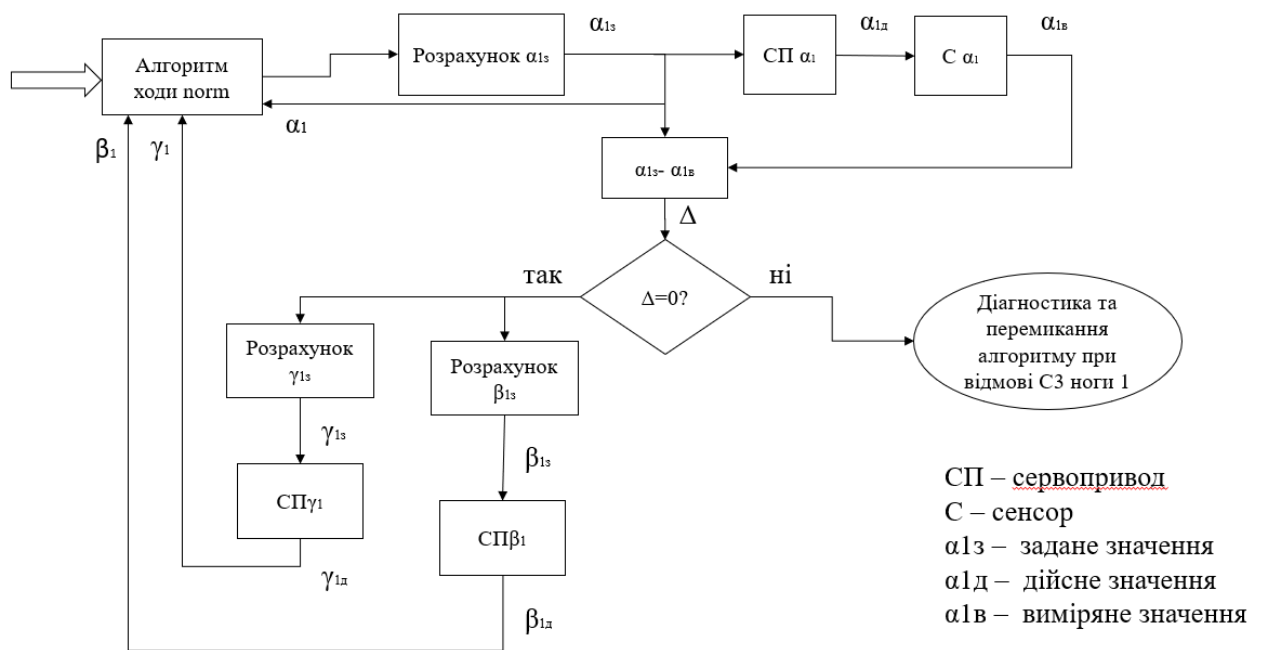


Рисунок 3.14. Канал керування ногою 1 в режимі norm

У разі відхилення значення виміряного кута повороту сервоприводом ланки ноги від значення заданого на сервопривод кута повороту, система переходить до алгоритму керування, представленому на рис. 3.15, для забезпечення переходу до потрібного алгоритму руху.

Спочатку на сервоприводи суглобів 2 (СП $_{\beta 1}$) та 3 (СП $_{\gamma 1}$) подається сигнал для того, щоб гексапод підігнув пошкоджену ногу таким чином, щоб вона була максимально компактною і якнайменше впливала на переміщення робота, адже в такому стані вона представляє собою лише вантаж, який гексапод змушений носити з собою.

Після підняття пошкодженої ноги система перемикає алгоритм руху на інший, який відповідає алгоритму ходи при пошкодженні ноги 1 і здатний забезпечити стійкий рух гексаподу при підігнутій і піднятій нозі 1 відповідно до запропонованої та розробленої у Розділі 2 п'ятикрокової відмовостійкої трикутної ходи із циклом, в якому три ноги підтримують тіло, а дві знаходяться у стані маху (рис. 2.16).

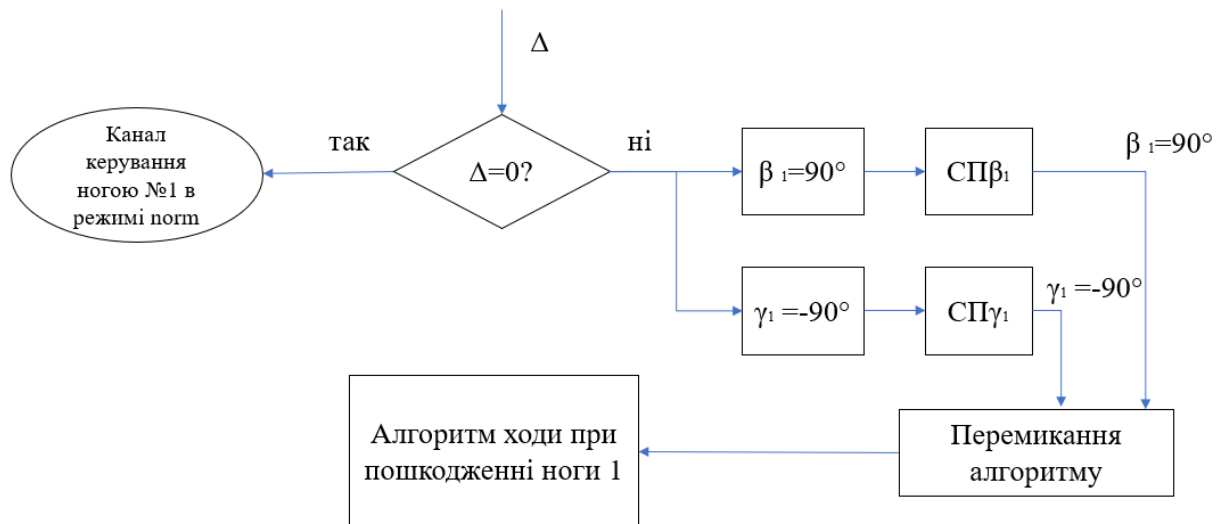


Рисунок 3.15. Діагностика та перемикання алгоритму при відмові Суглобу 1 ноги 1

Канали керування рухом гексаподу при пошкодженні Суглобу 1 ніг 2, 4, та 5 мають таку ж структуру, як і зображеного на рис. 3.14 каналу керування при пошкодженні ноги 1. Перемикання системи керування гексаподом на алгоритм ходи з пошкодженням зазначених ніг відбувається за схемою, аналогічною до наведеної на рис. 3.15.

3.3.3 Канал керування ногою 3 системи керування гексаподом

Для керування ногою 3 розроблено функціональну модель каналу керування (рис. 3.16), який будується подібно до описаного вище каналу керування ногою 1 (рис. 3.14). Так як для досліджуваної моделі гексаподу та моделі його руху не передбачено повороти ноги 3 (як і ноги 6) у горизонтальній площині на кут α , то непрацездатний стан цієї ноги можемо моделювати,

наприклад, відмовою Суглобу 2 чи Суглобу 3.

Якщо нога 3 є працездатною, тобто заданий кут повороту β_3 сервоприводу СП $_{\beta_3}$ відповідає дійсному (виміряному) значенню та кут повороту γ_3 сервоприводу СП $_{\gamma_3}$ відповідає дійсному (виміряному) значенню, тоді в системі керування цією ногою реалізується режим погт (рис. 3.16).

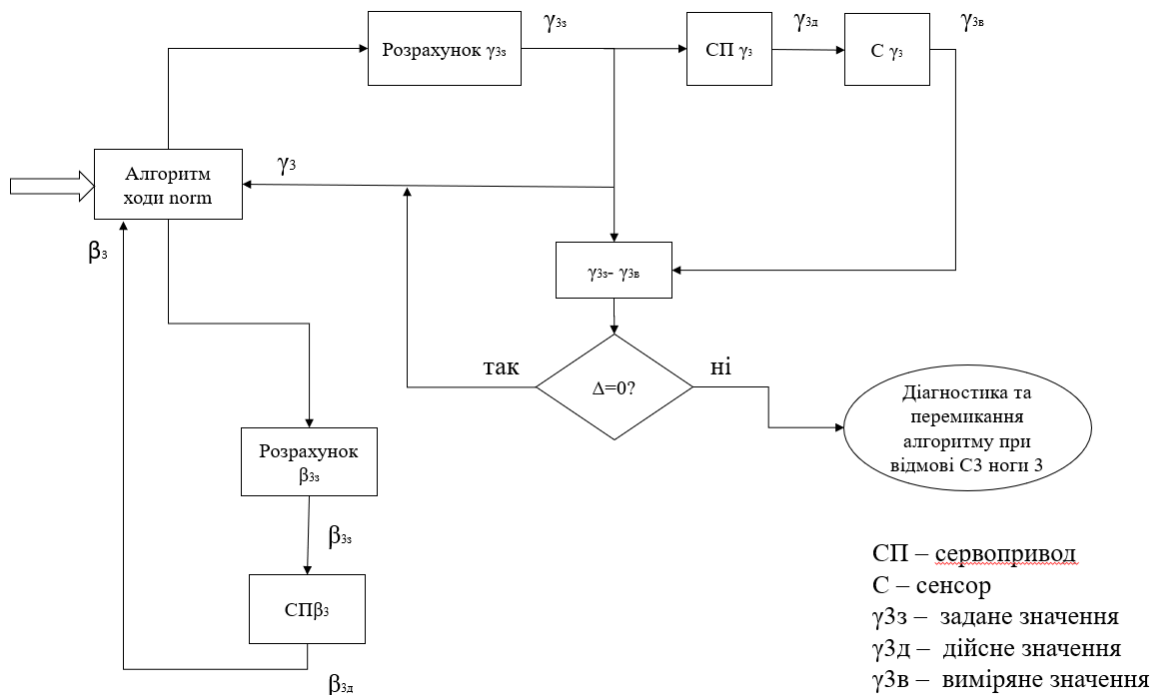


Рисунок 3.16. Канал керування ногою 3 в режимі погт

Нехай нога 3 буде непрацездатною/пошкодженою через відмову Суглобу 3. Тоді система керування перемикається на виконання алгоритму керування, наведеного на рис. 3.17, для забезпечення переходу до потрібного алгоритму руху. Спочатку на СП $_{\beta_3}$ подається сигнал на максимальне підняття ноги 3 у Суглобі 2, щоб перетворити її на вантаж для подальшого руху. Після цього система перемикає алгоритм керування ногою 3 гексаподу на той, який відповідає алгоритму ходи при пошкодженні ноги 3 і здатний забезпечити стійкий рух гексаподу при піднятій нозі 3 відповідно до запропонованої та розробленої у п. 3.2.4 п'ятикрокової відмовостійкої трикутної ходи із циклом, в якому три ноги підтримують тіло, а дві знаходяться у стані маху (рис. 3.10).

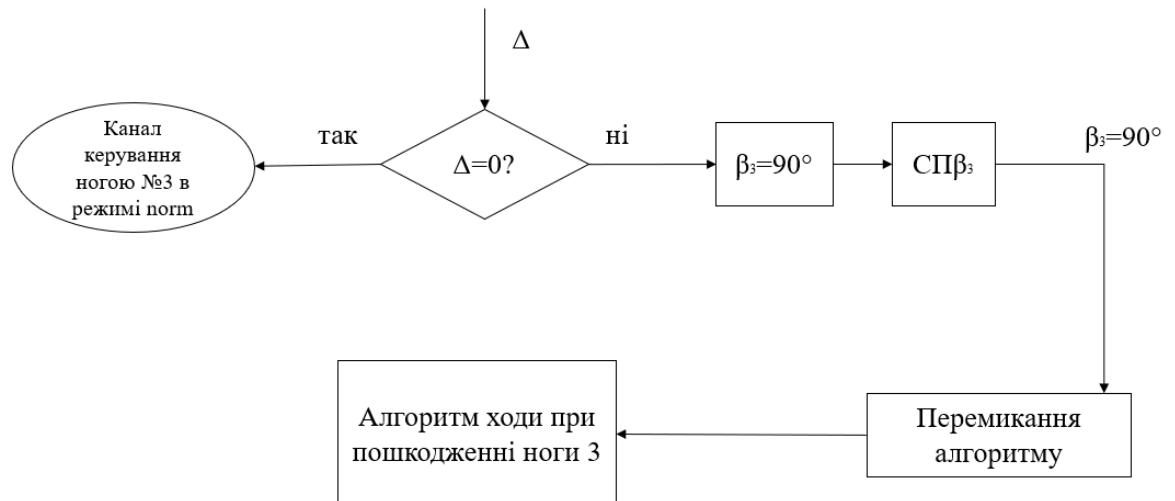


Рисунок 3.17. Діагностика та перемикання алгоритму при відмові Суглобу 3 ноги 3

Канал керування рухом гексаподу для ноги 6 в режимі *norm* має структуру, подібну до наведеної на рис. 3.16. Перемикання системи керування гексаподом на алгоритм ходи з пошкодженням Суглобу 3 ноги 6 відбувається за схемою, аналогічною до наведеної на рис. 3.17.

Таким чином за розробленими та обґрунтованими алгоритмами ходи у разі відсутності та наявності пошкоджень однієї ноги гексаподу було розроблено функціональні моделі як системи керування рухом гексаподу за прямолінійною траєкторією, так і окремих каналів керування ногами гексаподу з діагностикою функціонального стану суглобів та перемиканням системи на керування за алгоритмами відповідно до поставленого діагнозу. Відповідно до розробленої моделі система керування забезпечує стійкий рух гексаподу в умовах структурної невизначеності.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику, визначено початкові умови та розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для проведення моделювання руху гексаподу за прямолінійною траєкторією при відсутності на

наявності структурної невизначеності у вигляді потенційного пошкодження однієї з ніжок.

2. Проведено моделювання руху гексаподу з усіма працездатним ногами, в результаті якого встановлено, що за розробленим алгоритмом руху гексапод точно переміщується за заданою траєкторією на задану відстань.
3. Проведено моделювання руху гексаподу з пошкодженою ногою 1, в результаті встановлено, що рух по заданому алгоритму спричиняє відхилення в напрямку дзеркально протилежному від підігнутої ноги. Проведено моделювання гексаподу з пошкодженою ногою 5, яка розміщена симетрично ніжці 1 відносно повздовжньої осі гексаподу. Встановлено, що відповідно до розробленого алгоритму ходи так само відбувається відхилення в напрямку протилежному до підігнутої ноги, а результати дзеркально повторюють моделювання з пошкодженою ногою 1. Загалом в обох випадках загальний шлях гексапода становить на 5,15 умовних одиниць менше ніж запланований.
4. Проведено моделювання руху гексаподу з пошкодженою ногою 3 за розробленим алгоритмом ходи, в результаті встановлено, що відхилень по вісі Оу не відбувається але центр маси гексаподу постійно тягне в напрямку руху що призвело до збільшення пройденого шляху на 10,77.
5. Запропоновано та обґрунтовано розробку робастної системи керування гексаподом для забезпечення стійкого руху об'єкта як у режимі працездатності всіх його ніжок, так і при пошкодженні однієї з них.
6. Проведено структурно-функціональний синтез робастної системи керування, в результаті якого розроблено та обґрунтовано узагальнену функціональну модель системи керування, а також моделі каналів керування окремими ногами з діагностикою їх стану та перемиканням у разі їх відмови на алгоритм керування, який забезпечує стійку ходу гексаподу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ ВИКОРИСТАННЯ РОБАСТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГЕКСАПОДОМ

4.1 Опис ідеї та технологічний аудит проекту

У 21-му столітті робототехніка розвивається стрімкими темпами, надаючи можливості використання передових технологій у промисловості, сільському господарстві, транспорті та інших галузях. Серед різноманіття типів рухомих механізмів роботів виділяється робот-гексапод, що імітує шестиногих комах.

Основна перевага робота-гексапода полягає в його високій руховій здатності та стабільності на нерівній місцевості. Здатність підтримувати стійкість на різних поверхнях і адаптивність до рельєфу роблять його ідеальним для дослідження та рятувальних операцій у важкодоступних середовищах, таких як вулкани, місця без кисню чи небезпечні зони.

Імітація природної ходи комах, де рух тіла відбувається через дискретні точки опори, надає роботу-гексаподу високу мобільність та адаптивність до навколишнього середовища. Завдяки низькому споживанню енергії та здатності до швидкого пересування по нерівній місцевості, він стає невід'ємним інструментом для досліджень та рятування [37].

Робота-гексапод підлягає застосуванню у різних сферах, включаючи цивільну та військову розвідку, розвідку та знешкодження мінних полів, використання в промисловому виробництві, а також в освітніх та розважальних сферах.

У даній главі проаналізовано та подано у вигляді таблиць: зміст ідеї; можливі напрямки застосування; основні вигоди, що може отримати користувач товару та чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників [40].

В таблиці 4.1 наведено цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати потрібні групи потенційних клієнтів [41].

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання робастних систем керування гексаподом.	1. Промислове виробництво	Автоматизоване точне позиціонування та вирівнювання деталей і компонентів, від мініатюрної оптики до великих панелей в труднодоступних місцях.
	2. Екологія	Збір даних з метою прогнозування екологічного стану середовища, локалізація та знаходження джерел забруднень.
	3. Освіта	Можливість проведення польових досліджень в потенційно небезпечних середовищах без ризику для дослідника.
	4. Ліквідація наслідків	Пошуково-рятувальна діяльність. Знаходження пошкоджень та їх ремонт.
	5. Військова справа	Виявлення положення противника. Виявлення наслідків його перебування. Знищення ворожої техніки
	6. Ресурсозабезпеченість	Дослідження про наявність ресурсів в труднодоступних місцях, як наприклад печери.

Висновок: Здебільшого гексаподи надають можливість дистанційної розвідки та збору даних в небезпечних середовищах. Також вони мають можливість виконувати певні дії, наприклад збір зразків чи розмінування. Також гексаподи можуть використовуватись для промислового виробництва за рахунок їх можливостей до точного монтажу деталей. Головними напрямками застосування є військова справа, виробництво, екологія та ресурсозабезпеченість.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів наведено в таблиці 4.2. [41].

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабк а сторон а)	N (нейтрал ьна сторона)	S (силь на сторо на)
		Мій проект	ROS (Robot Operating System)	V-REP (Virtual Robot Experimen tation Platform)			
1	Низькі витрати	10	19	12			+
2	Точність	середня	висока	висока	+		
3	Швидкість проведення результату	середня	висока	низька		+	
4	Гнучкість	+	-	-		+	
5	Простота	80%	10%	50%			+

Висновки: Як видно з таблиці головною перевагою проекту для користувачів являється простота та гнучкість, яка дозволяє користувачеві швидко перелаштувати систему контролю гексаподу без використання великої кількості персоналу. Не менш важливим параметром є низькі витрати на розробку даної системи в порівнянні з конкурентами і, як результат, більш низьку ціну.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Технологічний аудит – це спосіб перевірки технологічного стану підприємства, рівня організації всіх важливих процесів за допомогою встановлених критеріїв, виявлення сильних і слабких сторін виробництва [40].

У таблиці 4.3 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту [41]. Параметри, які були взяті як ідея проекту:

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

1	2	3	4	5
№ п/ п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Патрулювання території	Використання веб додатку	Наявна	Доступна
2	Автоматична розвідка обраної території	Впровадження алгоритмів переміщення та збереження отриманої інформації на заданій ділянці.	Наявна	Доступна
3	Використання імітаційних програм для навчання операторів	Складання навчального процесу за рахунок використання спеціально розроблених систем	Наявна	Доступна
4	Розширення існуючих систем	Впровадження робастних систем керування для перемикання між різними типами руху.	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Впровадження робастних систем керування для перемикання між різними типами руху.				

Висновки: Проаналізувавши таблицю, можна зробити висновок, що даний проект можна використовувати як у реальних наукових проектах так і у бізнес задач, а також впровадження освітнього процесу використовуючу дану платформу.

Для аналізу ринкових можливостей, які можна використати під час аналізу запуску оцінюються по основним параметрам: кількість гравців, загальний обсяг продажу, динаміка ринку, рентабельність та специфічних умов ліцензування [41]. Ці дані описані у Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

1	2	3
№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	142 740
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	92%

Висновки: головними перевагами показників стану ринку є те, що динаміка стрімко зростає на попит даного продукту, це призведе до підвищення обсягу продаж. Присутні також фактори загрози для виходу на ринок. Такими факторами є висока кількість конкурентів та рівень знань у спеціалістів, здатних виконувати завдання альтернативними методами. Середня норма рентабельності на ринку є високою – 92%, це означає, що проект рентабельний для входження на ринок.

Для отримання більш чіткої картини ситуації на ринку визначимо потенційні групи клієнтів (табл.4.5), їх характеристики, сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи [41].

Таблиця 4.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Монтаж деталей у важкодоступних місцях, що потребують високої точності	Промислові виробництва	Особливості, викликані зі специфікою використання крокуючого робота, необхідність модифікування програмно-алгоритмічного забезпечення, інтеграція з існуючими системами	Модифікації існуючої системи, Можливість комплектування з іншими системами, Висока точність роботи.
2	Потреба в постійному визначення екологічного стану	Екологія		
3	Прогнозування поведінки супротивника чи потенційного супротивника	Військова справа		

Висновки: Проаналізувавши таблицю, виділимо дві головні потреби, що формує ринок. Перша це: військова сфера застосування, друге – цивільна, а саме екологічна сфера чи видобувна промисловість. Таким чином бачимо, що здебільшого на ринку в крокуючих роботах цінуються їх можливості збору інформації.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища що сприяють ринковому впровадженню (табл. 4.6.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.7.). Результати наведено у таблицях 4.6-4.7.

Таблиця 4.6 Фактори можливостей

№ п/ п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення попиту	Різке збільшення зацікавленості до системи	Покращення системи керування для утримання якісної переваги
2	Необхідність до інтеграції	Відкрити API	Дати можливість компаніям користуватись відкритим API
3	Навчання	Навчання молодих спеціалістів для керування крокуючими роботами	Спрощення системи керування для менш тривалого навчання спеціалістів
4	Індивідуальне замовлення	Клієнт потребує додавання нових специфічних розширень	Валідація ідей клієнтів для додавання нового функціоналу до системи керування
5	Інтеграції	Давати можливість клієнтам використовувати систем для розширення існуючих	Оцінки можливих ризиків

Висновки: Такі системи використовуються у малих, нових та прогресивних компаніях та стартапах через їх невелику ціну та простий функціонал, який може бути розширеним за вимогою клієнта. Для зростання компанії на основі даного товару можна обрати стратегію поступового росту з повільним створення клієнтської бази та головною ставкою на доступність та гнучкість системи. Подальше розширення досягається шляхом реклами та введення нових можливостей по використанню.

Таблиця 4.7 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Ринок наповнений великими гравцями	Бажання клієнтів використовувати системи керування великих компаній
2	Економічний	Не бажання платити за додатковий функціонал	Пошук нової цільової аудиторії
3	Якість	Можливі помилки системи керування при роботі	Відмова від продукту
4	Некомпетентність робітників	Продукт занадто складний у використанні	Відмова від продукту
5	Технологічний	Нові технології пропонують більш зручне чи економічно вигідніше рішення	Технічна відсталість продукту

Висновки: Головним фактором загроз є конкуренція, тому що користувач може обрати перевірену часом систему та згоден витратити більше часу на її освоєння. Також конкуренти мають достатню частку ринку для його демпінгування. Також варто слідкувати за розвитком технологій, пов'язаних з ринком даних товарів через загрозу появи нових технологій і необхідності швидко до них адаптуватись.

Надалі проведемо аналіз пропозиції (табл. 4.8.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - досконала конкуренція	Відсутні конкуренти, які вже закріпились на ринку і мають свій бренд	Перетворення одного з гравців на бренд, поява нових гравців
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Відсутні конкуренти, які вже закріпились на ринку і мають свій бренд	Перетворення одного з гравців на бренд, поява нових гравців
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів з різних галузей
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Товар, здебільшого є специфічним і налаштованим на потреби окремої групи клієнтів	Клієнтно-орієнтована стратегія розвитку, Адаптивність до умов ринку та адаптивність продукту
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від специфічних запитів клієнтів	Пошук великих клієнтів, які потребують налаштованих під їх потреби .
6. За інтенсивністю - марочна	Збільшення кількості розробників систем керування.	Створення бренду на основі існуючої системи.

Висновки: На ринку присутня досконала конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару і товар навіть в рамках ринку може досить сильно відрізнятись, хоча і залишається в своїй категорії. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародна з міжгалузевою ознакою, так як можливі іноземні замовники. Конкуренція за видами товарів – видова. Вартість товару на пряму залежить від комплектації та функціоналу, тому за характером конкурентних переваг – цінова.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 4.9.) [41].

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	-	ROS (Robot Operating System), V-REP	Приватні підприємці	Виробничі підприємства, Дослідницькі організації, Державні установи	Не наявний
Висновки: ринок не є насиченим, але конкуренція висока, через велику кількість малих компаній. Завадою являється здебільшого пошук перших клієнтів для початку формування бази клієнтів	-	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти	Постачальники не можуть диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару	Обмежень практично немає, оскільки фактично товар є категорією і не може бути напряду заміненим

На основі аналізу конкуренції, проведеного наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, що наведені в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл.

4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено в таблиці 4.10 [41].

Таблиця 4.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Використання системи контролю з високою точністю. Чим надійніше працює система тим більший попит на товар
2	Простота	Простота у використанні для користувача робить систему привабливою для клієнта.
3	Клієнтоорієнтованість	Можливість адаптації можливостей продукту під вимоги конкретного клієнта
4	Готовий алгоритм	Зменшення часу очікування для покупця
5	Обслуговування	Потреба в консультації з технічних питань

Висновки: Для підвищення надійності системи необхідно використовувати алгоритми, в яких з меншою вірогідністю будуть виникати помилки при роботі. Простота у використанні та налаштуванні приладу робить його більш привабливим для клієнта через те, що необхідно тратити мінімум часу на налагодження та запуск. Клієнтоорієнтованість та простота відкривають широкий спектр використання приладу у поєднанні із іншими системами.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18						+2	
2	Простота	20	-3						
3	Клієнтоорієнтованість	19	-3						
4	Готовий алгоритм	15							+3
5	Обслуговування	17						+2	

Висновки: спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 4.11) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має менший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує, що сильними сторонами є простота та клієнтоорієнтованість.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведено в таблиці 4.12. на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін в таблиці 4.11 [41].

Таблиця 4.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. простота використання; 2. адаптивність; 3. клієнтоорієнтованість; 4. універсальність; 5. низька ціна;	Слабкі сторони: 1. низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя; 2. обмежений функціонал 3. Більш якісні продукти конкурентів
Можливості: 1. вихід на міжнародний ринок; 2. збільшення попиту; 3. можливості до інтеграції; 4. орієнтованість на навчання спеціалістів; 5. індивідуальні замовлення; 6. співпраця з конкурентами;	Загрози: 1. поява схожих систем; 2. кваліфікованість спеціалістів; 3. технологічне застарівання 4. зупинка росту потреб 5. уніфікація товару

Висновки: Як можна побачити з табл.12, використовуючи наші сильні сторони та можливості, а також приймаючи до уваги загрози та слабкі сторони проект необхідно починати як дешеву альтернативу більш сильним гравцям ринку з метою отримання початкової клієнтної бази за рахунок низької ціни на товар, але при цьому необхідно підтримувати достатньо високий рівень якості щоб наш товар більш вигідно виглядав на фоні конкурентів.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13) [41].

Таблиця 4.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Низька	4міс
2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Висока	2міс
3	Суперництво	Нижче середнього	6міс.

Висновки: в результаті аналізу обрано кооперацію, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14) [41].

Таблиця 4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислове виробництво	-	+	низька	-
2	Військові	+	+	низька	-

Продовження таблиці 4.14

3	Дослідницькі лабораторії	+	+	середній	+
4	Державні установи	+	+	низький	+
5	Освітні заклади	+	-	середня	+
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Державні установи та дослідницькі лабораторії мають найбільшу простоту входу з запропонованих варіантів через невисокі вимоги до продукту порівняно з іншими варіантами. У випадку успішної реклами є можливість зайняти нішу.					

Висновки: За результатами оцінки були обрані групи, які можуть бути задоволені простотою та економічністю нашого товару. З таблиці 4.14 можна побачити що обрані клієнти потребують дані рішення, але попит на даний товар невеликий, через що можливі труднощі з отриманням замовлень.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15.).

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін проекту шляхом більшої спеціалізації під індивідуальні замовлення	Стратегія цільового маркетингу	Використання інновацій, Більша клієнтоорієнтовність, Зворотній зв'язок	Стратегія диференціації

Висновки: Обрання стратегії представленої в табл. 4.15 обумовлено грою на сильних сторонах проекту, серед яких простота та адаптивність під вимоги окремо взятих клієнтів. Це приводить нас до того що основою стратегії розвитку

варто робити цільовий маркетинг з метою отримання конкретних специфічних замовлень, ніж намагатись грати на більш широкий ринок.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) [41].

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристик и товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні, не є «першопрохідцем»	Сконцентруємось на пошуку нових споживачів	Компанія буде виходити з вимог клієнта та власних можливостей запропонувати альтернативу	Стратегія заняття конкурентної ніші

Висновок: так як проект не можна повноцінно вважати «першопрохідцем», компанії доведеться боротись за клієнтів, тому очевидно потрібно сконцентруватись на отриманні нових споживачів, бо постійні клієнти інших компаній навряд чи перейдуть з їх продукції на іншу. Також варто обрати стратегію заняття конкурентної ніші, бо змагатись з великими гравцями ринку на початку немає можливості і найкращий варіант зосередитись на окремому сегменті ринку з метою отримання початкової репутації компанії та бази клієнтів;

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 4.17) [41].

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Модифікації існуючої системи	Стратегія диференціації	Індивідуальний підхід до кожного замовлення	Зворотній зв'язок
2	Можливість комплектування з іншими системами	Стратегія диференціації	Розвиток можливих моделей систем керування	Адаптивність
3	Висока точність роботи	Стратегія диференціації	Покращення якості продукту	Якість

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку [41].

Висновки: Дана стратегія є ключовою для подальшого розвитку проекту та отримання прибутку для реінвестування у проект та купівлю нових технологій з подальшою інтеграцією у проект. використання стратегії диференціації для даного стартап-проекту ґрунтується на визнанні унікальних характеристик системи контролю для крокуючих роботів, які надають йому конкурентні переваги. Стратегія диференціації визначається як стратегічний підхід, спрямований на створення та підтримку унікальності продукту або послуги, що відрізняється від аналогічних пропозицій на ринку.

У даному випадку, індивідуалізовані замовлення та висока адаптивність до потреб клієнтів роблять продукт унікальним і відповідно привабливим для цільової аудиторії. Враховуючи відсутність прямих конкурентів у ніші та потребу високого рівня експертизи для використання сучасних технологій, стратегія диференціації стає важливим інструментом для будівництва стійкого конкурентного переваги.

Цей підхід сприяє позиціонуванню продукту як унікального та високоякісного рішення, що відповідає індивідуальним вимогам клієнтів. Зосередження на інноваційних рішеннях та високій якості сприяє формуванню позитивного образу бренду, забезпечуючи не лише конкурентоспроможність, але й вірогідність вищих цін в контексті унікальності та ексклюзивності пропозиції.

4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова концепція товару є першим кроком до формування ідеї яку отримує споживач, наведено у таблиці 4.18 [41].

Таблиця 4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність системи керування крокуючим роботом для розвідки території	Відносно дешева та надійна система	Ціна, простота, підтримка, обслуговування, універсальність, зворотній зв'язок
2	Навчання операторів керування системою	Проста система, яка може бути змінена за запитом клієнту	Ціна, простота, підтримка, обслуговування, універсальність, зворотній зв'язок

Висновки: в результаті оцінки маркетингової концепції є можливість відокремити дві основні аудиторії потенційних споживачів для подальшого створення рекламних кампаній. Зважаючи на базову ринкову стратегію обрану для даного товару, має сенс робити більш вузькоспеціалізовану маркетингову кампанію для залучення конкретних клієнтів.

Розробимо трьох-рівневу маркетингову модель товару (табл. 4.19) [41].

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Засіб надає можливості людині зручно керувати крокуючим роботом без необхідності прямого керування кожною ногою. В цілому система сама прораховує як крокуючий робот буде йти на основі сигналів, які подає оператор з контролера.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Простота використання	Нм	Тх
	Швидкість роботи	Нм	Тх
	Точність	Нм	Тх
	Надійність	Нм	Тх
	Вартість	М	Е
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація IEEE,		
	Пакування: -		
Марка: -			
III. Товар із підкріпленням	Додавання нового функціоналу за вимогою клієнта		
	Після придбання товару технічна підтримка та консультація на терміном 3 роки		
Товар потенційно буде захищений від копіювання тим, що керуюча програма буде знаходитись в так званому чорному ящику – воно буде виконувати роботу, але начинку звичайними засобами подивитись буде не можна. Можливе також встановлення «kill switch», який би видаляв дані при порушенні конфіденційності.			

Висновки: основними засобами захисту системи є використання різноманітних методів для захисту/видалення інтелектуальної начинки що формує систему керування якщо є ймовірність що система може бути вкрадена. Це повинно бути вказано в правилах користування і клієнт повинен бути про це попереджений. Також через напрям на диференціацію товару можливі заключення індивідуальних угод про захист прав продукту та правил користування. Наступним кроком визначимо цінові межі (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	50000-140000 грн.	80000-140000 грн.	200000 та вище	100000-120000 грн.

Висновки: Для даного товару було обрано категорію цін вище середнього, так як такі системи зазвичай використовуються в державних, військових установах та організаціях тоді як цивільна, приватна особа не буде купляти даний продукт. Також додаткова націнка йде за індивідуальний підхід до клієнта. Також для даного товару планується зробити систему послуг для періодичної перевірки стану технічного обладнання системи для користувача, який готовий додатково оплачувати послуги, при цьому спочатку вона буде безкоштовною в рамках гарантійних зобов'язань перед покупцем.

Визначимо оптимальну систему збуту, в межах якого будуть прийматися ті чи інші рішення(табл. 4.21) [41].

Таблиця 4.21 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Одноразовий продаж	Продаж готової до роботи системи	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
2	Договір про технічну підтримку	Оформлення підписки для технічної консультації та підтримки товару	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: Ефективною вважається система по оформленні договору на технічну підтримку, який допоможе отримувати кошти регулярно та дозволить продукту мати більший термін життя. Через що виникає більш довготривалі ділові

стосунки з клієнтом що дозволяє більш точно залучити його до бази клієнтів компанії.

Таблиця 4.22 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Обставини змушують клієнта шукати системи контролю руху крокуючого робота для виконання певних цілей	Таргетинг у соцмережах та SMM у принципі	Простота Використання, клієнтоорієнтованість, Точність, Надійність, Вартість	Продемонструвати гнучкість та доступність товару	Показ роботи системи на тестовому роботі для демонстрації її можливостей.

Висновки: Маркетингові зусилля орієнтовані на максимально ефективне використання різноманітних каналів для розміщення рекламних об'яв, зокрема у популярних соціальних мережах, таких як Facebook Ads, Google Ads, TikTok та LinkedIn. Основною метою є забезпечення того, щоб цільова аудиторія встигла відчувати ефективність та потужність нашої системи за кілька хвилин. Важливим аспектом є уникнення враження, що низька ціна продукту вказує на його низьку якість. З цією метою в рекламних роликах важливо акуратно продемонструвати високу якість нашого продукту, збалансовуючи доступність цін з враженням про винятковість та вигідність. Це необхідно для того, щоб споживачі зрозуміли, що доступність не є компромісом якості, а представляє собою стратегічний аспект нашого підходу до виробництва та маркетингу. Всі рекламні зусилля спрямовані

на побудову позитивного образу бренду, викликаного не лише ефективністю системи, але й високою якістю, що є ключовим фактором для залучення та утримання уваги цільової аудиторії.

4.5. Розроблення бізнес-моделі стартап-проекту

Бізнес-модель стартап-проекту поділено на декілька пунктів, а саме: ключові партнери, ключова діяльність, ключові ресурси, ціннісна пропозиція, відносини з клієнтами, канали, сегменти користувачів, структура витрат, джерела доходів [40].

Розробка бізнес-моделі для стартап-проекту використання робастних систем керування гексаподом є важливою, оскільки вона створює стратегічний фреймворк для розуміння та впровадження ключових аспектів ініціативи. Бізнес-модель визначає механізми взаємодії з ринком, включаючи потенційних клієнтів та партнерів, і вказує на шляхи монетизації проекту. Вона також визначає основні ресурси, необхідні для успішного впровадження, та допомагає збалансувати вартість та користь для всіх зацікавлених сторін.

Бізнес-модель є інструментом для ретельного аналізу екосистеми, в якій працюватиме проект, та визначення конкурентоспроможності. Вона сприяє усвідомленню потреб і очікувань клієнтів, що дозволяє адаптувати стратегію проекту до реальних вимог ринку. Завдяки бізнес-моделі можна ефективно визначити ключові вектори розвитку, враховуючи фінансові, технічні та організаційні аспекти, і виробити стратегію масштабування для подальшого успіху проекту. Бізнес модель проекту представлена у табл. 4.23.

Висновок: проект спрямований на взаємодію з вузько спеціалізованою аудиторією, фокусуючись на виробництві індивідуалізованих рішень, які відповідають конкретним потребам та бажанням клієнтів. Підходячи до кожного клієнта як до унікального суб'єкта, проект надає можливість детально обговорити його вимоги до функціоналу системи та адаптувати базову програму до конкретних потреб. Це відкриває можливість установаження індивідуальних цін для кожного проекту, враховуючи його унікальні характеристики. Стрімкий

стартап спрямований на виробництво унікальних та інноваційних рішень, що визначає його конкурентний перевагу в ринковому середовищі. Заснований на індивідуальному підході до кожного клієнта, проект вирізняється гнучкістю та адаптивністю, сприяючи побудові довгострокових та взаємовигідних відносин з клієнтами.

Таблиця 4.23 Бізнес-модель стартап-проекту

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Взаємодія з клієнтами	Сегменти споживачів
Ключовими партнерами стартап-проекту є компанії які виготовляють крокуючих роботів для того щоб одразу розробляти для них системи керування. Наприклад: Boston Dynamics. Від цього партнерства виграють усі, адже компанія-виробник зможе одразу отримати систему керування для своєї продукції, а ми отримаємо нагоду попрацювати з новітніми роботами, підвищивши власну кваліфікацію та статус на ринку. Для партнера буде вигідно з нами працювати для подальшого продажу повноцінно готового продукту.	Ключовими видами діяльності стартап-проекту є створення системи керування крокуючим роботом, яка дає змогу ефективно та просто керувати переміщенням крокуючого робота контролером і при цьому залишає потенціал для подальших модифікацій за бажанням клієнта. Канали продажу є email розсилки та приватні зустрічі з CEO підприємством для подальшої точкової угоди.	Ціннісною пропозицією у стартапі є більш ефективна система керування ніж у конкурентів, яка також дозволяє налаштувати її під потреби конкретного клієнту. А також потенційно включати в себе алгоритми переміщення та робастну систему керування для випадку виникнення пошкоджень у робота. Також є пропозиція по налаштуванню системи керування під потребу певного клієнту з фокусом на полегшення опанування даної системи потенційним оператором	Взаємодія з клієнтами будуються на основі зв'язків та дружніх відносин, адже система потребує точених рішень для масштабування проекту під кожну окрему компанію, що дає можливість збільшити ціну за послуги. Також для покращення впізнаваності проекту серед спеціалізованого середовища будуть створені спеціалізовані івенти для демонстрації можливостей системи керування для збільшення кількості клієнтів.	Сегменти стартап проекту діляться на дві групи: компанії у яких є потреба у встановленні системи керування на крокуючих роботів, бо вони не мають ніякої та ті компанії яким необхідна специфічна система і які шукають тих, хто виконує індивідуальне замовлення. Ринку у якому планується розвиватися стартап є нішевим
	Ключові ресурси	Канали збуту		
	Ключовими ресурсами є люди, які мають технічну освіту в області механіки, програмування, теорії автоматичного керування та інженерії, бо вони життєво необхідні для отримання якісного продукту. Також виникає потреба у матеріальному забезпеченні, такому як наприклад комп'ютери, матеріали для роботів для тестів, тощо.	Каналами збуту є прямі канали спілкування з клієнтами для виконання індивідуальних замовлень, також є можливість продажу готових рішень без підгонки під конкретні потреби, що є більш наближеним до масової торгівлі. Серед методів спілкування можна виділити email спілкування та прямі зустрічі		
Структура витрат		Потоки доходів		
Структурою витрат стартап-проекту є висококваліфіковані спеціалісти з дисциплін механіки, програмування, теорії автоматичного керування та інженерії, які можуть проводити дослідження та створювати систему з необхідними клієнту параметрами.		Джерелами доходів є продаж готових рішення які дозволяють отримувати базові системи керування крокуючими роботами які підходять для базових завдань, періодичне оплата при оформленні договору о технічній підтримці продукту .		

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто концепцію нового стартапу, спрямованого на розробку системи контролю для крокуючих роботів. Основний акцент стартапу робиться на доступності для клієнтів та його здатності адаптуватися до їхніх потреб. Сприятливість для клієнтів також є ключовим пріоритетом у цьому стартапі. Тому розроблена система керування є привабливою для потенційних клієнтів, бо даний стартап зосереджений на виконанні індивідуальних замовлень, яких на ринку даного товару більшість.
2. Щоб краще висвітлити ідею проекту, було створено табл. 4.1, яка містить назву проекту, можливості для клієнтів та ризики використання системи. Аналіз слабких та сильних сторін, а також порівняння продукту із конкурентами, свідчать про відсутність прямих конкурентів у даній ніші. Доступність, простота та адаптивність під потреби клієнтів роблять проект конкурентоспроможним та привабливим для нових клієнтів, особливо якщо зосередитись на окремо взятому секторі ринку.
3. Під час технічного аудиту проекту отримано розуміння кращої технології виконання продукту. Виявлено, що технології вже існують, але не є інтуїтивно зрозумілі та потребують високого рівня розуміння середовища використання та доопрацювання під конкретні запити споживачів. Створення проекту можливо за рахунок приватних пропозиції до компаній для опису можливостей, які вони отримують після оформлення партнерства.
4. Зважаючи на розвиток технологій та запити до роботи крокуючих роботів можна стверджувати що існує реальна потреба в даному типі товарів. Споживачі потребують створену систему яка здатна працювати і виконувати необхідні завдання з великим запасом надійності, а також працювати навіть за умови виникнення умов невизначеності.

5. Розроблена бізнес-модель стартап-проекту що показує вигідність інвестуванню у проект, через відсутність прямих конкурентів по інтеграції готової систему у екосистеми існуючих компаній.

ВИСНОВКИ

1. В результаті огляду стану проблеми було встановлено, що не зважаючи значний науковий і практичний інтерес до розробки та вдосконалення крокуючих мобільних роботів, все ще недостатньо вирішеною є проблема забезпечення їх стійкого руху в умовах пошкодження чи відмови ніжок робота під час його функціонування. Для вирішення цієї проблеми обґрунтовано необхідність розробки робастної системи керування рухом робота, для синтезу якої необхідно розробити алгоритми стійкої ходи та на основі моделювання оцінити їх працездатність та ефективність.
2. Обґрунтовано та проаналізовано кінематичну модель гексапода та кінематичну модель його ноги. На основі кінематики були складені прямі та обернені кінематичні рівняння для ніг гексаподу, на основі яких проаналізовано різні алгоритми ходи. Обґрунтовано врахування невизначеності в математичній моделі, зокрема можливого пошкодження чи відмови однієї ноги гексаподу.
3. Запропоновано та обґрунтовано алгоритми ходи для гексаподу без пошкоджень та з пошкодженнями однієї з ніг. Показано, що запропоновані алгоритми здатні забезпечувати стійке положення гексаподу при його русі в умовах відмови однієї з ніг.
4. На основі кінематичних рівнянь та розроблених алгоритмів ходи побудовано програмну модель гексаподу та модель переміщення гексаподу в програмному середовищі MATLAB.
5. На основі отриманої програмної моделі було розроблено методику, визначено початкові умови та розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для проведення моделювання руху гексаподу за прямолінійною траєкторією при відсутності та наявності структурної невизначеності у вигляді

пошкодження однієї з ніжок. Було проведено моделювання руху гексаподу для чотирьох різних станів гексаподу, результати яких підтвердили можливість стійкого руху при пошкодженні чи відмові однієї з ніжок.

6. Запропоновано та обґрунтовано розробку робастної системи керування гексаподом для забезпечення стійкого руху об'єкта як у режимі працездатності всіх його ніжок, так і при пошкодженні однієї з них. Проведено структурно-функціональний синтез робастної системи керування, в результаті якого розроблено та обґрунтовано узагальнену функціональну модель системи керування, а також моделі каналів керування окремими ногами з діагностикою їх стану та перемиканням у разі їх відмови на алгоритм керування, який забезпечує стійку ходу гексаподу.

7. Було проведено розробку стартап-проекту за темою дисертації. В ході цього процесу був проведений технологічний аудит ідеї проекту, аналізовані ринкові можливості для запуску стартап-проекту, розроблена ринкова стратегія та вивчена маркетингова програма проекту. На основі виконаної роботи була розроблена детальна бізнес-модель стартап-проекту, що відображає його вигідність для інвесторів. Переваги включають вузьку спеціалізацію проекту та відсутність прямих конкурентів у сфері інтеграції готової системи у екосистеми існуючих компаній.

Отже, підводячи підсумок всієї роботи, можна дійти висновку, що розроблена робастна система керування здатна забезпечити стабільний рух гексапода в умовах невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белзецький Р. С. Робототехніка як інструмент сучасної технічної освіти [Електронний ресурс] / Р. С. Белзецький, О. М. Полторак // Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 22-24 березня 2017 р. - Електрон. текст. дані. - 2017. - Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ininv/all-ininv-2017/paper/view/2375>.
2. Гриневич М. С. Мобільна платформа у вигляді робота-павука та аналіз можливостей її застосування [Електронний ресурс] / М. С. Гриневич, Є. М. Андрієць, А. В. Коваль // Житомирський державний технологічний університет. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/02/158-1.pdf>.
3. Jianwei Zhao. Design and Research of All-Terrain Wheel-Legged Robot [Електронний ресурс] / Jianwei Zhao, Tao Han, Shouzhong Wang // MDPI. – 2021.- 21(16), 5367; <https://doi.org/10.3390/s21165367> – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5367>.
4. Liyana N. W. Challenges and Solutions for Autonomous Ground Robot Scene Understanding and Navigation in Unstructured Outdoor Environments: A Review [Електронний ресурс] / N. W. Liyana, R. Alexander, C. Douglas // MDPI. – 2023.- 13(17), 9877; <https://doi.org/10.3390/app13179877> – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/17/9877>.
5. Пархомей І. Р. Оптимізація режимів технологічних операцій роботів вертикального переміщення – Київ, 2019. – 93 с.
6. Brush K. Mobile robot (mobile robotics) [Електронний ресурс] / Kate Brush // TechTarget. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/mobile-robot-mobile-robotics#:~:text=Classifications%20and%20types%20of%20mobile%20robots&text=Polar%20robots%20that%20are%20designed,dry%20land%20or%20withi n%20houses>.

7. Moreno J. J. Design, Implementation and Validation of the Three-Wheel Holonomic Motion System of the Assistant Personal Robot (APR) [Электронный ресурс] / J. J. Moreno, E. Clotet // Sensors. – 2016. -16(10), 1658 – DOI: [10.3390/s16101658](https://doi.org/10.3390/s16101658)
8. Bruzzone L. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review [Электронный ресурс] / L. Bruzzone, S. E. Nodehi, P. Fanghella // MDPI. – 2022. - 10(8), 648; <https://doi.org/10.3390/machines10080648> – Режим доступа до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/648>.
9. Rubio F. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications [Электронный ресурс] / F. Rubio, F. Valero, C. Llopis-Albert // SageJournals. – 2019. – <https://doi.org/10.1177/1729881419839596> - Режим доступа до ресурсу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1729881419839596>.
10. Ambrose. E. Hopping Robots [Электронный ресурс] / Eric Ambrose.. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.eric-ambrose.com/hoppers.html>.
11. Zeglin, G. J. *Uniroo: A One-Legged Dynamic Hopping Robot*. BS Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1991.
12. Piquepaille R. STriDER, a three-legged walking robot [Электронный ресурс] / Roland Piquepaille // ZDNET. – 2007. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.zdnet.com/article/strider-a-three-legged-walking-robot/>.
13. BigDog - The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth [Электронный ресурс] // BostonDynamics. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: https://web.archive.org/web/20170518204101/http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html.
14. Dante II: Technical Description, Results and Lessons Learned [Электронный ресурс] // International Journal of Robotics Research. – 1999. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ri.cmu.edu/publications/dante-ii-technical-description-results-and-lessons-learned/>.

15. Hebert, Martial; Thorpe, Charles; Stentz, Anthony , Intelligent Unmanned Ground Vehicles , *Volume 388 of the series The Springer International Series in Engineering and Computer Science*. Springer. p. 1–17, 1997
16. Khosiawan, Yohanes; Nielsen, Izabela, A system of UAV application in indoor environment. *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal* 4 p. 2–22, 2016
17. Borzemski, Leszek; Grzech, Adam; Świątek, Jerzy; Wilimowska, Zofia , *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 36th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2015*. Springer. p. 31.
18. Bo Y. Fault-tolerant motion planning for a hexapod robot with single-leg failure using a foot force control method [Электронный ресурс] / Y. Bo, F. Yaojin, L. Daquan // SageJournals. – 2022. -<https://doi.org/10.1177/17298806221121070> – Режим доступа до ресурсу: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17298806221121070>.
19. Quinlivan J. How Amazon deploys collaborative robots in its operations to benefit employees and customers [Электронный ресурс] / Joseph Quinlivan // Amazon. – 2023. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.aboutamazon.com/news/operations/how-amazon-deploys-robots-in-its-operations-facilities>.
20. Zhijun C. Fault-tolerant gait design for quadruped robots with one locked leg using the GF set theory [Электронный ресурс] / C. Zhijun, X. Qingxing // Mechanism and Machine Theory. – 2022. - 178(19–20):105069 - DOI:[10.1016/j.mechmachtheory.2022.105069](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105069) – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/363069858_Fault-tolerant_gait_design_for_quadruped_robots_with_one_locked_leg_using_the_GF_set_theory.
21. Xianbao C. Gait planning for a quadruped robot with one faulty actuator [Электронный ресурс] / C. Xianbao, G. Feng // SpringerLink. – 2015. - 28, pages11–19 (2015) <https://doi.org/10.3901/CJME.2014.1107.167> – Режим

доступу

до

ресурсу:

<https://link.springer.com/article/10.3901/CJME.2014.1107.167>.

22. Konstantinos C. Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery [Електронний ресурс] / C. Konstantinos, V. Vassilis, M. Jean-Baptiste // ScienceDirect. – 2018. - Volume 100, p. 236-250, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.11.010>. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889017302440>.
23. Jung-Min Y. Two-phase discontinuous gaits for quadruped walking machines with a failed leg [Електронний ресурс] / Yang Jung-Min // ScienceDirect. – 2008. – 56(9), p. 728-737 – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921889008000092>.
24. Адаптивні та робастні системи – 2. Робастні системи: Метод. вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» / Уклад.: О.А. Жученко, А.П. Цапар, ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 35 с.
25. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник для студентів спеціальності 151 « Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізацій « Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» / Ю. М. Ковриго, О. В. Степанець, Т. Г. Баган, О. С. Бунке ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 155 с.
26. Методи сучасної теорії управління: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, Н. М. Луцька, В. В. Іващук. — К., НУХТ, 2010.— 196 с.
27. Ковалевський, В. В. Робастне керування приводом складної технічної системи [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра; спец. 171 – електроніка / В. В. Ковалевський; наук. кер. В. І. Васильєв. – Суми: СумДУ, 2021. – 27 с.

28. Горбатюк О. Д. Порівняльний огляд методів лінійних матричних нерівностей і H_∞ -оптимізації стосовно задачі придушення зовнішніх збурень для стабілізації нестійкого об'єкта / О. Д. Горбатюк, К. В. Мельник // Системні дослідження та інформаційні технології : науково-технічний журнал - 2012 - № 1 - С. 129-141
29. Структурно-параметричний синтез дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі / О. А. Сущенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. - 2016. - Вип. 46. - С. 194-201. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2016_46_30
30. Тунік А.А., Галкін Є.В., Мельник К.В. H_∞ -оптимізація системи керування польотом // Електроніка та системи управління. — 2006. — № 2(8). — С. 107–117.
31. Балюта С. М. Робастні системи взаємозв'язаного керування турбогенераторами в умовах невизначеності / С. М. Балюта, Ю. В. Куєвда. // Наукові праці ВНТУ. – 2017. – №4.
32. Тунік А., & Басанець, О. (2010). Synthesis of robust discrete guidance system for solid body with incomplete state vector measurements. *Proceedings of National Aviation University*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.43.1853>
33. Urrea C, Valenzuela L and Kern J (2016) Design, Simulation, and Control of a Hexapod Robot in Simscape Multibody. Applications from Engineering with MATLAB Concepts. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/63388>.
34. Universal Robots Support. DH PARAMETERS FOR CALCULATIONS OF KINEMATICS AND DYNAMICS [Електронний ресурс] / Universal Robots Support // Universal Robots Support. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/omusw>
35. Robot Inverse Kinematics With A Hexapod Leg [Електронний ресурс] // YouTube. – 2023. – Режим доступу до ресурсу:

https://www.youtube.com/watch?v=HjmIOKSp7v4&list=LL&index=2&t=713s&ab_channel=JustAnotherMakerChannel.

36. Gurel C. Hexapod Modelling, Path Planning, and Control. [Електронний ресурс] / Canberk Suat. Gurel // ResearchGate. – 2017. – Режим доступу до ресурсу:
https://www.researchgate.net/publication/320386792_Hexapod_Modelling_Path_Planning_and_Control#pf34.
37. TRIPOD GAIT MODELING IN ROBOTS [Електронний ресурс] // Insects & Robots. – 2010. – Режим доступу до ресурсу:
<https://insectsandrobots.weebly.com/tripod-gait.html>.
38. Вес Baxter. Tripod-walking Gait [Електронний ресурс] / Вес Baxter // Weebly. – 2012. – Режим доступу до ресурсу:
<https://tripodgaitasamodelforrobots.weebly.com/tripod-walking-gait.html>.
39. Robust Control [Електронний ресурс] // Resourcium. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://resourcium.org/topic/robust-control>.
40. Розробка стартап-проектів: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 188 с.
41. Розробка стартап-проектів: практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційновимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с.

Додаток А

Лістинг програмного коду

Код основної програми з усіма справними ногами

```

clc, clear all
O = [200,250,0]; % body point
centres{1} = O;
for k = 1:10
    if mod(k,2) == 1
        for j = 1:7
            if j == 5 || j == 6
                O(1) = O(1) + 10;
            end

            l1 = 30;
            l2 = 40;
            l3 = 50;

            dtr = pi/180;

            R0 = 60;

            % Iterate over six different values of phi
            for i = 1:6
                phi = (i-1)* 60 * dtr + 60 * dtr; % Change this as needed

                if j <= 3
                    if mod(i,2) == 1
                        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20*j - 40);
                        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                        Pz = -10;
                    else
                        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
                        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                        Pz = -50;
                    end
                elseif j == 4
                    if mod(i,2) == 1
                        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20*j - 40);
                        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                        Pz = -50;
                    else
                        Px = O(1) + 120 * cos(phi);

```

```

        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    end
elseif j == 5 || j == 6
    if mod(i,2) == 1
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 - 10 * (j - 4));
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    else
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -10;
    end
elseif j == 7
    if mod(i,2) == 1
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    else
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    end
end
end

Inverse_angles = hexapod_inverse_kinematics(Px, Py, Pz, l1, l2, l3, phi, R0,
O);

leg_points = hexapod_leg_coordinates(Inverse_angles, l1, l2, l3, R0, phi, O);

hexapod_points{i} = leg_points;
end
% Затримка між кадрами
pause(0.1); % Змініть це значення за потребою

% Очистка графіка перед наступним кадром
drawnow;
clf;

visualize_hexapod(O, squeeze(hexapod_points));
centre_of_masses =
calculate_hexapod_center_of_mass(squeeze(hexapod_points));
centres1{j + 7*(k-1)} = centre_of_masses;
end
elseif mod(k,2) == 0

```

```

for j = 1:7
    if j == 5 || j == 6
        O(1) = O(1) + 10;
    end

    l1 = 30;
    l2 = 40;
    l3 = 50;

    dtr = pi/180;

    R0 = 60;

    % Iterate over six different values of phi
    for i = 1:6
        phi = (i-1)* 60 * dtr + 60 * dtr; % Change this as needed

        if j <= 3
            if mod(i,2) == 0
                Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20*j - 40);
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                Pz = -10;
            else
                Px = O(1) + 120 * cos(phi);
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                Pz = -50;
            end
        elseif j == 4
            if mod(i,2) == 0
                Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20*j - 40);
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                Pz = -50;
            else
                Px = O(1) + 120 * cos(phi);
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                Pz = -50;
            end
        elseif j == 5 || j == 6
            if mod(i,2) == 0
                Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 - 10 * (j - 4));
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
                Pz = -50;
            else
                Px = O(1) + 120 * cos(phi);
                Py = O(2) + 120 * sin(phi);
            end
        end
    end
end

```

```

        Pz = -10;
    end
elseif j == 7
    if mod(i,2) == 0
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    else
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    end
end
end

Inverse_angles = hexapod_inverse_kinematics(Px, Py, Pz, l1, l2, l3, phi, R0,
O);

leg_points = hexapod_leg_coordinates(Inverse_angles, l1, l2, l3, R0, phi, O);

hexapod_points{i} = leg_points;
end
% Затримка між кадрами
pause(0.1); % Змініть це значення за потребою

% Очистка графіка перед наступним кадром
drawnow;
clf;

visualize_hexapod(O, squeeze(hexapod_points));
centre_of_masses =
calculate_hexapod_center_of_mass(squeeze(hexapod_points));
centres1{j + 7*(k-1)} = centre_of_masses;
end
end
centres{k+1} = centre_of_masses;
O = centre_of_masses;
end
O = [200, 250, 0]; % Приклад значення для O
%%

% Витягуємо координати центрів мас для кожної ітерації
x = zeros(1, numel(centres));
y = zeros(1, numel(centres));
z = zeros(1, numel(centres));

```

```

for i = 1:numel(centres)
    x(i) = centres{i}(1);
    y(i) = centres{i}(2);
    z(i) = centres{i}(3);
end

% Будуємо 3D графік
figure;
plot(x, y, 'o-');
title('Графік центрів мас гексаподу');
xlabel('X-координата');
ylabel('Y-координата');
grid on;

```

Код основної програми без однієї ноги

```

clc, clear all
O = [200,250,0]; % body point
stable_phase = {[2,4,6],
                [3,5,6],
                [2,3,4,5]};
Broken_leg = 1;
centres{1} = O;
for k = 1:10
    for j = 1:11

        if j == 9 || j == 10
            O(1) = O(1) + 10;
        end

        l1 = 30;
        l2 = 40;
        l3 = 50;

        dtr = pi/180;

        R0 = 60;

        if j <= 4
            phase = 1;
        elseif j <= 8
            phase = 2;
        else
            phase = 3;

```

end

% Iterate over six different values of phi

for i = 1:6

 phi = (i-1)* 60 * dtr + -1 * 60 * dtr; % Change this as needed

 if i == Broken_leg

 Px = O(1) + 120 * cos(phi);

 Py = O(2) + 120 * sin(phi);

 Pz = -10;

 elseif ismember(i, stable_phase{phase}(:)) && ~ismember(phase,[2,3])

 % Call the not moving function

 [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_not_moving(phi, j, O);

 elseif ismember(i, stable_phase{phase}(:)) && phase == 2

 if ~ismember(i, stable_phase{1}(:))

 [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_moving(phi, j, O, 1);

 else

 [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_not_moving(phi, j, O);

 end

 elseif phase == 3 && ismember(i, stable_phase{phase}(:))

 [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_moving(phi, j, O, 1);

 else

 % Call the moving function

 [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_moving(phi, j, O, 0);

 end

Inverse_angles = hexapod_inverse_kinematics(Px, Py, Pz, l1, l2, l3, phi, R0,
O);

angles_for_calibration{i} = Inverse_angles;

leg_points = hexapod_leg_coordinates(Inverse_angles, l1, l2, l3, R0, phi, O);

hexapod_points{i} = leg_points;

end

% Затримка між кадрами

pause(0.1); % Змініть це значення за потребою

% Збереження поточних лімітів графіка

currentLimits = axis;

% Очистка графіка перед наступним кадром

delete(findobj('Type','line','-or','Type','text','-or','Type','Scatter'))

% Встановлення бажаних лімітів

axis(currentLimits);

```

    visualize_hexapod(O, squeeze(hexapod_points));
    centre_of_masses =
calculate_hexapod_center_of_mass(squeeze(hexapod_points));
    centres{k+1} = centre_of_masses;
end
O = centre_of_masses;
end
%%

% Витягуємо координати центрів мас для кожної ітерації
x = zeros(1, numel(centres));
y = zeros(1, numel(centres));
z = zeros(1, numel(centres));

for i = 1:numel(centres)
    x(i) = centres{i}(1);
    y(i) = centres{i}(2);
    z(i) = centres{i}(3);
end

% Будуємо 3D графік
figure(1);

axisLimits = 250;
x_planned = linspace(200,400,11);
y_planned = ones(1,11)*250;

% Малюємо "дійсний шлях"
plot(x, y, 'o-', 'DisplayName', 'Дійсний шлях');
hold on; % Увімкнення режиму утримання для додавання інших графіків

% Малюємо "запланований шлях"
plot(x_planned, y_planned, 'x-', 'DisplayName', 'Запланований шлях');

xlim([axisLimits-100, axisLimits+200]);
ylim([axisLimits-30, axisLimits+30]);
title('Графік центрів мас гексаподу');
xlabel('X-координата');
ylabel('Y-координата');
grid on;

legend();

Функція візуалізації гексапода
function visualize_hexapod(O, leg_points_array)

```

```

% Visualization
figure(2);
hold on;
grid on;
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title('Hexapod Visualization');

% Set plot limits
axisLimits = 100;
axis([-axisLimits axisLimits -axisLimits axisLimits -axisLimits axisLimits]);

% Body point
scatter3(O(1), O(2), O(3), 'filled', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r');
text(O(1), O(2), O(3), ' Центр тіла');

% Iterate through all leg_points_array
for i = 1:size(leg_points_array, 2)
    leg_points = leg_points_array{i};
    %delete(findobj('Type','line','-or','Type','text','-or','Type','Scatter'))

    % Leg points
    scatter3(leg_points(:, 1), leg_points(:, 2), leg_points(:, 3), 'filled',
'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b');
    text(leg_points(2, 1), leg_points(2, 2), leg_points(2, 3), ' Суглоб 1');
    text(leg_points(3, 1), leg_points(3, 2), leg_points(3, 3), ' Суглоб 2');
    text(leg_points(4, 1), leg_points(4, 2), leg_points(4, 3), ' Суглоб 3');
    text(leg_points(5, 1), leg_points(5, 2), leg_points(5, 3), sprintf(' Основа ноги
%d', i));

    % Connect points with lines
    plot3([leg_points(1,1),leg_points(2,1)], [leg_points(1,2),leg_points(2,2)],
[leg_points(1,3),leg_points(2,3)], 'b-');
    plot3([leg_points(2,1),leg_points(3,1)], [leg_points(2,2),leg_points(3,2)],
[leg_points(2,3),leg_points(3,3)], 'b-');
    plot3([leg_points(3,1),leg_points(4,1)], [leg_points(3,2),leg_points(4,2)],
[leg_points(3,3),leg_points(4,3)], 'b-');
    plot3([leg_points(4,1),leg_points(5,1)], [leg_points(4,2),leg_points(5,2)],
[leg_points(4,3),leg_points(5,3)], 'b-');

    axis equal;
    view(3);
end
for i = 1:(length(leg_points_array) - 1)

```

```

plot3([leg_points_array{i}(2, 1), leg_points_array{i+1}(2, 1)], ...
      [leg_points_array{i}(2, 2), leg_points_array{i+1}(2, 2)], ...
      [leg_points_array{i}(2, 3), leg_points_array{i+1}(2, 3)], 'b-');
end
plot3([leg_points_array{end}(2, 1), leg_points_array{1}(2, 1)], ...
      [leg_points_array{end}(2, 2), leg_points_array{1}(2, 2)], ...
      [leg_points_array{end}(2, 3), leg_points_array{1}(2, 3)], 'b-');
hold off
end

```

Функція прямих рівнянь

```

function leg_points = hexapod_leg_coordinates(Inverse_angles, l1, l2, l3, R0, phi, O)
    alpha = Inverse_angles(1);
    beta = Inverse_angles(2);
    gamma = Inverse_angles(3);

    angles = [alpha; beta; gamma];

    Px = l1*cos(alpha + phi) + l2*cos(alpha + phi)*cos(beta) + l3*cos(alpha +
phi)*cos(beta + gamma) + R0*cos(phi) + O(1);
    Py = l1*sin(alpha + phi) + l2*sin(alpha + phi)*cos(beta) + l3*sin(alpha +
phi)*cos(beta + gamma) + R0*sin(phi) + O(2);
    Pz = l2*sin(beta) + l3*sin(beta + gamma) + O(3);

    leg_points = [O(1), O(2), O(3);
                  R0*cos(phi) + O(1), R0*sin(phi) + O(2), O(3);
                  O(1) + R0*cos(phi) + l1*cos(alpha + phi), O(2) + R0*sin(phi) +
l1*sin(alpha + phi), O(3);
                  O(1) + R0*cos(phi) + l1*cos(alpha + phi) + l2*cos(alpha + phi)*cos(beta),
O(2) + R0*sin(phi) + l1*sin(alpha + phi) + l2*sin(alpha + phi)*cos(beta), O(3) +
l2*sin(beta);
                  Px, Py, Pz];
end

```

Функція обернених кінематичних рівнянь

```

function inverse_angles = hexapod_inverse_kinematics(Px, Py, Pz, l1, l2, l3, phi, R0,
O)
    % Calculate intermediate variables
    Px0 = O(1) + R0*cos(phi);
    Py0 = O(2) + R0*sin(phi);
    Pz0 = 0;

```

```

alpha = atan((Py-Py0)/(Px-Px0))-phi;

disp(alpha + " " + phi)
if (abs(alpha) >= pi/2 && abs(alpha) <= 3*pi/2)
    alpha = alpha + pi;
end

H = sqrt((Py-(Py0 + l1*sin(alpha + phi)))^2+(Px- (Px0 + l1*cos(alpha + phi)))^2);

L = sqrt(H^2 + Pz^2);
gamma = acos((l2^2+l3^2-L^2)/(2*l2*l3)) - pi;

B = acos((l2^2+L^2-l3^2)/(2*l2*L));
A = atan(H/Pz);
beta = (B+(-A)) - pi/2;

% Convert angles to degrees
inverse_angles = [alpha, beta, gamma];
end

```

Функція обчислення положення ноги що рухається

```

function [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_moving(phi, j, O, hold_position)
    dtr = pi / 180; % конвертуємо градуси в радіани

    if j <= 3
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 * j - 40);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -10;
    elseif j == 4
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 * j - 60);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    elseif j > 4 && j < 8 && hold_position == 0
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 * (j-4) - 40);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -10;
    elseif j == 8 && hold_position == 0
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 * (j-4) - 60);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    elseif j > 4 && j <= 8 && hold_position == 1
        Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
    end

```

```

    Pz = -50;
elseif j == 9 || j == 10
    Px = O(1) + 120 * cos(phi) + (20 - 10 * (j - 8));
    Py = O(2) + 120 * sin(phi);
    Pz = -50;
elseif j == 11
    Px = O(1) + 120 * cos(phi);
    Py = O(2) + 120 * sin(phi);
    Pz = -50;
end
end
end

```

Функція обчислення положення ноги що не рухається

```

function [Px, Py, Pz] = calculate_leg_coordinates_not_moving(phi, j, O)
    dtr = pi / 180; % конвертуємо градуси в радіани

    if j <= 8
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    elseif j == 9 || j == 10
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -10;
    elseif j == 11
        Px = O(1) + 120 * cos(phi);
        Py = O(2) + 120 * sin(phi);
        Pz = -50;
    end
end
end

```

Функція обрахунку центру маси гексаподу

```

function overall_center_of_mass =
    calculate_hexapod_center_of_mass(hexapod_points)
    num_legs = size(hexapod_points, 2);
    num_points = size(hexapod_points{1}, 1);

    % Ініціалізуємо матрицю для збереження координат центру мас для кожної
ноги
    center_of_mass = zeros(num_legs, 3);

```

```

% Обчислюємо центр мас для кожної ноги
for i = 1:num_legs
    leg_points = hexapod_points{i};

    % Ініціалізуємо координати центру мас для поточної ноги
    center_of_mass_leg = zeros(num_points - 1, 3);

    % Обчислюємо центр мас для кожного з'єднання точок
    for j = 1:num_points - 1
        center_of_mass_leg(j, :) = (leg_points(j, :) + leg_points(j + 1, :)) / 2;
    end

    % Сумуємо координати центру мас для кожного з'єднання точок
    center_of_mass(i, :) = sum(center_of_mass_leg) / (num_points - 1);
end

% Загальний центр мас гексаподу
overall_center_of_mass = mean(center_of_mass);
end

```

Додаток Б

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Короленко Ярослав Русланович
(Прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер,рік) або авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
	МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИКИ РУХУ КРОКУЮЧОГО РОБОТА В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ.	Збірник праць ХІХ Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» - Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 20-21 грудня 2023 року.	3	

Автор _____
(Підпис)

Короленко Ярослав Русланович
(Прізвище, ім'я, по батькові)

Зав. Каф. КІОНС _____
(Підпис)

Надія БУРАУ