

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК 004.94:621.865.8

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»**

**на тему: «3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та
вдосконалення його характеристик»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ПК-41мп
Карпач Діана Павлівна

Науковий керівник:

професор кафедри АСНК д.т.н, проф.
Безвесільна Олена Миколаївна

Консультант з розробки стартапу:

завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.
Вовк Ольга Миколаївна

Рецензент:

доцент каф. КІТВП, к.т.н., доцент
Синявський Іван Іванович

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

Київ – 2025 року

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

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Карпач Діані Павлівні

1. Тема дисертації «3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та вдосконалення його характеристик», науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. №4793-с
2. Термін подання студентом дисертації 01.12.2025р
3. Об'єкт дослідження: процес 3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та вдосконалення його характеристик.
4. Вихідні дані: технічні характеристики сервоприводів; параметри мікроконтролера та драйвера; середовища моделювання SolidWorks та Webots; мова програмування Python; базові алгоритми ходи.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз сучасного стану досліджень та конструктивних особливостей гексаподних роботів, огляд алгоритмів руху та методів оптимізації траєкторій, обґрунтування вибору середовищ 3D-моделювання, побудова параметричної 3D-моделі гексапода в SolidWorks, кінематичний аналіз конструкції, моделювання руху та реалізація алгоритмів ходи у середовищі Webots, розрахунок масо-габаритних параметрів та навантажень на приводи, застосування генетичних алгоритмів для оптимізації параметрів ходи, порівняльний аналіз ефективності алгоритмів за критеріями стабільності та енергоефективності, розробка стартап-проекту, висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: структурна схема системи керування, блок-схема алгоритмів ходи

7. Орієнтовний перелік публікацій: XXI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», Д.П. Карпач, студентка гр. ПК-41мп, д.т.н., проф. Безвесільна О.М. «ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ БАГАТОНОГИХ РОБОТІВ».

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Вовк О.М., д.е.н., проф. завідувач кафедри економічної кібернетики		

9. Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання магістерської дисертації	1 тиждень	
2	Аналіз літератури, патентний пошук та уточнення технічного завдання	2 тижні	
3	Обґрунтування вибору ПЗ та розробка 3D-моделі гексапода в SolidWorks	2 тижні	
4	Розробка алгоритмів керування та моделювання руху в Webots	2 тижні	
5	Проведення розрахунків навантажень, аналіз результатів	2 тижні	
6	Розробка стартап-проекту та економічне обґрунтування	1 тиждень	
7	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів.	2 тижні	

Студент

Діана КАРПАЧ

Науковий керівник

Олена БЕЗВЕСІЛЬНА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності, стабільності та енергоефективності руху мобільного шестиногого робота шляхом комплексного 3D-моделювання та алгоритмічної оптимізації.

Об'єктом дослідження є процес 3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та вдосконалення його характеристик. **Предметом дослідження** є методи та засоби 3D-моделювання, алгоритми керування рухом та методи їх оптимізації у віртуальних середовищах.

У роботі проведено аналіз сучасних конструктивних рішень та алгоритмів руху багатонігих платформ. Обґрунтовано доцільність використання середовища SolidWorks для параметричного проєктування механічної частини та симулятора Webots для моделювання фізичних процесів і коду керування.

Розроблено детальну 3D-модель гексапода, виконано кінематичний аналіз та розрахунок навантажень на сервоприводи, що підтвердило працездатність обраної конструкції. Реалізовано ієрархічну систему керування на мові Python, яка дозволяє відтворювати різні патерни ходи.

Особливістю роботи є застосування генетичних алгоритмів для автоматизованої оптимізації параметрів траєкторії руху кінцівок. Це дозволило знайти оптимальні налаштування, що забезпечують баланс між швидкістю пересування та споживанням енергії.

Практична частина роботи також включає розробку стартап-проєкту, в якому запропоновано стратегію комерціалізації гексапода як доступної освітньої та науково-дослідної платформи з відкритою архітектурою.

Ключові слова: ГЕКСАПОД, 3D-МОДЕЛЮВАННЯ, SOLIDWORKS, WEBOTS, КІНЕМАТИКА, ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ, РОБОТОТЕХНІКА, СТАРТАП-ПРОЄКТ.

ABSTRACT

The Master's thesis is dedicated to solving the relevant scientific and practical task of improving the efficiency, stability, and energy efficiency of a mobile six-legged robot locomotion through comprehensive 3D modeling and algorithmic optimization.

The **object of the study** is the process of 3D modeling of a hexapod robot to investigate and improve its characteristics. The **subject of the study** is the methods and tools of 3D modeling, motion control algorithms, and methods for their optimization in virtual environments.

The thesis analyzes modern design solutions and locomotion algorithms for multi-legged platforms. The expediency of using the SolidWorks environment for the parametric design of the mechanical part and the Webots simulator for modeling physical processes and control code is substantiated.

A detailed 3D model of the hexapod has been developed, and a kinematic analysis along with a calculation of servo drive loads has been performed, confirming the functionality of the chosen design. A hierarchical control system has been implemented in Python, allowing for the execution of various gait patterns.

A distinctive feature of the work is the application of genetic algorithms for the automated optimization of limb trajectory parameters. This allowed for finding optimal settings that ensure a balance between locomotion speed and energy consumption.

The practical part of the thesis also includes the development of a startup project proposing a commercialization strategy for the hexapod as an affordable educational and research platform with open architecture.

Keywords: HEXAPOD, 3D MODELING, SOLIDWORKS, WEBOTS, KINEMATICS, GENETIC ALGORITHMS, TRAJECTORY OPTIMIZATION, ROBOTICS, STARTUP PROJECT.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

PSO – (Particle Swarm Optimization) оптимізація роєм частинок;

DE – (Differential Evolution) диференціальна еволюція;

ACO – (Ant Colony Optimization) мурашиний алгоритм;

B2B - навчальні заклади;

B2C - індивідуальні розробники;

ПЗ – програмне забезпечення;

ІІІ - штучний інтелект;

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;

ВНЗ – вищий навчальний заклад;

ГА - генетичний алгоритм;

ABS – (Acrylonitrile Butadiene Styrene) акрилонітрилбутадієнстирол;

API – (Application Programming Interface) програмний інтерфейс застосунку;

CAD – (Computer-Aided Design) система автоматизованого проєктування;

CPG – (Central Pattern Generator) центральний генератор патернів;

DIY – (Do It Yourself) аматорське конструювання / «зроби сам»;

DOF – (Degrees of Freedom) ступені свободи;

FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання методом пошарового наплавлення;

IMU – (Inertial Measurement Unit) інерціальний вимірювальний модуль;

MVP – (Minimum Viable Product) мінімально життєздатний продукт;

ODE – (Open Dynamics Engine) відкритий фізичний рушій;

RL – (Reinforcement Learning) навчання з підкріпленням;

ROS – (Robot Operating System) операційна система роботизованих пристроїв;

URDF – (Unified Robot Description Format) уніфікований формат опису робота.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	9
• Актуальність теми	9
• Об'єкт і предмет дослідження	10
• Мета і завдання роботи	10
• Наукова новизна.....	11
• Практичне значення	12
• Структура роботи	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕКСАПОДНИХ РОБОТІВ.....	14
1.1 Конструктивні особливості гексаподних роботів.....	14
1.1.1 Корпус робота.....	15
1.1.2 Конструкція ніг.....	15
1.1.3 Система приводів.....	16
1.1.4 Сенсорна система.....	16
1.1.5 Система керування.....	16
1.1.6 Система живлення.....	17
1.1.7 Основні конструктивні властивості гексаподів.....	17
1.1.8 Приклади сучасних конструкцій.....	18
1.2 Алгоритми руху багатонігих роботів.....	20
1.2.1 Основи фазового циклу кінцівки.....	20
1.2.2 Tripod gait.....	20
1.2.3 Ripple gait.....	21
1.2.4 Wave gait.....	22
1.2.5 Tetrapod gait.....	22
1.2.6 Порівняльний аналіз режимів.....	23
1.2.7 Алгоритми переходу між ходами.....	24
1.2.8 Практичні рекомендації для гексаподних роботів.....	25

1.2.9	Висновки.....	25
1.3.	Методи оптимізації траєкторій	25
	Вступ. Постановка задачі оптимізації траєкторії для гексапода.....	25
1.3.1	Генетичні алгоритми (GA) та еволюційні методи.....	26
1.3.2	Інші евристичні та мета-евристичні методи	27
1.3.3	Класичні методи транскрипції/транспозиції	27
1.3.4	Навчання з підкріпленням і самообучувані підходи	28
1.3.5	Біонічні й адаптивні підходи: центральні генератори ритму (CPG) та адаптивний контроль	28
1.3.6	Гібридні та багатоцільові підходи.....	29
1.3.7	Критерії вибору методу.....	29
1.3.8	Висновки.....	30
1.4	Огляд 3D-середовищ моделювання роботів	30
1.4.1	Роль та класифікація середовищ моделювання.....	31
1.4.2	Аналіз ключових 3D-середовищ.....	31
1.4.3	Додатковий огляд спеціалізованих середовищ.....	33
1.4.4	Обґрунтування вибору основних середовищ.....	35
	Висновки до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2.	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ВИБІР СЕРЕДОВИЩ МОДЕЛЮВАННЯ.....	38
2.1.	Обґрунтування вибору Webots і Gazebo для дослідження.....	38
2.1.1.	Технічні переваги вибраних середовищ.....	38
2.1.2	Основні характеристики та історія середовищ.....	40
2.1.3.	Переваги середовища Webots у контексті дослідження гексапода.....	41
2.2.	Сценарії досліджень	43
2.3.	Критерії оцінки руху.....	44
	Висновки до розділу 2.....	45
РОЗДІЛ 3.	ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГЕКСАПОДНОГО РОБОТА.....	46
3.1.	Вибір та обґрунтування CAD-системи.....	46

3.2. Моделювання елементів ноги гексапода.....	47
3.2.1. Моделювання сегмента Coxa.....	48
3.2.2. Моделювання сегмента Femur.....	48
3.2.3. Моделювання сегмента Tibia.....	49
3.3. Моделювання центрального корпусу гексапода	49
3.3.1. Створення базової геометрії корпусу.....	50
3.3.2. Монтажні місця під ноги.....	50
3.3.3 Складання моделі гексапода в SolidWorks.....	51
3.4. Системні вимоги програмного забезпечення.....	52
Висновки до розділу 3.....	54
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГЕКСАПОДА У WEBOTS	56
4.1. Принципи реалізації алгоритмів керування у середовищі Webots.....	56
4.2. Математична модель циклу ходи та діаграма станів.....	57
4.3. Опис реалізованих алгоритмів пересування.....	57
4.4. Можливості аналізу та параметри симуляції.....	58
4.5. Аналіз переваг і обмежень середовища Webots.....	59
Висновки до розділу 4	60
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ РОБОТА.....	61
5.1. Вдосконалення конструкції гексапода за результатами моделювання та компонування.....	61
5.2. Розрахунок масо-габаритних характеристик та навантажень на кінцівки.....	64
5.3. Обґрунтування геометричних параметрів ланок кінцівок.....	68
5.4 Обґрунтування оптимізації конструкції опорно-рухового апарату гексапода методом скінченно-елементного аналізу.....	69
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «ШЕСТИНОГИЙ РОБОТ».....	72
6.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....	73
6.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
6.3 Розроблення ринкової та маркетингової стратегії проекту	91

6.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності	97
Висновки до розділу 6.....	101
ВИСНОВКИ.....	102
Основні результати дослідження.....	102
Практичні рекомендації.....	104
Перспективи подальших досліджень.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується стрімким зростанням ролі робототехнічних систем у різних галузях людської діяльності. Автоматизація виробництва, освоєння важкодоступних територій, виконання рятувальних операцій, дослідження космосу та океанських глибин — усі ці напрямки потребують створення мобільних, надійних і адаптивних роботів, здатних ефективно функціонувати у складних та непередбачуваних умовах.

Одним із найперспективніших типів мобільних роботів є гексапод — шестиногий робот, що завдяки своїй конструкції забезпечує високу стійкість, маневреність і здатність до пересування по нерівних поверхнях. На відміну від колісних і гусеничних платформ, які мають обмежену прохідність на складному рельєфі, гексапод може долати перешкоди, підійматися по нахилах, рухатися по сипких або кам'янистих поверхнях.

Однак, складність кінематичної структури гексаподів створює суттєві виклики під час розробки алгоритмів управління. Для того, щоб досягти плавного, енергоефективного та стабільного руху варто враховувати велику кількість параметрів гексаподного робота і вплив зовнішніх факторів. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні алгоритмів, здатних адаптуватися до зміни умов середовища, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю, стійкістю та енергоспоживанням.

Важливим інструментом сучасних досліджень у галузі робототехніки є віртуальні середовища моделювання, що дозволяють проводити детальний аналіз руху роботів без потреби у фізичному прототипі. Серед найпоширеніших середовищ для дослідження руху роботів виділяють Webots, Gazebo, CoppeliaSim, Unity та Matlab Simscape Multibody. Ці платформи дають можливість створювати

тривимірні моделі роботів, тестувати алгоритми керування, проводити симуляції у різних умовах і порівнювати отримані результати.

Актуальність теми даної магістерської роботи полягає у необхідності комплексного дослідження алгоритмів руху гексаподного робота у віртуальних середовищах з метою підвищення його ефективності, стабільності та енергооптимальності. Розробка удосконалень як у конструкції, так і в алгоритмах управління сприятиме створенню більш гнучких і надійних мобільних систем, здатних виконувати складні завдання у динамічних середовищах.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження — процес 3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та вдосконалення його характеристик.

Предмет дослідження — 3D-моделювання гексаподного робота для дослідження та вдосконалення його характеристик

Мета і завдання роботи

Метою роботи є підвищення ефективності руху гексаподного робота шляхом дослідження, аналізу та вдосконалення алгоритмів його управління у віртуальних середовищах, а також розробка конструктивних і програмних удосконалень, спрямованих на покращення стабільності, плавності та енергоефективності пересування.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень у сфері багатонігих роботів, алгоритмів їх руху та методів оптимізації траєкторій.
2. Обрати та обґрунтувати середовища моделювання Webots для досліджень.

3. Створити еталонну 3D-модель гексапода та реалізувати базові алгоритми ходьби у вибраних середовищах.
4. Провести симуляції руху у різних сценаріях та оцінити їх за критеріями швидкості, стабільності, енергоефективності та плавності.
5. Розробити удосконалення конструкції та алгоритмів руху, реалізувати їх у симуляційних середовищах та провести порівняльний аналіз результатів.
6. Провести аналітичний огляд сучасного стану досліджень гексаподних роботів, їх конструктивних особливостей та алгоритмів руху.
7. Дослідити існуючі методи оптимізації траєкторій руху багатонігих роботів, зокрема генетичні та евристичні алгоритми.
8. Обґрунтувати вибір віртуальних середовищ Webots для моделювання руху гексапода.
9. Створити еталонну тривимірну модель гексаподного робота у вибраних середовищах моделювання.
10. Реалізувати базові алгоритми ходьби (tripod gait, ripple gait, wave gait) у середовищах Webots.
11. Провести серію симуляцій руху у різних сценаріях середовища та проаналізувати результати за критеріями швидкості, стійкості, енергоефективності й плавності руху.
12. Виявити недоліки базової моделі та алгоритмів управління, запропонувати конструктивні й програмні удосконалення.
13. Реалізувати удосконалені алгоритми у середовищах моделювання, провести порівняльний аналіз результатів і сформулювати рекомендації для подальших розробок.

Наукова новизна

Наукова новизна магістерської дисертації полягає у:

- комплексному підході до аналізу та моделювання алгоритмів руху гексаподного робота у віртуальних середовищах із порівнянням точності, фізичної достовірності та стабільності результатів;
- застосуванні методів генетичних алгоритмів для оптимізації траєкторій руху гексапода з урахуванням критеріїв енергоефективності та плавності пересування;
- розробці удосконаленої конструкції гексаподного робота, що враховує розподіл маси, геометрію кінцівок та можливість розширення сенсорного комплексу;
- синтезі моделі інтегрованого підходу до синтезу руху, який поєднує аналітичні методи з 3D імітаційним моделюванням.

Отримані результати можуть бути використані як додаткова база для реалізації нових досліджень, які можуть бути пов'язані у сфері робототехніки, зокрема для створення автономних, пересувних, мобільних платформ для реальних застосувань. Дані мобільні платформи призначені для використання в різних сферах.

Практичне значення

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що створена 3D-модель гексаподного робота та реалізовані алгоритми руху можуть бути використані:

- для навчальних цілей при вивченні дисциплін, пов'язаних із робототехнікою, мехатронікою та автоматичним керуванням;
- як основа для створення фізичного прототипу гексапода з удосконаленою конструкцією та алгоритмами управління;
- для розробки систем руху автономних мобільних роботів, здатних адаптуватися до складних умов середовища;
- у подальших дослідженнях з оптимізації траєкторій та адаптивного управління рухом багатонігих роботів.

Результати також допоможуть знизити витрати, пов'язані з проектуванням нових типів роботів, оскільки вони допоможуть проводити попередні випробування у віртуальних середовищах без необхідності будувати дорогі фізичні прототипи.

Структура роботи

Магістерська робота складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

- У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет, наукову новизну та практичне значення дослідження.
- У *першому розділі* наведено аналіз сучасного стану досліджень гексаподних роботів, описано конструктивні особливості, відомі алгоритми руху та методи оптимізації траєкторій, а також проведено огляд основних 3D-середовищ моделювання.
- *Другий розділ* присвячено постановці задачі дослідження, вибору середовищ для симуляції, створенню 3D-моделі гексапода та визначенню критеріїв оцінювання ефективності руху.
- У *третьому розділі* описано моделювання руху гексапода у середовищі SolidWorks.
- У *четвертому розділі* описано моделювання руху гексапода у середовищі Webots, реалізацію базових алгоритмів ходьби та аналіз отриманих результатів.
- У *п'ятому розділі* розроблено та перевірено удосконалення конструкції і алгоритмів управління, зроблено усі необхідні розрахунки.
- У *шостому розділі* розроблено стартап-проект «ШЕСТИНОГИЙ РОБОТ».

Висновки узагальнюють основні результати роботи, формують практичні рекомендації та окреслюють перспективи подальших досліджень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕКСАПОДНИХ РОБОТІВ

1.1 Конструктивні особливості гексаподних роботів

Гексаходи є мобільними роботизованими системами з шістьма незалежно керованими ногами, які забезпечують як стабільність у русі, так і високу адаптивність до умов навколишнього середовища. Головною перевагою гексаходів є їхня здатність залишатися врівноваженими та стабільними, втрачаючи підтримку однієї або кількох ніг. Це робить їх ефективними для пересування по складним рельєфам, піщаних або кам'янистих поверхнях та схилах.

Сучасні системи гексаходів використовуються для досліджень, промисловості та освітніх застосувань. Вони дозволяють вивчати принципи біонічної ходьби, імітувати рух комах та тварин, а також тестувати алгоритми керування в складних середовищах.

Загальна структура гексапода

Типова конструкція гексаподного робота складається з таких основних підсистем:

- *механічна підсистема (корпус і кінцівки);*
- *система приводів;*
- *сенсорна система;*
- *система керування;*
- *система живлення.*

Кожна з них виконує окремі функції, але всі тісно взаємопов'язані для забезпечення узгодженої роботи механізму.

1.1.1 Корпус робота

Корпус є основною частиною гексапода, що несе на собі всі частини. До нього кріпляться ноги, електронні компоненти, датчики та елементи живлення. Основні вимоги до корпусу — *жорсткість, легкість і симетричність*.

Матеріали корпусу вибираються залежно від призначення робота:

- пластик або полімери — для навчальних або лабораторних гексаподів;
- алюміній або карбон — для промислових і дослідницьких зразків, де потрібна висока міцність при мінімальній масі.

У деяких моделях корпус має модульну конструкцію, що дозволяє легко змінювати розташування компонентів або оновлювати електроніку. Симетрія корпусу сприяє рівномірному розподілу навантаження на ноги та покращує стабільність.

1.1.2 Конструкція ніг

Кожна нога гексапода зазвичай складається з трьох сегментів:

- *Coxa* (стегновий сегмент, ближній до корпусу),
- *Femur* (середній сегмент),
- *Tibia* (дистальний сегмент, який контактує з поверхнею).

Кожна нога має два ступені свободи (2 DOF), що забезпечує рух уперед-назад, підйом-опускання та згинання-розгинання. Така кінематична структура дозволяє точно позиціонувати кінцівку у просторі, що є важливим для складних траєкторій.

Розташування ніг симетричне відносно поздовжньої осі корпусу. Це дає змогу підтримувати три точки опори у будь-який момент руху, що забезпечує статичну стабільність навіть при русі по нерівній поверхні.

1.1.3 Система приводів

Для реалізації руху ніг у гексаподах використовуються сервоприводи постійного струму або крокові двигуни. Найчастіше застосовується 18 приводів (по три на кожну ногу). Сервоприводи забезпечують необхідну точність позиціонування та швидкодію.

Розміщення приводів залежить від конструкції: у більшості випадків вони встановлюються у сегменті *соха*, щоб зменшити інерційні навантаження на дистальні частини ніг. Рух передається через важелі або шестерні.

У складніших моделях використовуються редуктори та сенсори зворотного зв'язку, які дозволяють вимірювати кут обертання, швидкість і навантаження на привід.

1.1.4 Сенсорна система

Для забезпечення автономного функціонування гексапод обладнується різноманітними сенсорами:

- *інерціальні вимірювальні модулі (IMU)* — для контролю нахилу й орієнтації;
- *ультразвукові або інфрачервоні датчики* — для виявлення перешкод;
- *датчики навантаження в опорних точках* — для контролю сили натиску ноги на поверхню;
- *камери або лідари* — у складніших системах для побудови карти середовища.

Отримані дані використовуються системою керування для підтримки рівноваги, адаптації траєкторії руху та вибору оптимальної стратегії ходьби.

1.1.5 Система керування

Система керування є центральною частиною гексапода. Вона координує роботу приводів, обробляє сигнали сенсорів та реалізує алгоритми руху.

У більшості сучасних моделей застосовуються мікроконтролери STM32, Arduino, Raspberry Pi, Jetson Nano тощо. Для більш складних систем використовується операційна система ROS, яка забезпечує модульність, розподілену обробку даних і взаємодію з 3D-середовищами моделювання (Gazebo, Webots).[22]

Алгоритми керування включають:

- генерацію траєкторій ніг;
- стабілізацію положення корпусу;
- оптимізацію швидкості та енергоефективності руху.

1.1.6 Система живлення

Система живлення забезпечує подачу електроенергії на всі модулі робота. Найчастіше використовуються літій-полімерні (Li-Po) акумулятори, що мають високу ємність при відносно невеликій масі.

Для ефективної роботи системи живлення застосовуються модулі стабілізації напруги та контролю заряду, які запобігають перевантаженню сервоприводів.

1.1.7 Основні конструктивні властивості гексаподів

До ключових конструктивних властивостей гексаподних роботів належать:

- *Симетрія* — забезпечує стабільність і рівновагу під час руху;

- *Модульність* — дає змогу легко проводити технічне обслуговування або модернізацію;
- *Висока прохідність* — робот здатний пересуватися по складних рельєфах;
- *Гнучкість кінематичної схеми* — можливість змінювати типи ходи (tripod, wave, ripple);
- *Адаптивність* — здатність до самостійного вирівнювання корпусу на нерівній поверхні.

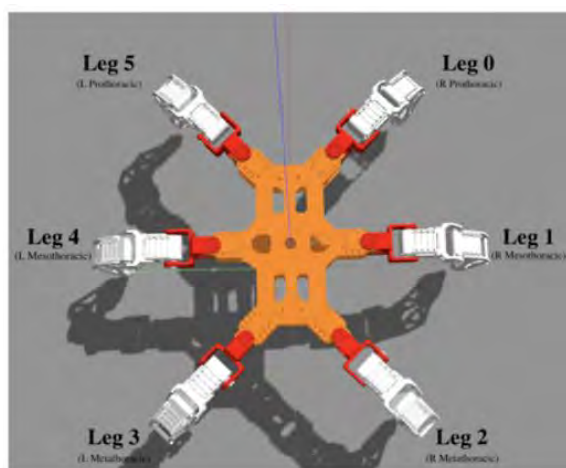
1.1.8 Приклади сучасних конструкцій

На сьогодні існує низка гексаподних платформ, які відрізняються за призначенням і складністю:

- *PhantomX Hexapod (Trossen Robotics)* — навчальна платформа на базі Arduino (Рис. 1.1.8.1);
- *Vincross Hexa* — комерційний гексапод із вбудованим ШІ, здатний до самонавчання (Рис. 1.1.8.2);
- *Boston Dynamics RHex* — дослідницький шестиногий робот для складних природних умов (Рис. 1.1.8.1).

Ці приклади демонструють широкий спектр застосування гексаподів — від освітніх і наукових цілей до промислових і військових застосувань.

Таким чином, конструктивні властивості гексаподних роботів включають: кількість і розташування ніг; ступені свободи кінцівок; геометрію та розміри ніг і корпусу; приводи і передача руху; матеріали й модульність; системи опори і стабільності; а також інтеграцію з сенсорною системою. Ці характеристики визначають основні можливості платформи: її здатність пересуватись по нерівній поверхні, швидко рухатись, витримувати навантаження та адаптуватись до зовнішніх умов.



(a)



(b)

Рис. 1.1.8.1 PhantomX Нехарод (Trossen Robotics) – а) Перерахування ніг гексаподів; б) фізична реалізація гексаподного робота [1]



Рис. 1.1.8.2 Vincross Неха [2]



Рис. 1.1.8.3 Boston Dynamics RHex [3]

1.2 Алгоритми руху багатонігих роботів

Рух багатонігих роботів, зокрема шестиногих (гексаподних) платформ, забезпечується за допомогою різноманітних схем координації рухів ніг, які зазвичай називаються «ходами» (gaits). Правильний вибір та реалізація алгоритму ходи впливають на швидкість пересування, стабільність, енергоефективність та прохідність робота. У даному підрозділі розглянуто основні типи ходи — Tripod gait, Ripple gait і Wave gait — їхні особливості, переваги, недоліки, критерії вибору, а також алгоритми переходу між ними.

1.2.1 Основи фазового циклу кінцівки

Кожна нога робота в ході пересування проходить дві основні фази:

- *Фаза опори (stance phase)* — коли нога перебуває в контакті із поверхнею і підтримує тіло робота;
- *Фаза переносу (swing phase)* — коли нога при підйомі чи переміщенні не контактує з поверхнею.[4]

Періодично змінюючи положення ніг, робот створює черговість опорних точок, що забезпечує підтримку рівноваги та рух уперед.

1.2.2 Tripod gait

Tripod gait є найшвидшим і одним із найпростіших у реалізації типів ходи гексаподного робота. У цьому режимі всі шість ніг поділяються на дві триопорні групи, які працюють у протифазі (180°). Типовим прикладом є групування: (ліва передня, права середня, ліва задня) та (права передня, ліва середня, права задня).

Tripod gait — це стратегія, за якої одночасно три ноги (зазвичай: передня й задня лівої сторони + середня правої, або навпаки) піднімаються і здійснюють переніс, тоді як інші три ноги залишаються в опорі. Цей режим дозволяє досягати відносно високої швидкості пересування.

Tripod gait широко використовується у симуляційних середовищах, зокрема у Webots, для дослідження динамічної рівноваги, оптимізації траєкторій руху та навчання алгоритмів керування з використанням CPG або еволюційних методів. [4]

Переваги: висока швидкість, проста черговість руху.
Недоліки: напрями меншою мірою підходить для складного рельєфу — підтримка опори меншою ніж у більш «повільних» ходах, підвищені вимоги до динамічної стабілізації, обмежена адаптація до нерівного рельєфу, .[9]

1.2.3 Ripple gait

Ripple gait — проміжний за швидкістю режим між tripod та wave. У цьому режимі часто дві ноги переміщуються з певним фазовим зсувом, інші чотири залишаються в опорі. Наприклад, із затримкою 180° між рухами ніг з протилежних боків.

Ripple gait забезпечує плавніший рух порівняно з tripod gait та вищу стабільність, що робить його доцільним для використання на помірно нерівних поверхнях. Цей тип ходи часто застосовується як перехідний режим між повільними та швидкими типами руху.

У середовищі Webots ripple gait зручний для дослідження компромісу між швидкістю та стійкістю, а також для аналізу енергоспоживання гексаподного робота при різних параметрах фазового зсуву.[4]

Переваги: компроміс між швидкістю і стабільністю, плавність руху, підвищена стабільність у порівняння з tripod gait.
Недоліки: складніша реалізація алгоритму, може споживати більше енергії, ніж найоптимальніші режими, підвищені вимоги до синхронізації рухів.[8]

1.2.4 Wave gait

Wave gait — найбільш повільний режим серед трьох, зазвичай використовується на нерівних поверхнях або коли пріоритетом є стабільність.

Wave gait (хвильова або метахрональна хода) характеризується послідовним переміщенням ніг по одній. У кожний момент часу лише одна нога знаходиться у фазі перенесення, тоді як решта п'ять формують стійку опорну конфігурацію. Фазовий зсув між ногами зазвичай становить близько 60° .

Цей тип ходи забезпечує максимальну статичну стійкість, оскільки центр мас робота постійно знаходиться в межах опорного багатокутника. Wave gait добре підходить для повільного руху по складній місцевості та для задач, де критичною є стабільність.

У цій схемі по черзі піднімається тільки по одній нозі, а інші п'ять перебувають в опорі, що створює «хвилеподібну» послідовність. [4]

У середовищі Webots wave gait використовується для тестування алгоритмів балансування, адаптації до перешкод та аналізу роботи сенсорних систем.

Переваги: максимальна стабільність, низький ризик втрати опори, відмінна адаптація до нерівних поверхонь.

Недоліки: низька швидкість, менша ефективність при задачах, де важлива швидкість або енергоефективність. [7]

1.2.5 Tetrapod gait

Tetrapod gait — середньошвидкісний режим між wave і tripod.

У цьому режимі ноги формують три синхронізовані пари (наприклад (LH, RM), (LM, RF), (LF, RH)), і ці пари послідовно виконують фазові цикли з інтервалом $\approx 2\pi/3$ — отже одночасно в перенесенні зазвичай рухаються дві ноги, а

інші чотири — в опорі. Tetrapod часто розглядають як проміжний варіант: швидший за wave (метахрональний), але повільніший за tripod.[4]

Переваги: компроміс між швидкістю і стійкістю — забезпечує вищу швидкість ніж wave при збереженні більшої статичної стійкості, ніж у tripod при деяких умовах; часто використовується як проміжна ходова стратегія при переходах між режимами.

Недоліки: складніший синхронізований ритм (треба координувати три пари), може вимагати точнішого керування фазами й балансування (тому складність керування вища, ніж у простих wave-реалізацій), іноді менш енергоефективний ніж оптимальні для даного робота tripod і wave режими залежно від швидкості й навантаження.

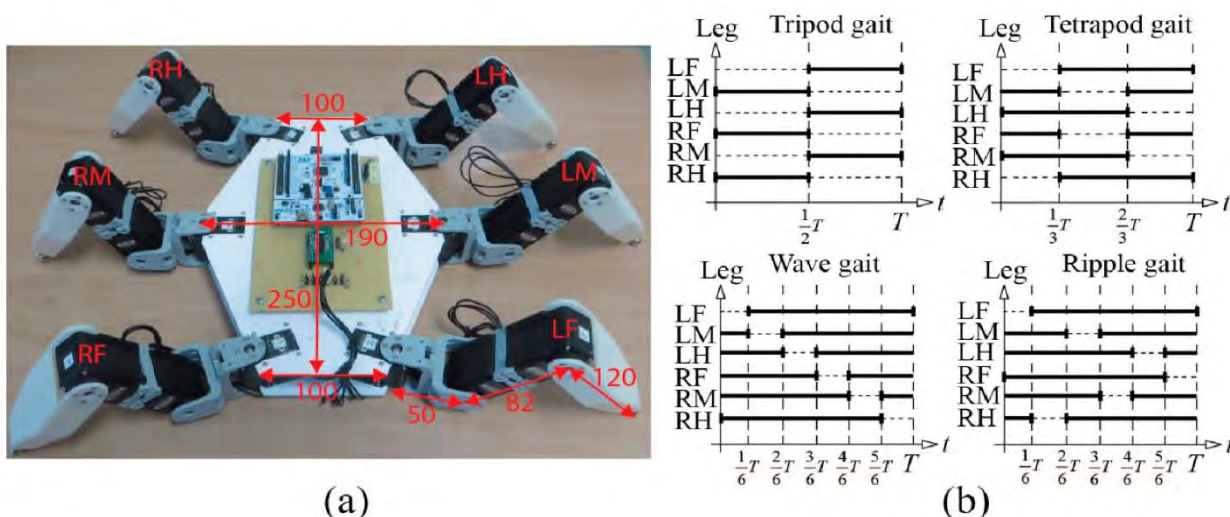
1.2.6 Порівняльний аналіз режимів

Згідно з дослідженнями, вибір ходи залежить від швидкості руху, типу поверхні і мети задачі. Наприклад, у роботі з дослідженням енерговитрат показано, що wave gait є енергоефективним на низьких швидкостях, тоді як tripod gait — оптимальний для більшої швидкості. [5]

Інший аналіз показує, що stability margin (показник статичної стабільності) є вищим у wave та ripple, ніж у tripod при однакових умовах. [6]

Таблиця 1.2.5 Порівняльна характеристика основних типів ходи
гексаподних роботів

Тип ходи	Кількість ніг, що рухаються одночасно	Швидкість руху	Стійкість	Складність керування	Типові умови застосування
Tripod gait	3	Висока	Середня	Низька	Рівна поверхня, лабораторні умови
Ripple gait	1–2	Середня	Висока	Середня	Помірно нерівна поверхня
Wave gait	1	Низька	Дуже висока	Висока	Складний рельєф, сипке середовище
Tetrapod gait	2	Середня	Висока	Середня-висока	Нерівні та складні поверхні



На рис. 1.2.5 зображено модель робота-гексапода НехаV4 (а) та часові діаграми ходи, що використовується в експериментах (чорні лінії позначають фазу опори ноги, пунктирний проміжок — фазу перенесення) (б). Абревіатури ніг: LF — ліва передня; LM — ліва середня; LH — ліва задня; RF — права передня; RM — права середня; RH — права задня; T — період ходи. Всі розміри вказані в міліметрах. [5]

1.2.7 Алгоритми переходу між ходами

У сучасних системах управління передбачено можливість динамічної зміни ходи залежно від умов. Наприклад, при зменшенні швидкості або збільшенні нахилу поверхні робот може автоматично перейти з tripod у ripple або wave gait [1,5].

Основні критерії переходу:

- швидкість руху (наприклад, якщо швидкість < 0.046 м/с $\rightarrow$ wave gait);
- рівень навантаження;
- стабільність (margin of stability);
- енергоспоживання.

Такі алгоритми дозволяють адаптивно балансувати між швидкістю, стабільністю та енергоефективністю.

1.2.8 Практичні рекомендації для гексаподних роботів

- На рівній поверхні та при високій швидкості — використовувати tripod gait.
- На поверхнях з нерівностями, схилами — звернутися до wave gait або ripple gait.
- У проєктах, де пріоритетом є енергоефективність — застосовувати алгоритми переходу та оптимізації gait-параметрів.
- Враховувати, що складність алгоритму та вимоги до контролера зростають від wave → ripple → tripod.

1.2.9 Висновки

Алгоритми ходи — одна з ключових складових мобільності гексаподних роботів. Правильне їх вибирання і реалізація дозволяють досягти балансу між швидкістю, стабільністю та енергоефективністю. У контексті даної роботи важливо досліджувати саме ці ходи, порівнювати їх результати у віртуальних середовищах і підбирати оптимальний режим для конкретних сценаріїв моделювання.

1.3 Методи оптимізації траєкторій (генетичні алгоритми, евристичні методи, адаптивні підходи)

Вступ. Постановка задачі оптимізації траєкторії для гексапода

Оптимізація траєкторій для багатонігих роботів — це пошук набору параметрів руху (параметрів траєкторій ніг, фази gait, сили контакту, часових характеристик), які мінімізують чи максимізують задану ціль (приблизно: енерговитрати, коливання корпусу, час проходження траси, ризик втрати стійкості) з урахуванням фізичних і кінематичних обмежень (межі приводів, контактні умови, опір ґрунту тощо). Через високу нелінійність задачі (контакти «ніж-ґрунт», дискретні переходи між фазами опори та переносу) традиційні градієнтні методи іноді непридатні, тому широко застосовують як евристичні

(еволюційні) алгоритми, так і методи транскрипції/транспозицій траєкторій, а також адаптивні/біонічні підходи. [10]

1.3.1 Генетичні алгоритми (GA) та еволюційні методи

Опис методу:

Генетичні алгоритми - це клас еволюційних обчислювальних методів, що імітують біологічну еволюцію: популяція рішень (особин) кодує параметри ходи (наприклад, амплітуди й фази траєкторій для кожної ноги, крокову довжину, висоту підйому, час циклу). Через оператори відбору, кросовера і мутації створюються нові покоління, які оцінюються за функцією пристосованості (fitness) — ця функція може враховувати швидкість пересування, енерговитрати, стабільність (наприклад, відстань центру мас до межі полігону опори) і безпечність траєкторій (без перевищень крутних моментів двигунів). GA добре працюють для глобального пошуку в сильно багатовершинних і дискретно-неперервних просторах, що робить їх популярними для оптимізації gait-параметрів гексаподів. [11] [23]

Переваги GA для гексаподів:

- Робочі в нелінійних, шумистих просторах з обмеженнями й дискретними подіями (контакти).
- Не потребують похідних функції цілі — корисно коли симулятор не дає аналітичних градієнтів.
- Можуть одночасно оптимізувати численні цілі (через multi-objective GA) [12]

Недоліки та обмеження:

- Висока обчислювальна вартість (потреба великої кількості симуляцій), особливо якщо симуляція фізично реалістична.

- Можуть «застрягати» на локальних оптимумах при поганій індивідуальній репрезентації або некоректних операторах мутації/кросовера.
- Потребують ретельного підбору гіперпараметрів (розмір популяції, ймовірність мутації).

У літературі — численні роботи, що застосовують GA для оптимізації параметрів CPG (central pattern generator), gait-параметрів та траєкторій ніг гексаподів; GA також використовувалися для автоматичної адаптації гейту при пошкодженні ноги[12]

1.3.2 Інші евристичні та мета-евристичні методи (PSO, DE, Bat, Ant Colony)

Окрім GA, у задачах оптимізації траєкторій застосовують інші метаевристики: PSO, DE, Bat Algorithm, ACO та гібридні методи. PSO часто вибирають за швидку збіжність у невеликому розмірі популяції; DE — за хорошу здатність до глобального пошуку з відносно простим налаштуванням; інші біо-натхненні алгоритми використовують для специфічних класів задач. Метаевристики часто дають порівнянні або кращі результати у випадках з неоднорідними обмеженнями та багатопараметричними просторами.[5]

Пара комбінований підхід: популярною практикою є гібридизація — наприклад, метаевристика знаходить «хорошу» початкову точку, а далі градієнтна локальна оптимізація (якщо доступні градієнти) уточнює траєкторію. Це поєднує глобальний пошук з локальною швидкою оптимізацією (mixed methods). [10]

1.3.3 Класичні методи транскрипції/транспозиції

Методи траєкторій — це формалізація задачі як оптимальної керованої динамічної системи: знайти контрольні сигнали $u(t)$ та траєкторії стану $x(t)$, що мінімізують цільовий функціонал при задоволенні динаміки й обмежень. Часто застосовують direct collocation або direct transcription: дискретизують траєкторію в часі, перетворюючи задачу на великий NLP, який вирішується

чисельно. Методи гарантують динамічно здійсненні траєкторії і дають точні результати у високодетермінованих сценаріях. [10]

Переваги: точність, гарантії динамічної реалізованості, можливість врахувати контакти і обмеження приводів.

Недоліки: потребують похідних (або чисельних апроксимацій), великі розміри NLP, чутливість до початкового наближення (часто потрібні добра початкова траєкторія). Для задач з багатьма дискретними подіями (контакти, зміни фаз) прямі методи складніші, але сучасні підходи дозволяють і це враховувати. [13]

1.3.4 Навчання з підкріпленням і самообучувані підходи

Reinforcement Learning — сучасний підхід, що навчає політику без потреби жорстко визначених моделей: агент (робот) експериментує у симуляторі, отримуючи винагороду за бажані властивості руху (стабільність, швидкість, енергія). Популярні: PPO, SAC, DDPG. RL ефективний для складних, стохастичних середовищ і для завдань, де моделі контакту важко формалізувати.

GA може використовуватись для знаходження структури або гіперпараметрів, а RL — для навчання політики в середовищі. RL-підходи продемонстрували високу продуктивність у симуляціях і реальних прототипах, але потребують обережності з перенесенням з симулятора в реальний світ (sim-to-real).

1.3.5 Біонічні й адаптивні підходи: центральні генератори ритму (CPG) та адаптивний контроль

CPG — нейроноподібні осцилятори, що генерують ритмічні сигнали для координованих рухів ніг. Параметри CPG (частота, фаза, амплітуда) можна оптимізувати (наприклад, GA або градієнтними методами) або робити адаптивними — вони дозволяють гнучко змінювати gait у відповідь на сенсорну

інформацію (IMU, датчики контакту). CPG-підходи показують ефективну адаптацію між швидкістю та стабільністю, а також просту реалізацію біонічної міжлгемової координації. [14]

Адаптивний (model-based та model-free) контроль. Адаптивні контролери (наприклад, adaptive impedance control, adaptive force control) змінюють параметри керування в режимі реального часу під впливом вимірних відхилень від моделі або зовнішніх впливів (нерівність місцевості, зміна тертя). У роботі з динамічною ходою адаптивні підходи дозволяють корегувати сили контакту та траєкторії ніг під навантаженням[10]

1.3.6 Гібридні та багатоцільові підходи

У практиці часто поєднують методи: наприклад, використовують GA/PSO для глобального пошуку параметрів траєкторій, direct collocation або локальний NLP для згладжування й гарантування динамічної здійсненності, а CPG — для реального часу адаптації в полі з сенсорним фідбеком. Багатоцільова оптимізація (multi-objective) дозволяє одночасно мінімізувати енергію й максимізувати стабільність (Pareto-front). Такий інтегрований підхід часто є найбільш практичним — дає компроміс між обчислювальною вартістю і якістю руху. [10]

1.3.7 Критерії вибору методу

1. Якщо метою є пошук глобально хороших параметрів gait у симуляторі (без гарантованої гладкості) - застосовувати GA або PSO (добре підходить для початку експериментів). [11]
2. Якщо потрібна динамічна здійсненність та урахування контактів - застосовувати direct collocation / trajectory optimization або їх гібриди з евристиками. [10]
3. Якщо важлива адаптація в реальному часі (реальні нерівності, пошкодження) - CPG + адаптивний контроль або RL-політика з сенсорним фідбеком. [14]

1.3.8 Висновки

Методи оптимізації траєкторій для гексаподних роботів охоплюють широкий спектр — від еволюційних (GA, PSO) та інших метаевристик до класичних direct trajectory optimization та сучасних підходів на основі RL і CPG з адаптивним контролем. Для практичних досліджень корисно застосовувати гібридні стратегії, щоб поєднати переваги глобального пошуку з гарантією динамічної робастності та реального часу адаптації. [5]

Таблиця 1.3.8 Порівняння основних методів методів оптимізації траєкторії

Метод	Тип	Переваги	Недоліки	Тип задачі	Приклад використання
GA	Еволюційний	Простота, не потребує похідних, глобальний пошук	Повільний, випадковість результатів	Оптимізація gait, параметрів CPG	Гексаподи, квадроподи
PSO	Евристичний	Швидка збіжність	Легко застряє в локальному мінімумі	Безшумні симуляції	Оптимізація траєкторій маніпуляторів
Direct Collocation	Аналітичний	Гарантія динамічної реалізованості	Складна реалізація, похідні	Детальна динамічна модель	Синтез траєкторій для біпедів
CPG	Біонічний/адаптивний	Реальна адаптація, стійкість	Не глобальний оптимум	Адаптація в реальному часі	Біомімікрія у гексаподах
RL	Навчальний	Самонавчання, адаптивність	Високі ресурси	Невизначене середовище	Глибоке навчання руху роботів

1.4 Огляд 3D-Середовищ Моделювання Роботів

Для дослідження руху багатоногого робота—зокрема гексапода—важливим етапом є створення віртуальної моделі та середовища, у якому можна безпечно і ефективно тестувати алгоритми управління, оптимізації траєкторій і конструктивні удосконалення. Використання середовища 3D-моделювання дозволяє зменшити витрати на фізичний прототип, прискорити ітерації, провести

великий спектр сценаріїв (рівна/різна поверхня, нахили, нерівності). Тому вибір платформи симуляції є ключовою частиною методології дослідження.

1.4.1 Роль та класифікація середовищ моделювання

Сучасна розробка робототехнічних систем неможлива без застосування 3D-симуляторів. Вони дозволяють:

1. Верифікувати конструкцію до створення фізичного прототипу (перевірка кінематики, робочої зони).
2. Тестувати та оптимізувати алгоритми керування (гейти, адаптивні підходи) у безпечному та відтворюваному віртуальному середовищі.
3. Збирати великі масиви даних для методів машинного навчання, зокрема Навчання з Підкріпленням (RL).

Симулятори для робототехніки поділяються на:

- *Динамічні симулятори:* Зосереджені на реалістичній фізиці (зіткнення, тертя, інерція), наприклад, Gazebo, Webots, CoppeliaSim.
- *Математичні симулятори:* Орієнтовані на моделювання систем і контролю (блокові схеми), наприклад, Matlab Simscape.

1.4.2 Аналіз ключових 3D-середовищ

Для цілей моделювання та дослідження гексаподного робота, що вимагає точного контролю кінематики та реалістичної симуляції контакту з поверхнею, розглянемо найбільш популярні та функціональні платформи.

Webots — це 3D-симулятор робототехніки, розроблений компанією Cyberbotics Ltd., який підтримує різні робототехнічні моделі (наземні, підводні, UAV), дозволяє програмувати на C, C++, Python, Java, MATLAB.[19]

Gazebo — відкритий симулятор, тісно інтегрований з ROS (Robot Operating System), із підтримкою декількох фізичних движків (ODE, Bullet, Simbody) і великою спільнотою. [20]

CoppeliaSim (раніше V-REP) — дуже гнучкий симулятор із підтримкою кількох фізичних рухових двигунів, хорошим API (Lua, Python, C/C++, MATLAB) і можливістю складних сценаріїв.[21]

Unity — ігровий движок, який все частіше використовується для робототехнічних симуляцій, особливо коли важлива графіка, взаємодія з людиною або VR/AR. [21]

MATLAB Simscape (та Simscape Multibody) — середовище моделювання механічних систем, яке дозволяє створити детальну кінематичну/динамічну модель гексапода, проаналізувати рух, механіку та контроль.[18]

Таблиця 1.4.2 Порівняльна таблиця ключових 3D-середовищ

Середовище	Фізичний рушій	Інтеграція з ROS	Основна перевага	Недолік для гексапода
Gazebo	ODE, Bullet, Simbody (за замовчуванням: ODE)	Пряма та нативна	Найкраща точність фізики та найбільша спільнота/підтримка для складних динамічних систем.	Високий поріг входу, залежність від Linux/ROS, складність налаштування.
Webots	ODE (Open Dynamics Engine)	Добра (протокол ROS)	Вбудовані бібліотеки для робототехніки, простота програмування (Python, C++), гарна візуалізація.	Дещо менша гнучкість у налаштуванні фізики порівняно з Gazebo.
CoppeliaSim	Bullet, ODE, Vortex, Newton	Добра (API)	Універсальність, інверсна кінематика (ІК) вбудована, потужний графічний інтерфейс.	Менша спільнота, ліцензійні обмеження для комерційного використання.
Matlab Simscape	Власний (на основі блоків)	Обмежена	Точне математичне моделювання приводу, електроніки та механіки. Ідеально для розробки контролера.	Не є повноцінним 3D-симулятором для тестування на складних ґрунтах чи зіткненнях.

Unity3D	NVIDIA PhysX	Через плагіни (ROS)	Найкраща графічна якість, ідеально для RL (Unity ML-Agents), масштабованість.	Основна увага на графіці, налаштування фізики для наукових цілей вимагає додаткових зусиль.
---------	--------------	---------------------	---	---

1.4.3 Додатковий огляд спеціалізованих середовищ

Окрім основних динамічних симуляторів (Webots, Gazebo, CoppeliaSim), які є основою для інженерної верифікації та розробки контролерів, наукова спільнота активно використовує вузькоспеціалізовані платформи, орієнтовані на високу швидкість симуляції, навчання з підкріпленням (RL) та графічне прискорення.

❖ *MuJoCo (Multi-Joint dynamics with Contact)*

- *Призначення:* MuJoCo є високопродуктивним фізичним рушієм, спеціально розробленим для керування, оптимізації та машинного навчання в робототехніці.

- *Швидкість:* Забезпечує надзвичайно швидку симуляцію, що є критичним для алгоритмів RL, де потрібна мільйонна кількість ітерацій.

- *Контактна Динаміка:* MuJoCo використовує метод пружинно-демпферних систем (spring-damper system) для моделювання контактної динаміки, що часто призводить до більш стабільної та менш "шумної" симуляції, ніж традиційні солвери, засновані на обмеженнях (як у ODE/Gazebo).

Є переважно рушієм (engine) з Python API, а не повноцінним інтегрованим 3D-середовищем з графічним інтерфейсом та вбудованими інструментами для моделювання середовища, як Webots чи Gazebo. [17]

❖ *NVIDIA Isaac Sim (на базі Omniverse)*

- *Призначення:* Сучасна GPU-прискорена платформа симуляції, орієнтована на концепцію Sim-to-Real та масштабоване навчання з підкріпленням.

- *GPU-Прискорення*: Використовує можливості графічних процесорів NVIDIA для прискорення фізики (PhysX 5) та рендерингу.
- *Фотореалізм*: Надає високоякісний фотореалістичний рендеринг, що є важливим для тестування алгоритмів комп'ютерного зору (Perception).
- *Massive Parallelism*: Можливість запускати тисячі симуляцій паралельно, що незамінно для збору даних RL.

Вимагає потужного апаратного забезпечення (GPU NVIDIA) та має високий поріг входу. Незважаючи на технологічну перевагу, його використання може бути обмежене доступністю обладнання для типового університетського дослідження.[16]

❖ *PyBullet*

- *Призначення*: Легка, безкоштовна, відкрита бібліотека, що базується на фізичному рушії Bullet. Використовується переважно для RL та швидкого прототипування.
 - *Легкість та Швидкість*: Дуже простий Python API, що дозволяє швидко налаштовувати моделі та запускати симуляції без важкого графічного інтерфейсу.
 - *Відкритість*: Повна інтеграція з Python-екосистемою та бібліотеками для машинного навчання.

Незважаючи на свою швидкість, PyBullet часто вважається менш точним для складних контактних завдань, ніж MuJoCo або Gazebo, оскільки він орієнтований на швидкість, а не на абсолютну фізичну достовірність у всіх сценаріях.[15]

Ці додаткові платформи є потужними інструментами для вузькоспеціалізованих завдань, зокрема для масштабованого навчання з підкріпленням. Проте для цілей даної роботи — яка передбачає порівняльний інженерний аналіз, візуалізацію та верифікацію конструкції — було обрано

Gazebo та Webots, оскільки вони пропонують найкращий баланс між фізичною достовірністю, зручністю візуалізації та інтеграцією з ROS/програмним керуванням на початкових етапах розробки.

Таблиця 1.4.3 Додатковий огляд спеціалізованих середовищ

Платформа	Спеціалізація (Ключовий Фокус)	Зауваження
Gazebo	Дуже висока (Галузевий Стандарт)	Нативна інтеграція з ROS, висока фізична достовірність, найбільша спільнота/підтримка для складних динамічних систем.
Webots	Висока	Простота програмування (Python, C++), велика бібліотека готових моделей, ідеальний для швидкого прототипування.
CoppeliaSim	Середня / Висока	Висока гнучкість, вбудована інверсна кінематика (ІК), підходить для автоматизації серійних експериментів.
Unity3D	Середня (Зростаюча)	Найкраща графічна якість, орієнтація на RL (Unity ML-Agents), візуалізацію та взаємодію з людиною.
Matlab Simscape	Спеціалізована (Аналітична)	Точне математичне моделювання механіки та контролю (блокові схеми), корисний для попереднього аналізу динаміки приводу.
MuJoCo	Спеціалізована (RL/Керування)	Високопродуктивний фізичний рушій, надзвичайно швидка симуляція, орієнтований на масштабоване машинне навчання.
Isaac Sim (NVIDIA)	Спеціалізована (Sim2Real)	GPU-прискорення, фотореалізм, Massive Parallelism для RL та комп'ютерного зору, вимагає потужного обладнання.
PyBullet	Середня	Легка, безкоштовна, відкрита бібліотека (на основі Bullet), простий Python API, підходить для швидкого прототипування та RL.

1.4.4 Обґрунтування вибору основних середовищ

Для дослідження гексаподного робота, основними критеріями вибору є точність динамічної симуляції (тертя, інерція ніг) та зручність програмування алгоритмів ходьби.

1. *Gazebo*: Використання Gazebo обґрунтовується його статусом галузевого стандарту та реалістичним фізичним рушієм. Це забезпечує високу достовірність результатів симуляції, необхідну для порівняння з потенційним

фізичним прототипом. Його нативна інтеграція з ROS є критичною для розширених алгоритмів (наприклад, навігації, сенсорики).

2. *Webots*: Вибір Webots продиктований його простотою входу, наявністю якісних вбудованих інструментів для кінематики та відносно легким програмуванням контролерів. Це робить його ідеальним для швидкої реалізації базових алгоритмів (Tripod, Wave) та їх початкового тестування.

Для повного та достовірного дослідження необхідно використати порівняльний підхід, застосовуючи Webots для швидкого прототипування та Gazebo для верифікації та більш глибокого динамічного аналізу.

Висновки до розділу 1

У ході проведеного аналізу встановлено, що гексаподні роботи займають особливе місце серед багатонігих систем завдяки їхній високій стійкості, прохідності та здатності пересуватись по нерівних поверхнях. Конструктивно такі роботи мають шість кінцівок з трьома або більшою кількістю ступенів вільності на кожній нозі, що забезпечує широкий діапазон рухів і можливість адаптації до різних типів рельєфу. У сучасних дослідженнях простежується тенденція до використання полегшених матеріалів, модульних конструкцій і вдосконалених приводів (сервоприводи з датчиками зворотного зв'язку, пневмоприводи, електромеханічні системи), що дозволяє підвищити енергоефективність і точність руху.

Детально розглянуто основні алгоритми руху гексаподів — tripod gait, ripple gait та wave gait. Визначено, що вибір типу ходи залежить від умов середовища, вимог до стабільності, швидкості та енергоспоживання. Tripod gait забезпечує максимальну швидкість, але має нижчу стабільність; wave gait навпаки характеризується високою стійкістю, проте повільнішою ходою; ripple gait є компромісним варіантом між двома попередніми. Це обґрунтовує потребу в оптимізації траєкторій руху та синхронізації кінцівок.

Розглянуто сучасні методи оптимізації траєкторій руху. Найбільш ефективними виявились генетичні алгоритми, що дозволяють знаходити оптимальні параметри ходи за критеріями мінімізації енергоспоживання, максимізації швидкості або стабільності. Евристичні методи (наприклад, мурашині алгоритми, рої частинок) та адаптивні підходи (системи, що навчаються на основі даних сенсорів) забезпечують гнучкість у динамічних умовах середовища. Водночас поєднання методів оптимізації з адаптивним керуванням відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем руху.

Проаналізовано основні 3D-середовища моделювання роботів - Webots, Gazebo, CoppeliaSim, Unity та MATLAB Simescape. Усі вони дають змогу створювати віртуальні моделі, проводити симуляції та оцінювати ефективність алгоритмів управління. Встановлено, що Webots забезпечує простоту використання й зручність візуалізації, Gazebo — високу фізичну точність і сумісність із ROS, CoppeliaSim — універсальність і широкий набір інструментів автоматизації експериментів, Unity — реалістичну графіку для візуалізації, а MATLAB Simescape - аналітичні можливості для моделювання механіки. Найдоцільнішим підходом є комбіноване використання двох середовищ (Webots + Gazebo), що забезпечує баланс між простотою розробки та точністю динамічних симуляцій.

Отже, проведений огляд показав, що сучасні дослідження в галузі гексаподної робототехніки спрямовані на:

- вдосконалення конструкції та сенсорики;
- підвищення стабільності й енергоефективності ходи;
- використання інтелектуальних алгоритмів оптимізації;
- перенесення експериментів у віртуальні середовища для швидкої перевірки нових підходів.

Таким чином, подальші дослідження доцільно зосередити на розробці комбінованих алгоритмів керування та оптимізації руху у віртуальних

середовищах Webots і Gazebo з подальшим впровадженням у реальну конструкцію гексапода.

РОЗДІЛ 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ВИБІР СЕРЕДОВИЩ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Обґрунтування вибору Webots і Gazebo для дослідження

Серед багатьох програмних середовищ, призначених для моделювання робототехнічних систем є Webots і Gazebo. І в даному розділі детальніше буде розглянуто саме ці віртуальні середовища для остаточного вибору середовища для аналізу. Ці програми є одними з найпоширеніших та найбільш придатних для дослідження роботів. Їх вибір зумовлений низкою технічних, наукових та практичних критеріїв, які забезпечують точність симуляцій, гнучкість в інтеграції алгоритмів і реалістичність фізичних процесів.

При плануванні симуляційного етапу дослідження гексаподного робота ключовим рішенням є вибір 3D-середовищ, у яких відбуватиметься моделювання руху, тестування алгоритмів ходи та оптимізація траєкторій. Із широкого спектру доступних платформ Webots і Gazebo виглядають як одні з найбільш перспективних варіантів. Нижче наведено детальний аналіз їхніх переваг, обмежень, а також аргументи, які обґрунтовують їхній вибір для теми твоєї роботи.

2.1.1 Технічні переваги вибраних середовищ

Webots

Вибір Webots як базового середовища зумовлений насамперед необхідністю швидкого прототипування та налаштування взаємодії з власними скриптами [24].

На відміну від більш громіздких аналогів, Webots дозволяє зосередитись на логіці керування, а не на конфігурації середовища. Ключовими факторами для реалізації поставлених у роботі задач стали:

- *Нативна підтримка Python:* Оскільки генетичний алгоритм реалізується саме цією мовою, Webots дозволяє інтегрувати код оптимізатора

безпосередньо в контролер робота без використання складних "мостів" чи проміжного ПЗ.

- *Баланс фізики та швидкодії:* Вбудований рушій ODE забезпечує достатню точність для відпрацювання кінематики ніг, але при цьому не перевантажує систему. Це критично важливо, коли необхідно провести сотні ітерацій симуляції для навчання алгоритму за розумний час.
- *Інструменти налагодження:* Можливість візуалізувати вектори сил реакції опори та траєкторію центру мас (CoM) у реальному часі значно спрощує аналіз причин, чому робот втрачає рівновагу при певних видах ходи.
- *Перспектива переходу на залізо:* Наявність готових інтерфейсів для ROS дозволяє розглядати створений контролер як універсальне рішення, яке з мінімальними змінами можна буде перенести на реальний мікроконтролер гексапода [25].

Gazebo

Gazebo розглядається насамперед як полігон для "стрес-тестів" розроблених алгоритмів. Якщо Webots забезпечує швидкість, то Gazebo дає необхідну глибину фізичної взаємодії, особливо коли йдеться про рух складним рельєфом, де критично важлива правильна обробка зіткнень [26].

Серед ключових переваг, що визначили вибір цього середовища для другого етапу відбору для дослідження є:

- *Мультирушійність як засіб верифікації:* Підтримка різних фізичних ядер (ODE, Bullet, DART) дає змогу перевірити, чи є стабільність ходи робота результатом правильного алгоритму, чи лише особливістю розрахунків конкретного рушія. Для гексапода, який постійно має 3-4 точки контакту з поверхнею, це дозволяє уникнути "симуляційних артефактів".
- *Екосистемність ROS2:* Інтеграція з ROS дозволяє побудувати архітектуру керування ідентично до реального робота. Це означає, що топіки, які я публікую команди для віртуальних сервоприводів, будуть тими самими, що й на реальному "залізі".

- Повноцінний сенсорний зворотний зв'язок: Gazebo дозволяє емулювати роботу IMU (інерційного вимірювального модуля) та контактних датчиків на стопах із врахуванням шумів. Це необхідно для розробки замкнених систем керування, які здатні реагувати на спотикання чи нахил корпусу.
- Валідність результатів: Оскільки значна частина досліджень з локомоції (за статистикою понад 60%) проводиться саме в Gazebo, використання цього середовища спрощує порівняння моїх результатів з роботами інших авторів — ми знаходимося в "одній системі координат"[27].

2.1.2 Основні характеристики та історія середовищ

Webots — це 3D симулятор робототехніки з довгою історією, спочатку як комерційний продукт, а з 2018 року — з відкритою ліцензією Apache 2.0 [19]. Він має велику бібліотеку моделей роботів, сенсорів, об'єктів середовища та можливість імпорту CAD/URDF-моделей [19]. У наукових публікаціях Webots описується як середовище для швидкого прототипування мобільних роботів — моделювання, програмування і симуляція [32].

Gazebo — це відкритий симулятор з тривалою історією використання в робототехніці. Він підтримує кілька фізичних рушіїв (ODE, Bullet, DART), що забезпечує гнучкість у виборі моделі фізики. Gazebo активно використовується як симулятор з інтеграцією ROS, і часто згадується як одна з основних платформ у спільноті ROS.

Таким чином, Webots і Gazebo мають міцне підґрунтя як науково обґрунтовані платформи з підтвердженим використанням у дослідженнях.

Порівняльний аналіз середовищ

Для коректного вибору середовища слід порівняти параметри, що впливають на якість дослідження:

Таблиця 2.1 Порівняння можливостей Webots і Gazebo

Критерій	Webots	Gazebo
Реалістичність фізики	Середня	Висока
Зручність інтерфейсу	Висока	Середня

Інтеграція з ROS	Так	Так (краща інтеграція з ROS2)
Швидкість симуляції	Висока	Середня
Підтримка скриптів Python	Так	Так
Підтримка мультисенсорних моделей	Так	Так
Візуалізація	Якісна (простішим способом)	Точна, з фотореалістичними ефектами
Оптимальна сфера застосування	Освітні та дослідницькі проекти	Наукові експерименти і ROS-інтеграція

Аргументація вибору

З огляду на цілі даного дослідження - оптимізацію траєкторії руху гексапода за допомогою генетичних алгоритмів - Webots задовольняє основні вимоги:

- Webots дозволяє швидко створити візуальну модель гексапода та перевірити базову кінематику, динаміку та стабільність;
- Середовище Webots має підтримку ROS, що спрощує взаємодію з алгоритмами управління та сенсорними даними.

Дана платформа чудово підходять для експериментів із гексаподним роботом. Після всіх визначених факторів, сумісності платформ із програмним забезпеченням – подальший аналіз буде проведено саме у Webots.

2.1.3 Переваги середовища Webots у контексті дослідження гексапода

Вибір середовища Webots як основного інструменту для моделювання та оптимізації руху гексапода зумовлений низкою технічних переваг, що безпосередньо впливають на якість та швидкість виконання дослідження.

1. Висока обчислювальна ефективність

Порівняльний аналіз показує, що Webots демонструє оптимізоване споживання ресурсів ЦП та оперативної пам'яті порівняно з аналогами, зокрема Gazebo1. Цей фактор є критичним для виконання завдань оптимізації за допомогою генетичних алгоритмів, які вимагають проведення тисяч ітерацій

симуляції за обмежений час. Зменшення навантаження на систему дозволяє прискорити процес еволюційного відбору параметрів ходи.

2. Інструментарій для швидкого прототипування

Наявність великої вбудованої бібліотеки активів (asset library), що включає готові моделі роботів, сенсорів та об'єктів оточення, значно скорочує час на підготовку експериментальної сцени². Крім того, Webots підтримує прямий імпорт CAD-моделей (наприклад, форматів VRML або OBJ), що спрощує перенесення спроектованої конструкції гексапода в середовище симуляції без втрати геометричної точності.

3. Гнучкість API та інтеграція алгоритмів керування

Середовище підтримує розробку контролерів на поширених мовах програмування: C, C++, Python, MATLAB³. Це дозволяє реалізувати складні математичні моделі, включно з генетичними алгоритмами, безпосередньо всередині симуляції або через зовнішні скрипти. Така архітектура забезпечує зручний доступ до даних про стан робота (позиція сервоприводів, показники сенсорів) у реальному часі.

4. Стабільність фізичного моделювання контактів

Вбудований фізичний рушій (на базі модифікованого ODE) забезпечує стабільну обробку контактних взаємодій у кінематичних ланцюгах⁴. Для багатонігих роботів, де рух базується на постійній зміні точок опори (контакт "нога — поверхня"), коректний розрахунок сил тертя та запобігання проваленню геометрії є ключовими вимогами для достовірності результатів.

5. Перспектива використання машинного навчання

Webots має розвинену екосистему для інтеграції з фреймворками глибокого навчання та навчання з підкріпленням. Зокрема, наявність інструментів на кшталт

Deepbots дозволяє поєднувати симулятор із середовищем OpenAI Gym5. Це відкриває можливості для подальшого розширення дослідження в напрямку адаптивних нейромережових контролерів.

2.3 Сценарії досліджень

Для дослідження ефективності алгоритмів руху гексапода дуде визначено два типові сценарії, що моделюють різні умови пересування: рівна поверхня, нахилена площина. Вибір саме цих сценаріїв обґрунтований необхідністю перевірки стійкості та адаптивності алгоритмів до різних факторів середовища, що є ключовим у розробці автономних мобільних роботів.

1. Рівна поверхня

Цей сценарій є базовим і використовується для перевірки коректності кінематики та динаміки гексапода. [35]

- *Мета:* оцінити стабільність руху, рівномірність кроку, мінімальне енергоспоживання.
- *Параметри середовища:* коефіцієнт тертя поверхні 0.8–1.0; відсутність перешкод; нульовий нахил.
- *Очікувані результати:* плавна траєкторія центру мас, симетрія рухів ніг.

У цьому сценарії зручно калібрувати початкові параметри системи, такі як кут підйому кінцівок, довжина кроку та амплітуда осциляцій.

2. Нахилена поверхня

Даний сценарій дозволяє перевірити здатність гексапода адаптувати ходу до зміни кута нахилу. [36]

- *Мета:* дослідити балансування центру ваги, зміну розподілу навантаження між кінцівками.
- *Параметри середовища:* кут нахилу $10\text{--}30^\circ$, коефіцієнт тертя $0.7\text{--}0.9$.
- *Ключові показники:* максимальний кут нахилу, при якому зберігається стабільність, та зміна траєкторії центру мас.

Таблиця 2.2 Характеристики для вивчення сценаріїв аналізу

	Сценарій	Кут нахилу	Коеф. тертя	Тип поверхні	Мета експерименту
1	Рівна поверхня	0°	0.9	гладка	базова перевірка стабільності
2	Нахил	$10\text{--}30^\circ$	0.8	тверда	тестування балансування

2.4 Критерії оцінки руху

У процесі дослідження руху гексаподного робота у віртуальних середовищах важливо визначити ключові критерії, за якими можна здійснювати порівняльний аналіз ефективності різних алгоритмів ходи, а також оцінювати вплив удосконалень конструкції. Основними параметрами, які характеризують якість руху, є швидкість пересування, стабільність, енергоефективність та плавність руху.

Швидкість пересування

Швидкість є базовим критерієм ефективності руху робота. Вона визначається як відношення пройденої відстані до часу, витраченого на рух:

У Webots цей параметр може обчислюється автоматично за координатами центру мас моделі, що зчитуються під час симуляції.

Стабільність руху

Стабільність визначається здатністю робота підтримувати рівновагу під час пересування, особливо при русі по похилих або пересічених поверхнях. Вона

характеризується показниками нахилу корпусу, відхиленням центру мас від опорного багатокутника та частотою втрат контакту з поверхнею.

Для кількісної оцінки стабільності часто використовується метод полігона стійкості - площа, утворена точками опори ніг, яка повинна містити проєкцію центру мас. Чим більша частина траєкторії руху проходить з центром мас у межах полігона, тим стабільніший рух [34].

Енергоефективність

Енергоефективність визначає, наскільки раціонально робот використовує енергію при пересуванні. У моделюванні цей показник можна розраховувати через споживану потужність приводів кожної ноги або сумарну енергію, витрачену на подолання певної дистанції:

Оптимізація енергоефективності є ключовою для розробки реальних автономних роботів, оскільки вона безпосередньо впливає на час роботи від батареї.

Плавність руху

Плавність оцінює безперервність та узгодженість рухів ніг і корпусу. Вона пов'язана із комфортом пересування, мінімізацією коливань та ривків. Кількісно її можна оцінити через другі похідні положення (прискорення) або за стандартним відхиленням швидкості тіла робота від середнього значення.

Також важливо відзначити, що плавність руху покращує точність сенсорних систем, особливо якщо робот використовується для вимірювань чи перенесення об'єктів [33].

Комплексна оцінка ефективності руху

Для повного аналізу ефективності доцільно застосувати інтегральну метрику, яка об'єднує кілька критеріїв у зважену оцінку.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було сформовано комплексну постановку задачі дослідження руху гексаподного робота та обґрунтовано вибір програмних інструментів і методів для її реалізації. На основі порівняльного аналізу 3D-середовищ моделювання робототехнічних систем було обрано Webots, як платформу, що забезпечить баланс між реалістичною фізикою, гнучкістю сценаріїв та можливостями інтеграції з алгоритмами оптимізації.

Для забезпечення комплексного аналізу поведінки гексапода визначено два основні сценарії випробувань: рух по рівній поверхні, пересування по похилій площині. Це дозволяє оцінити ефективність алгоритмів ходи в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Сформовано систему критеріїв оцінки якості руху, до якої входять швидкість, стабільність, енергоефективність та плавність.

Таким чином, розділ 2 описує основу для вивчення оптимізації траєкторій руху гексапода за допомогою генетичних алгоритмів. Забезпечує цілісну структуру експериментального середовища для моделювання, аналізу і вдосконалення систем управління.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГЕКСАПОДНОГО РОБОТА

У цьому розділі представлено процес побудови параметричної тривимірної моделі гексаподного робота в середовищі SolidWorks. Моделювання включало створення кінематичних сегментів ніг, розроблення центрального корпусу, побудову збірки робота та проведення кінематичного аналізу. Окремо обґрунтовано вибір CAD-системи для виконання проєктування.

3.1 Вибір та обґрунтування CAD-системи

Для моделювання робототехнічних систем неможливо обійтися без використання сучасного програмного забезпечення автоматизованого проектування (CAD). Основними вимогами до CAD-середовища для даного дослідження були:

- підтримка параметричного моделювання;
- можливість побудови складальних одиниць із кінематичними обмеженнями;
- експорт моделей у формати STL, STEP, URDF для подальшої інтеграції у симулятори;
- наявність Motion Study для аналізу руху механізмів;
- поширеність у промислових і наукових застосуваннях;
- наявність навчальних матеріалів і підтримки спільноти.

На етапі аналізу були розглянуті такі CAD-системи: Autodesk Fusion 360, FreeCAD, SolidWorks та Siemens NX.

SolidWorks було обрано як основне середовище проектування з таких причин:

1. Потужна система параметричного моделювання, що дозволяє оперативно змінювати геометричні параметри компонентів роботизованої конструкції.
2. Зручний модуль створення складальних одиниць (Assembly), який підтримує шарнірні з'єднання, механічні обмеження та симуляцію рухів.
3. Motion Analysis, що забезпечує можливість моделювання кінематики й динаміки механізмів.
4. Поширеність у промисловості України та світу, що робить модель придатною для подальшої інтеграції в інженерні процеси.

5. Підтримка експорту у формати STL і STEP, необхідні для 3D-друку й сумісності з симуляторами Gazebo, Webots та ROS.

Таким чином, SolidWorks повністю задовольняє вимоги до моделювання роботизованих механізмів і дозволяє створити високоточну параметричну модель гексаподного робота.

3.2 Моделювання елементів ноги гексапода

Нога гексаподного робота є двоступеневою конструкцією, що включає сегменти *coxa* і *femur*. Кожен сегмент виконує специфічну функцію, а разом вони забезпечують два ступені свободи. Для кожного елемента було створено окремий параметричний компонент у SolidWorks.

3.2.1 Моделювання сегмента Соха

Сегмент *coxa* є базовим елементом, що забезпечує поворот ноги навколо вертикальної осі. Побудова виконувалася у такій послідовності:

1. Створення ескізу профілю на площині *Front Plane*.
2. Використання операції Extrude Boss/Base для отримання твердого тіла.
3. Формування посадочних місць під сервопривід:
 - гніздо потрібної глибини,
 - отвори під гвинти M2–M3,
 - центральний отвір під вісь обертання.
4. Додавання фасок та радіусів необхідні для підвищення міцності й технологічності.

Завдяки параметризації геометричних елементів сегмент може бути масштабований для використання з сервоприводами різних типорозмірів.

3.2.2 Моделювання сегмента Femur

Сегмент *femur* моделювався як видовжений елемент зі змінною шириною.

Етапи проектування:

1. Створення ескізу ноги у вигляді подовженої трапеції.
2. Операція Extrude на товщину 3–6 мм.
3. Формування шарніра для з'єднання з *соха*:
 - концентричний отвір,
 - циліндричні виступи або посадочні елементи.
4. Додаткові отвори для прокладання дротів сервоприводів.

Геометрія сегмента була оптимізована з урахуванням міцності та зменшення загальної маси ноги.

3.2.3 Моделювання сегмента Tibia

Сегмент *tibia* є найдовшим елементом ноги, що відповідає за вертикальні рухи та контакт із поверхнею. Але оскільки даний робот має два ступені свободи, то сегмент *tibia* буде продовженням *femur*.

Отримана модель сегмента має достатню жорсткість та придатна до виготовлення на 3D-принтері.

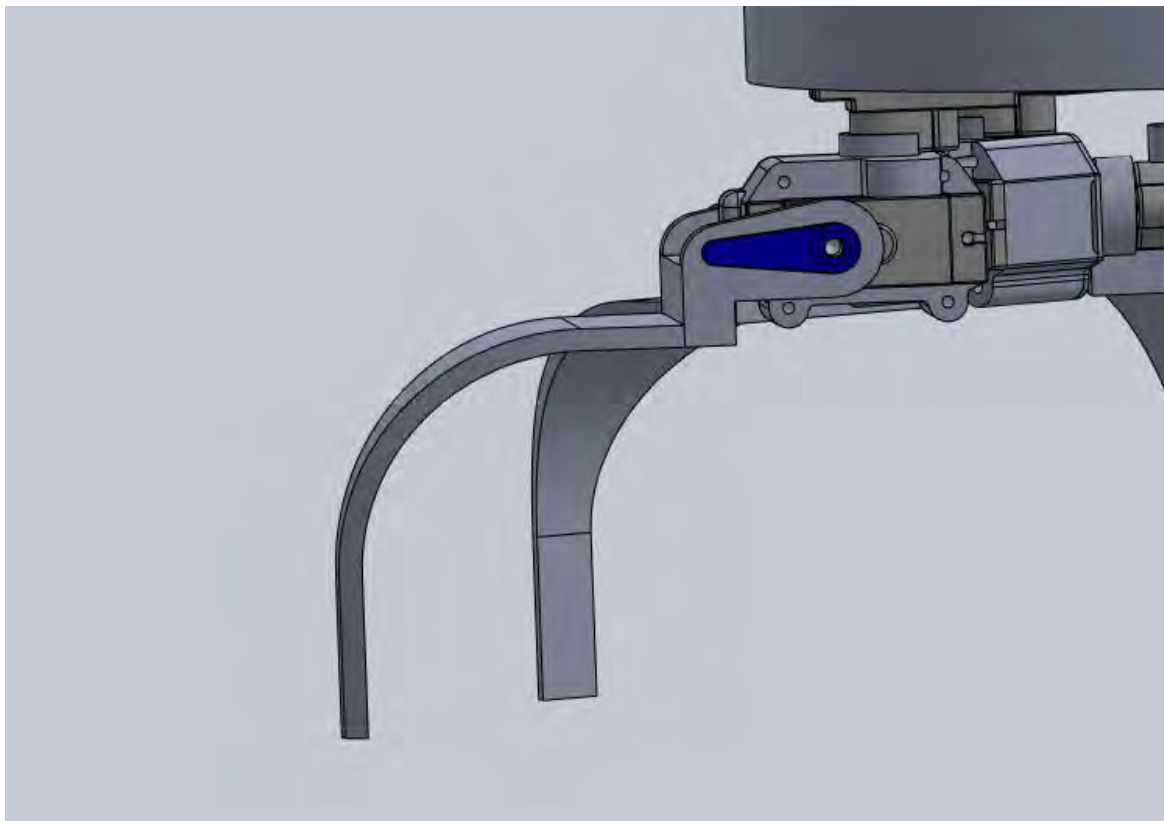


Рисунок 3.1. Вигляд змодельованої ноги

3.3. Моделювання центрального корпусу гексапода

Центральний корпус виконує роль структури, до якої кріпляться всі шість кінематичних модулів. У конструкції передбачено місця для сервоприводів, контролера, акумулятора та елементів електроживлення.

3.3.1 Створення базової геометрії корпусу

Побудова корпусу виконувалася на площині *Top Plane* шляхом створення шестикутного ескізу, який було екструдовано на товщину 3 мм. Основний полігон задає симетрію конструкції.

3.3.2 Монтажні місця під ноги

Для кріплення ніг були спроектовані шість однакових отворів, розташовані на основі коробки, що матиме в собі важливу роль. Вона розрахована для сховку всіх електронних компонентів. Тим самим зробить вигляд самого робота

охійнішим. Лише один елемент створювався вручну, після чого даний елемент копіювався з допомогою операції Circular Pattern.

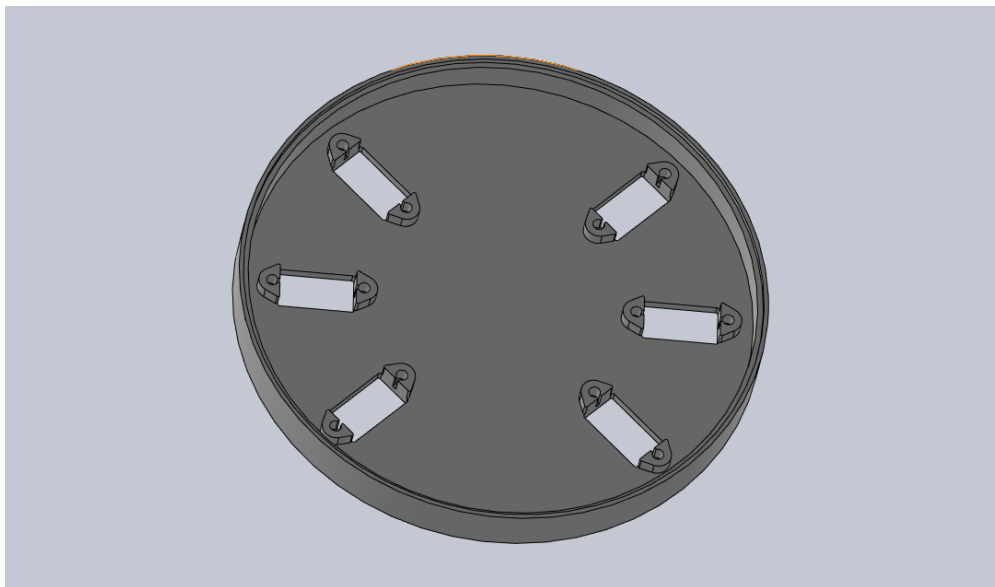


Рисунок 3.2. Змодельований корпус під ноги

У конструкцію включено:

- посадочні гнізда під сервоприводи;
- наскрізні отвори під гвинти М3;
- напрямні виступи для правильної орієнтації *соха*.

Таке рішення забезпечує точність і симетричність розміщення кінематичних вузлів.

3.3 Складання моделі гексапода в SolidWorks

Збирання робота було виконано у Assembly.

Першим компонентом у збірці розміщувався центральний корпус, який фіксувався у просторі (команда Fix). Наступними додавалися одна за одною ноги.

Для кожної ноги були встановлені:

- *Concentric Mate* — для осей шарнірів,

- *Coincident Mate* — для вирівнювання поверхонь,
- *Limit Angle Mate* — для задання реального діапазону руху сервоприводів.

Це забезпечує коректну імітацію кінематики та дозволяє проводити початкові симуляції руху.

У середовищі Motion Study створювалася симуляція роботи ноги та всього робота в цілому. Було змодельовано:

- підйом і опускання ноги,
- згинання сегментів *femur* і *tibia*,
- поворот сегмента *coxa*.

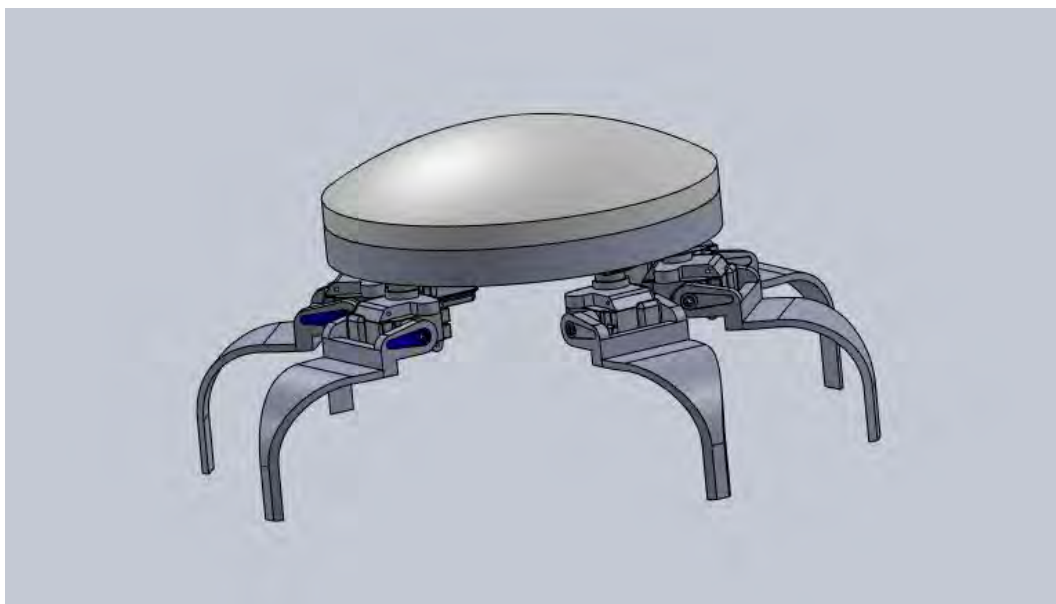


Рисунок 3.3. Отримана модель гексаподного робота

Отримана анімаційна модель підтвердила коректність конструкції та відсутність колізій між сегментами.

3.4 Системні вимоги програмного забезпечення

Врахування системних вимог програмного забезпечення є важливим етапом у процесі комп'ютерного проєктування, моделювання та інженерного аналізу

механічних систем. Системні вимоги визначають мінімальні характеристики апаратної та програмної інфраструктури, необхідні для коректної, стабільної та продуктивної роботи CAD/CAE-систем. Невідповідність програмного забезпечення або апаратних характеристик може призвести до сповільнення розрахунків, помилок у симуляціях або неможливості працювати з великими збірками.

У процесі розроблення та моделювання конструкції гексаподного робота в даній роботі використовувалося програмне забезпечення SolidWorks 2022, яке є професійною CAD/CAE-системою, орієнтованою на тривимірне моделювання, інженерні розрахунки та створення технічної документації. SolidWorks підтримує модульну структуру, що дозволяє розширювати його функціональність за допомогою компонентів Simulation, Motion Study, Visualization, які були задіяні у даному проєкті для проведення аналізу навантажень, кінематичних досліджень та підготовки візуалізацій.

Оскільки SolidWorks є локально інстальованим програмним забезпеченням, його працездатність значною мірою залежить від апаратного забезпечення комп'ютера. Тому системні вимоги включають як мінімально допустимі параметри, так і рекомендовані характеристики, необхідні для роботи із складними збірками, такими як конструкція шестиногого робота.

До мінімальних системних вимог SolidWorks 2022 належать:

- операційна система Windows 10 або Windows 11 (64-bit);
- процесор Intel Core i5 або AMD аналог;
- 8 ГБ оперативної пам'яті;
- відеокарта з підтримкою OpenGL 4.0 та мінімум 2 ГБ відеопам'яті;
- 20 ГБ вільного місця на диску;
- дисплей з роздільною здатністю від 1280×768.

Проте для виконання інженерних симуляцій, аналізу методом скінченних елементів, а також роботи з багатокомпонентними збірками, притаманними конструкції гексапода, рекомендованими є вищі апаратні характеристики. До рекомендованих системних вимог належать:

- сучасний багатоядерний процесор (Intel Core i7/i9 або AMD Ryzen 7/9);
- 16–32 ГБ оперативної пам'яті (для складних FEA — 64 ГБ);
- професійна графічна карта Nvidia Quadro або AMD Radeon Pro з 4–8 ГБ VRAM;
- SSD або NVMe SSD для швидкого завантаження моделей;
- монітор із роздільною здатністю 1920×1080 або вище.

Особливо важливими є вимоги до продуктивності для модулів SolidWorks Simulation та Motion, оскільки вони виконують складні обчислення, пов'язані з аналізом напружень, визначенням деформацій, дослідженням кінематики та динаміки конструкції. Для цих задач потрібно забезпечити достатній запас оперативної пам'яті, багатоядерний процесор і стабільну роботу відеокарти.

Таким чином, врахування системних вимог SolidWorks є ключовим аспектом при виконанні якісного проєктування, моделювання та аналізу гексаподного робота. Вибір оптимальної апаратної конфігурації дозволяє забезпечити стабільну роботу CAD-середовища, точність інженерних розрахунків та високу швидкодію при візуалізації і симуляції.

В даному розділі магістерської роботи було виконано комплексне тривимірне моделювання конструкції гексаподного робота, моделювання окремих елементів, складання збірки та проведення інженерних аналізів. Обґрунтовано вибір CAD-системи, розглянуто її особливості та можливі обмеження. Також визначено системні вимоги програмного забезпечення, необхідного для розробки та моделювання, що гарантує коректну і стабільну роботу проєкту. Застосування

SolidWorks дало змогу реалізувати повний цикл проєктування — від побудови елементів ніг і центрального корпусу до кінематичного аналізу руху.

Висновки до розділу 3

Системні вимоги CAD-систем відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної роботи програмного забезпечення, швидкого рендерингу, точної генерації параметричних моделей та виконання симуляцій.

Врахування зазначених вимог дозволяє забезпечити ефективний процес розробки конструкції гексаподного робота, мінімізувати затримки при обробці складних збірок та підвищити продуктивність інженерного моделювання.

Для створення моделі було обрано середовище моделювання SolidWorks. Причини вибору:

- SolidWorks дозволяє точно налаштувати геометрію кінцівок, коректно задати суглоби, масу, моменти інерції, імпортувати деталі з CAD, застосовувати матеріали та експортувати у формат, сумісний з Webots.
- Webots підтримує імпорт моделей і надає середовище для симуляції кінематики і динаміки. Таким чином, модель, створена в SolidWorks, стає реальним роботом у середовищі Webots із різними електронними компонентами.

Еталонна 3D-модель гексаподного робота є фундаментальним компонентом дослідження, оскільки вона слугує базою для подальшого симулювання ходи, оптимізації траєкторій та тестування алгоритмів у віртуальному середовищі. Якісна модель забезпечує коректну кінематику, правильне розташування центру мас, адекватну передачу сил від приводів ніг до поверхні та мінімізацію артефактів симуляції.

Еталонна модель гексапода була створена із врахуванням конструктивних параметрів, кінематики та динаміки. Використання комбінації SolidWorks і Webots забезпечило баланс між точністю моделі та оперативністю симуляції. У

наступному підрозділі передбачається реалізація алгоритмів руху та оптимізації траєкторій на базі цієї моделі.

У даному розділі було виконано повний цикл параметричного моделювання гексаподного робота. Розроблено тривимірні моделі сегментів ніг та центрального корпусу, що враховують конструктивні, кінематичні та технологічні вимоги. Побудовано збірку робота з урахуванням шарнірних з'єднань і реальних обмежень руху. Проведений кінематичний аналіз підтвердив працездатність конструкції та правильність прийнятих конструкторських рішень.

Одержана CAD-модель слугує основою для подальших етапів роботи: формування URDF-моделі, проведення симуляцій, оптимізації траєкторій руху та виготовлення експериментального прототипу.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГЕКСАПОДА У WEBOTS

4.1 Принципи реалізації алгоритмів керування у середовищі Webots

У цьому підрозділі розглянуто процес програмної реалізації базових алгоритмів ходи гексаподного робота у середовищі Webots. Вибір даного середовища зумовлений його здатністю забезпечувати високоякісну візуалізацію та точну фізичну динаміку, а також підтримкою мов програмування Python, C/C++ та MATLAB для створення сценаріїв управління.

Метою моделювання на даному етапі є перенесення розроблених кінематичних принципів у симуляційне середовище для перевірки працездатності логіки керування. Це дозволяє верифікувати алгоритми ходи (tripod, ripple та wave gait) у наближених до реальності умовах, враховуючи фізичні параметри моделі.

Реалізація алгоритмів у Webots базується на розробці контролера робота (Robot Controller) — окремого програмного модуля, який виконує роль "мозку" системи. Контролер зчитує сенсорні дані (IMU, датчики дотику, датчики

положення) та надсилає керуючі команди до приводів за допомогою функцій API Webots, таких як `robot.getMotor()`, `motor.setPosition()` та `robot.step()`.

Розроблена система управління гексаподом має ієрархічну структуру, що складається з трьох рівнів:

- Рівень 1 (Стратегічний): задає загальний вектор руху робота (напрямок, бажана швидкість).
- Рівень 2 (Тактичний): формує шаблон ходи (генерація патернів *tripod*, *ripple* або *wave gait*).
- Рівень 3 (Виконавчий): виконує розрахунок зворотної кінематики для обчислення конкретних кутів повороту суглобів у кожен момент часу.

4.2 Математична модель циклу ходи та діаграма станів

Для реалізації руху використовується метод фазового керування, де кожна нога робота розглядається як об'єкт із трьома ступенями свободи. Основною метою реалізації алгоритмів є забезпечення плавності та повторюваності циклів руху.

Логіка пересування базується на діаграмі станів (*state diagram*), яка описує переходи системи в часі. Для циклу ходи гексапода виділено дві глобальні фази, які деталізуються у чотири основні стани для кожної ноги:

1. *Swing* (Махова фаза) — нога не має контакту з поверхнею та переноситься у нову позицію. Вона включає:
 - *Підйом (Lift)*: нога відривається від поверхні.
 - *Перенесення (Swing)*: нога рухається повітрям вперед за вектором руху.
2. *Stance* (Опорна фаза) — нога стоїть на поверхні, підтримуючи вагу тіла. Вона включає:
 - *Опускання (Set down)*: нога торкається поверхні.

- *Опора (Support)*: нога штовхає тіло робота вперед (відносно поверхні нога рухається назад).

Цикл постійно повторюється, а переходи між станами синхронізуються для всіх шести ніг. У контролері Webots це реалізовано через систему кінематичних рівнянь, де кожна нога отримує цільові координати відповідно до поточного стану станової машини.

4.3 Опис реалізованих алгоритмів пересування

У межах програмної моделі контролера на мові Python було закладено логіку для трьох основних типів ходи. Вибір конкретного алгоритму залежить від фазового зсуву між кінцівками:

- *Tripod gait (Трипод)*: Класичний алгоритм, де ноги рухаються групами по три (наприклад, передня ліва, середня права, задня ліва рухаються одночасно). Інші три ноги в цей час знаходяться у фазі опори, утворюючи стійкий трикутник. Цей алгоритм забезпечує найвищу швидкість руху, але має менший запас статичної стійкості.
- *Wave gait (Хвильова хода)*: Підняття та перенесення кожної ноги відбувається послідовно (по одній нозі за раз). Це гарантує максимальну стійкість, оскільки 5 ніг завжди знаходяться на землі, проте швидкість пересування є мінімальною.
- *Ripple gait*: Є компромісним варіантом між попередніми двома. Фази ніг зсунуті таким чином, що одночасно у фазі переносу знаходиться не більше двох ніг (зазвичай фазовий зсув становить 60°). Це забезпечує баланс між плавністю руху та швидкістю.

4.4 Можливості аналізу та параметри симуляції

Створена симуляційна модель у Webots дозволяє проводити віртуальні випробування розроблених алгоритмів без ризику пошкодження фізичного

обладнання. Важливою особливістю моделювання є врахування фізичної динаміки тіла робота: маси, моменту інерції, а також сили тертя між кінцівками та поверхнею.

Програмний комплекс дозволяє оцінювати ефективність алгоритмів за такими критеріями:

- Візуалізація траєкторій руху кінцівок.
- Оцінка стабільності платформи через відхилення корпусу (дані віртуального IMU).
- Аналіз енергоефективності через моніторинг зусиль на віртуальних приводах.

Дані симуляції можуть експортуватися через Supervisor API у формати .csv або .mat для подальшої обробки, що створює фундамент для майбутніх досліджень та оптимізації параметрів ходи

4.5 Аналіз переваг і обмежень середовища Webots

У моделюванні систем влаштованої робототехніки, зокрема роботів на гексаподах, середовище Webots є відмінним інструментом, оскільки досягло неперевершеного балансу між простотою реалізації, точністю реалізації фізичних процесів, та швидкістю реалізації симуляції.

Переваги Webots:

1. Симуляція фізичних процесів на реалістичному рівні. Завдяки фізичному рушію ODE взаємодія опор, тертя, інерція, та гравітація є реалістичною (Cyberbotics, 2024).

2. Інтеграція з ROS та Python. Webots має інтеграцію з ROS2, а також прості у використанні API для Python та C++, що невідворотно призводить до реалізації алгоритмів для руху, та збору даних сенсорів.

3. Наявність простих у використанні 3D-вікон, можливості контролю кута огляду та динаміки руху робота.

4. Експорт моделей. Створені моделі можна експортувати у URDF, або X3D для використання у Gazebo, або Unity.

5. Sim-boost. Webots дає можливість користувачам проводити експерименти в прискореному часі, що суттєво зменшує час обчислень.

Обмеження Webots

1. Спрощена динаміка під високим навантаженням. Двигун ODE може втратити точність під певними комбінаціями контактів, такими як м'які поверхні або жорсткі зіткнення.

2. Обмежений вибір існуючих плагінів. У порівнянні з Gazebo, в Webots менше вбудованих модулів для складних сенсорних систем або моделювання погоди.

3. Закрита архітектура двигуна ODE. Користувач не має можливості змінювати фізичні параметри двигуна ODE на низькому рівні.

4. Артефакти. У складних сценах можуть бути короткі падіння FPS, що не впливає на точність моделювання, але може ускладнити візуальний моніторинг.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано програмну реалізацію та моделювання руху гексапода у симуляційному середовищі Webots. Основні результати етапу полягають у наступному:

1. Розроблено програмну архітектуру системи керування. Створено контролер на мові Python, який взаємодіє з фізичною моделлю робота через API Webots. Реалізовано ієрархічну структуру управління, що розділяє рівні

планування траєкторії, генерації патернів ходи та розрахунку зворотної кінематики.

2. Імплементовано математичні моделі алгоритмів ходи. У програмний код закладено логіку функціонування трьох основних типів пересування: *Tripod gait* (для швидкого руху), *Wave gait* (для максимальної стійкості) та *Ripple gait*. Робота алгоритмів базується на діаграмі станів, що забезпечує чітку синхронізацію фаз переносу та опори для всіх шести кінцівок.

3. Верифіковано кінематичну модель робота. Віртуальні випробування підтвердили відсутність колізій між елементами конструкції та коректність розрахунків кутів повороту суглобів. Симуляція показала, що розроблена модель здатна виконувати стабільний рух без втрати рівноваги при використанні закладених алгоритмів.

4. Створено інструментарій для аналізу. Налаштовано механізми збору даних про положення сервоприводів та орієнтацію корпусу в просторі, що створює необхідну базу для подальшого налаштування параметрів ходи та оптимізації енергоефективності.

Таким чином, розроблена симуляційна модель є повністю функціональною і готовою для використання як платформа для відпрацювання сценаріїв автономного руху.

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ РОБОТА

5.1 Вдосконалення конструкції гексапода за результатами моделювання та компонування

У процесі розробки 3D-моделі гексапода було створено та проаналізовано кілька ітерацій конструкції. Первинна модель (Версія 1) слугувала для перевірки базової кінематики, однак у ході подальшого детального проектування та віртуального складання було виявлено низку недоліків, пов'язаних із розміщенням апаратної частини та жорсткістю конструкції.

На основі виявлених проблем було розроблено фінальну версію (Версія 2).
Порівняльний аналіз змін наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 — Еволюція конструктивних рішень гексапода

Вузол / Параметр	Початкова модель (Версія 1)	Фінальна модель (Версія 2)	Обґрунтування змін
Компонування електроніки	Відсутні посадкові місця. Елементи (Raspberry Pi, драйвери) не вміщуються під кришку.	Розроблено багаторівневу систему кріплень та стійок (standoffs) всередині корпусу.	Забезпечення надійної фіксації компонентів, захист від вібрацій та коректне центрування маси.
Сегмент Tibia (Гомілка)	Гладка дугоподібна форма, суцільний переріз.	Додано поздовжні ребра жорсткості.	Підвищення стійкості до згинальних навантажень без суттєвого збільшення ваги деталі.
Геометрія стопи	Округлий кінець (точковий контакт).	Профільована форма зі зрізом.	Збільшення площі контакту з поверхнею для кращого зчеплення та зменшення ковзання.
Верхня кришка	Стандартна куполоподібна форма.	Асиметрична форма з урахуванням габаритів роз'ємів Raspberry Pi.	Забезпечення доступу до портів введення-виведення та запобігання перетисканню кабелів.

Нижче наведено візуалізацію еволюції конструкції. На рис. 5.6 зображено початковий варіант складання.

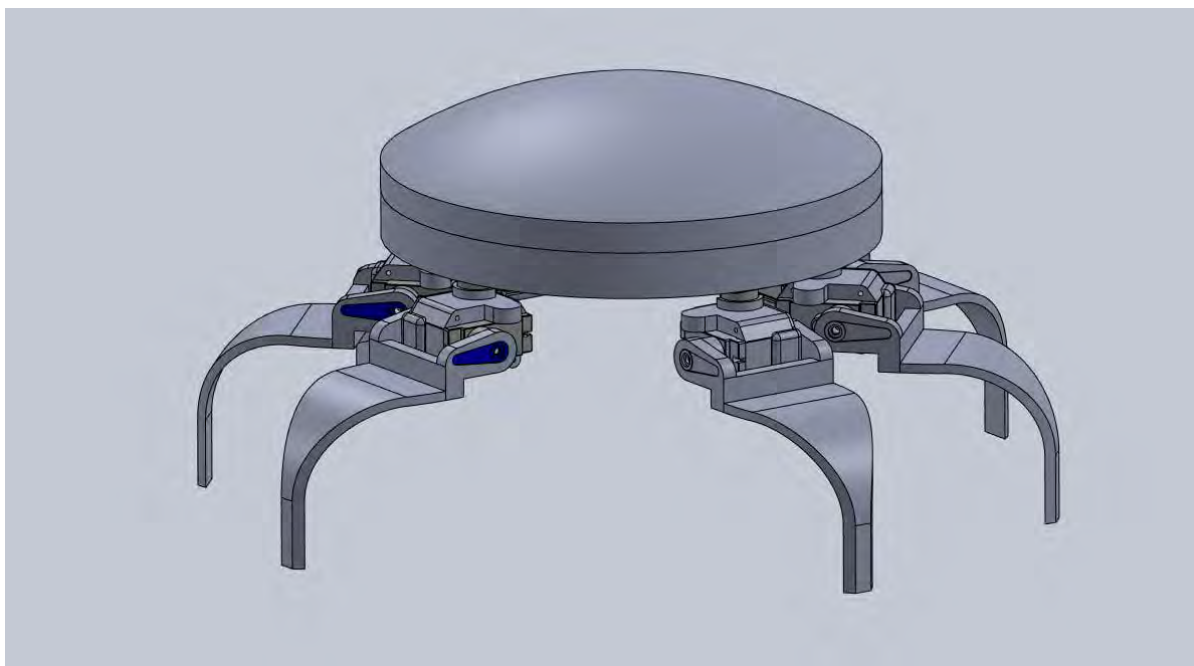


Рис. 5.6. Початкова концепція корпусу та ніг гексапода (Версія 1)

Як видно з рис. 5.6, перша версія мала спрощену геометрію ніг та плоску основу, що ускладнювало монтаж керуючої електроніки та акумулятора.

На рис. 5.7 та 5.8 представлено фінальну модель, яка враховує всі компоновальні вимоги.

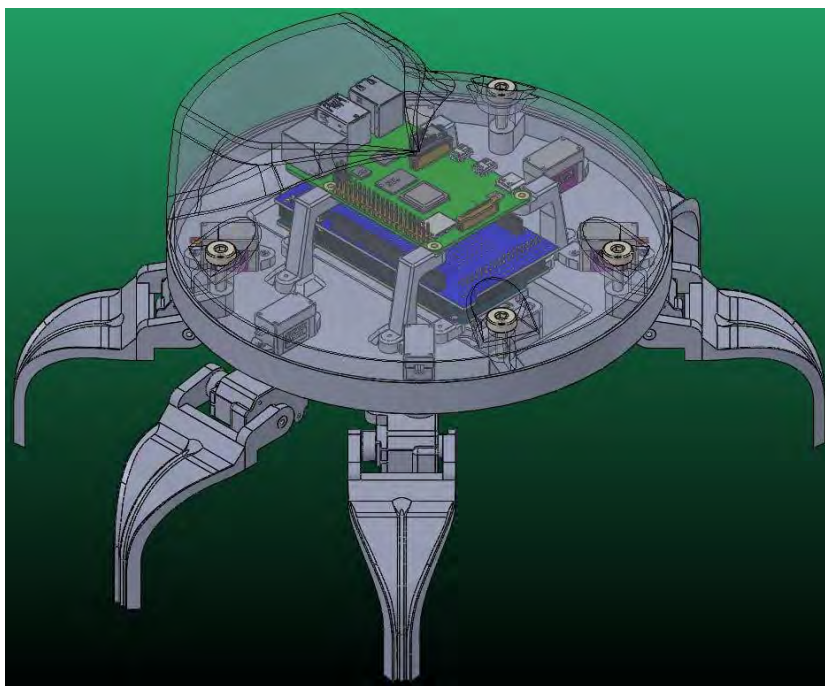


Рис. 5.7. Компонування електронних компонентів усередині корпусу (Версія 2)

На рис. 5.7 показано внутрішню структуру корпусу. Завдяки 3D-моделюванню було точно розраховано розташування мікрокомп'ютера Raspberry Pi та плати розширення. Це дозволило уникнути колізій (перетинів) деталей та забезпечити компактність.

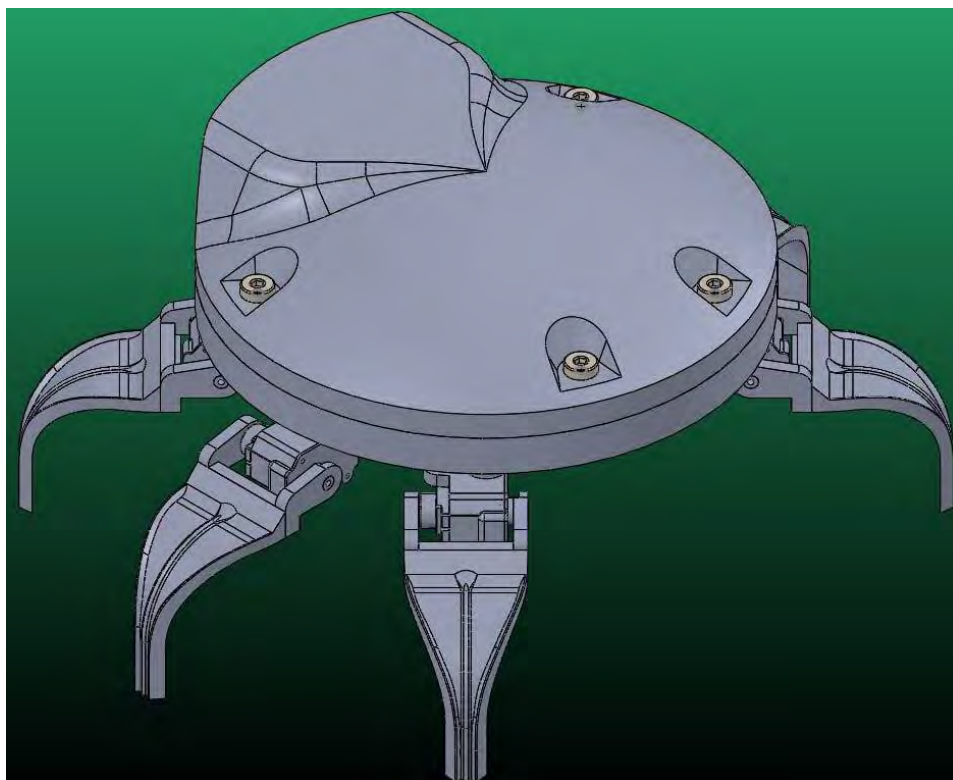


Рис. 5.8. Фінальна модель гексапода з посиленими кінцівками

Особливу увагу було приділено сегменту ноги *Tibia*. У фінальній версії (рис. 5.8) введено ребра жорсткості, що проходять вздовж усього вигину деталі. Згідно з попередніми оцінками в модулі SolidWorks Simulation, це рішення зменшує деформацію ноги під навантаженням на 15-20% порівняно з гладкою формою першої версії, що є критичним при використанні пластику ABS. Також змінено форму контакту стопи: замість простого заокруглення використано складніший профіль для стабільнішої фіксації робота на рівній поверхні.

Вдосконалення конструкції дозволило створити повністю функціональний корпус, придатний для розміщення всієї необхідної електроніки, та підвищити механічну надійність найбільш навантажених вузлів.

5.2 Розрахунок масо-габаритних характеристик та навантажень на кінцівки

Для розуміння, яку мінімальну вагу робот має витримати, несучи на собі конструкцію із електронних компонентів необхідно поррахувату масу кожного компонента і масу корпусу.

Орієнтовна вага електронних компонентів для початкової версії моделі робота описана в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Вага електронних компонентів

Компонент	Кількість	Вага 1 шт. (приблизно)	Сумарна Вага
Сервоприводи MG90S	12	14 г	168 г
Raspberry Pi 4 Model B	1	~46 г	46 г
PCA9685 ШІМ-драйвер	1	~9 г	9 г
BNO055 IMU	1	~3 г	3 г
Li-Po Акумулятор (3S, ~2200mAh-3000mAh)	1	~150 – 250 г	200 г
Дрібні компоненти (кабелі, регулятор напруги, кріплення)	1	~50 г	50 г
Орієнтовна загальна вага електроніки (без шасі)			~476 г

Для підрахунку ваги коробки для електронних компонентів скористаємось функцією Mass Properties в SolidWorks

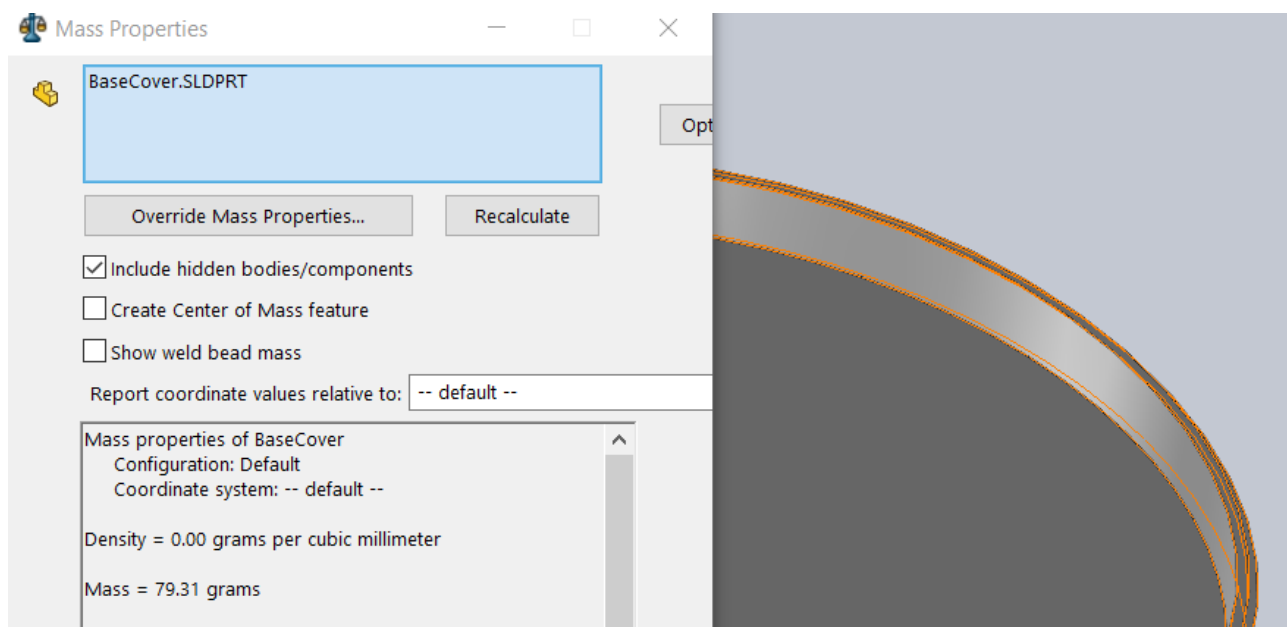


Рис.5.1. Маса верхньої частини корпусу

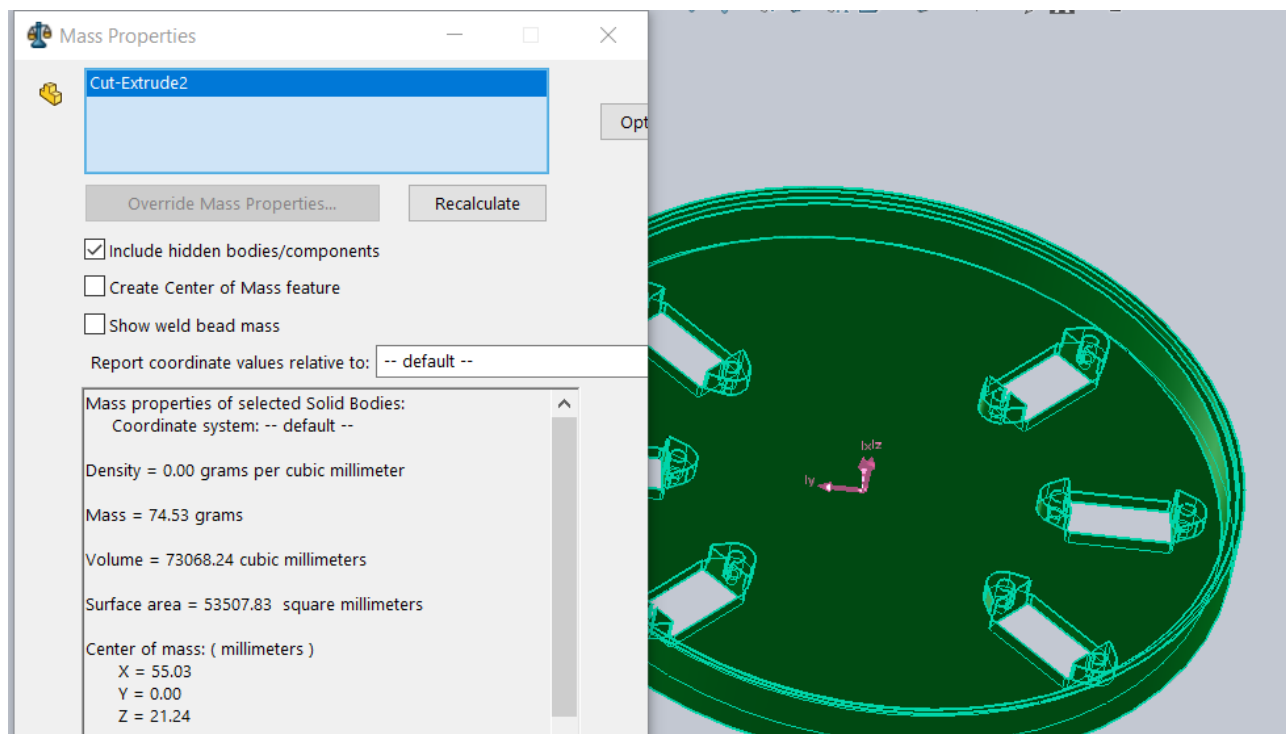


Рис.5.1. Маса нижньої частини корпусу

Визначимо масу корпусу робота:

$$m = 74,53 + 79,31 + 476 = 629,84 \text{ г} = 0,62984 \text{ кг}$$

Сила, з якою корпус робота тисне на опори (лапи), визначається за формулою:

$$F = m * g, \text{ де}$$

- $m = 0,62984 \text{ кг}$ - маса корпусу,
- $g = 9,8 \text{ Н/кг}$ - прискорення вільного падіння.

Отже:

$$F = 0,62984 * 9,8 \approx 6,17 \text{ Н}$$

Таким чином, сила тиску корпусу на лапи робота становить приблизно 6,17 Н.

Орієнтовна вага електронних компонентів для вдосконаленої версії моделі робота описана в таблиці 5.1.

Таблиця 5.2. Вага електронних компонентів

Компонент	Кількість	Вага 1 шт. (приблизно)	Сумарна Вага
Сервоприводи MG90S	12	14 г	168 г
Raspberry Pi 4 Model B	1	~46 г	46 г
PCA9685 ШІМ-драйвер	1	~9 г	9 г

BNO055 IMU	1	~3 г	3 г
Li-Po Акумулятор (3S, ~2200mAh-3000mAh)	1	~150 – 250 г	200 г
Дрібні компоненти (кабелі, регулятор напруги, кріплення)	1	~50 г	50 г
Орієнтовна загальна вага електроніки (без шасі)			~476 г

Для підрахунку ваги коробки для електронних компонентів скористаємось функцією Mass Properties в SolidWorks

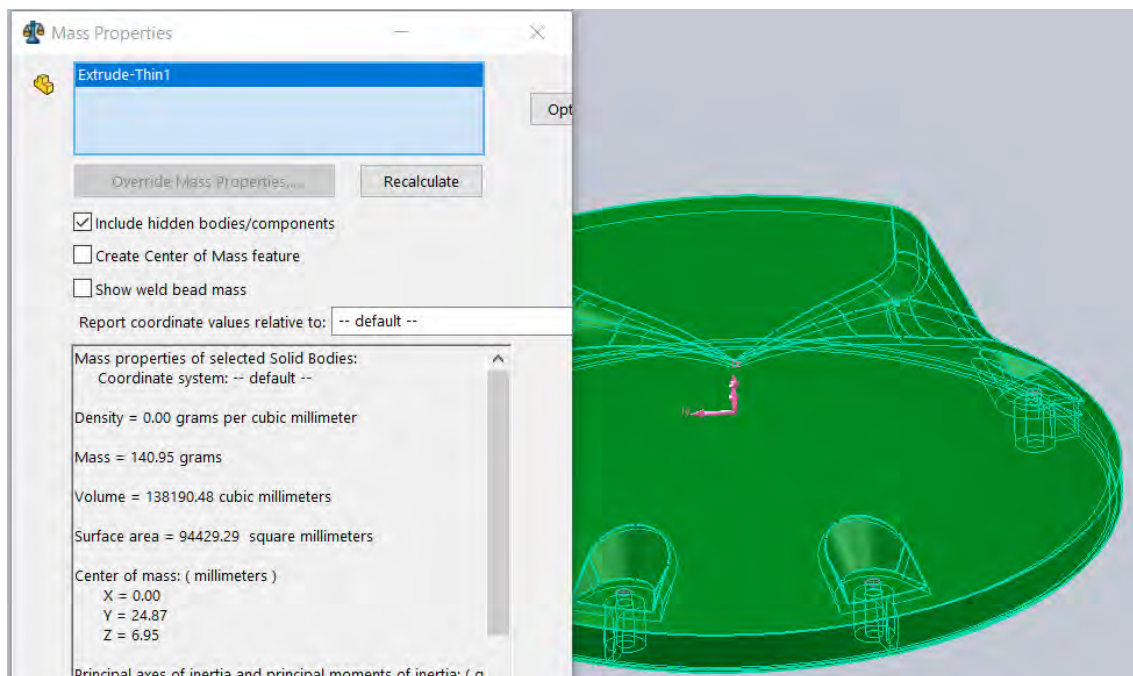


Рис.5.3. Маса верхньої частини корпусу

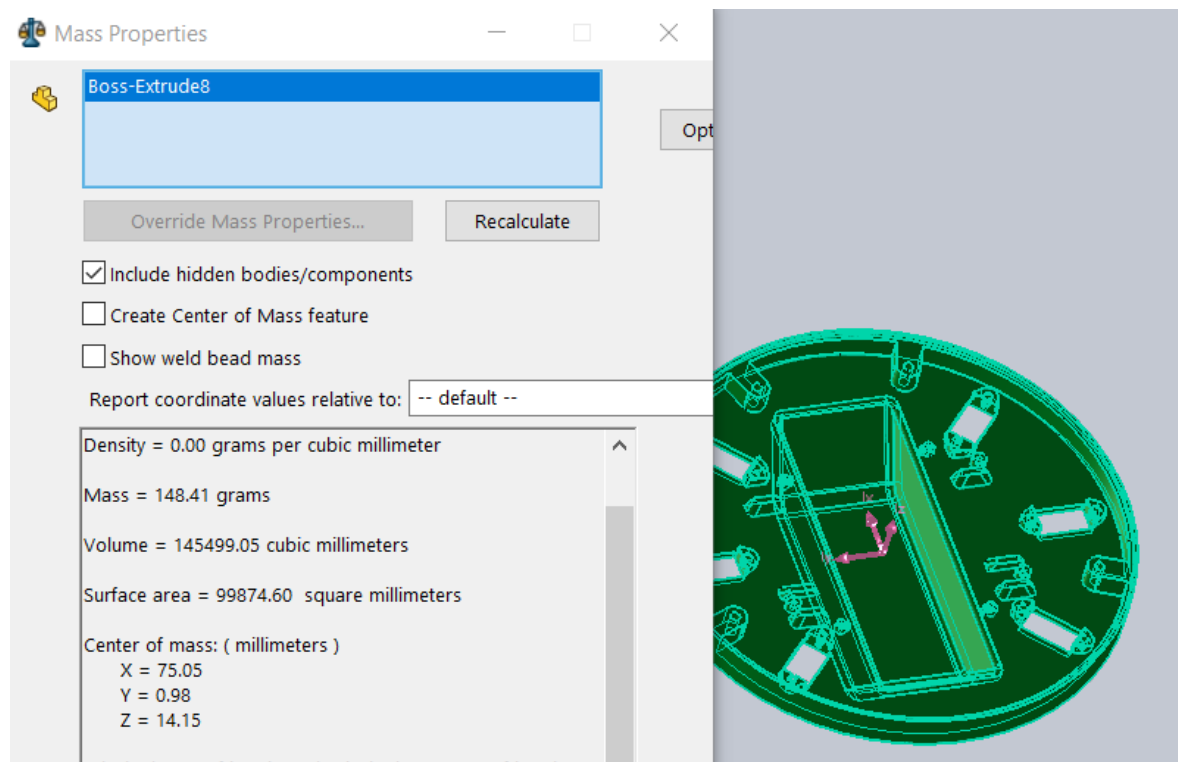


Рис.5.4. Маса нижньої частини корпусу

Визначимо масу корпусу робота:

$$m = 148,41 + 140,95 + 476 = 765,36 \text{ г} = 0,76536 \text{ кг}$$

Сила, з якою корпус робота тисне на опори (лапи), визначається за формулою:

$$F = m * g, \text{ де}$$

- $m = 0,76536 \text{ кг}$ - маса корпусу,
- $g = 9,8 \text{ Н/кг}$ - прискорення вільного падіння.

Отже:

$$F = 0,76536 * 9,8 \approx 7,5 \text{ Н}$$

Таким чином, сила тиску корпусу на лапи у вдосконаленого робота становить приблизно 7,5 Н.

5.3 Обґрунтування геометричних параметрів ланок кінцівок

Оскільки в роботі використовуються серводвигуни MG90S з обмеженим крутним моментом приблизно 2.2 кг при 6В то необхідно мінімізувати вагу, розміри ніг мають бути максимально компактними.

Тобто, чим довша нога (плече), тим більший крутний момент потрібен сервоприводу.

Оскільки за підрахунками маси компонентів і пластикової основи -то отримаємо загальну очікувану вагу робота до 1 кг.

Нога складається з двох основних сегментів (плечей), керованих двома MG90S:

1. *Соха (Кульшовий суглоб)*: Рух вперед/назад, прикріплений до шасі.

2. *Femur (Стегно)*: Рух вгору/вниз, прикріплений до Соха.

3. *Tibia (Гомілка)*: Нижня частина ноги, прикріплена до Femur.

Таблиця 5.3. Сегменти ноги гексаподного робота

Сегмент ноги	Позначення	Рекомендована довжина	Роль
Соха (Кульшовий суглоб)	L1	15 - 20 мм	Мінімізація крутного моменту, що діє на сервопривід Соха.
Femur (Стегно)	L2	40 - 50 мм	Основне плече, що піднімає/опускає ногу.
Tibia (Гомілка)	L3	50 - 60 мм	Забезпечує висоту робота.

1. **Мінімальний Крок (L1):** Короткий сегмент Соха (15-20 мм) важливий. Це зменшує навантаження на сервопривід, який його обертає, оскільки він повинен переміщувати вагу всього робота.

2. **Баланс Довжини (L2, L3):** Оптимальне співвідношення довжин L2 і L3 становить приблизно 1:1.2 або 1:1.5. Занадто довгі плечі (особливо Femur і Tibia) швидко перевищать межу крутного моменту MG90S.

3. **Кінцева Досяжність (Reach):** Максимальна довжина повністю витягнутої ноги буде: $Reach = L1 + L2 + L3 = 15 \text{ мм} + 40 \text{ мм} + 50 \text{ мм} = 105 \text{ мм}$.

Відповідно, висота, на якій гексапод буде ходити (положення *Standing*), повинна бути трохи меншою, ніж ця максимальна довжина, для забезпечення стабільності та запасу ходу.

5.4 Обґрунтування оптимізації конструкції опорно-рухового апарату гексапода методом скінченно-елементного аналізу

Для перевірки надійності розробленої конструкції та обґрунтування доцільності внесення змін до геометрії ноги гексапода було проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) у середовищі *SolidWorks Simulation*.

Мета дослідження – це порівняльний аналіз механічних характеристик (міцності, жорсткості та маси) двох варіантів конструкції ноги робота:

1. **Базова модель (Original):** початковий варіант конструкції.

2. Оптимізована модель (Optimized): вдосконалений варіант зі зміненим профілем та доданими ребрами жорсткості.

Граничні умови моделювання:

- Матеріал: ABS-пластик (модуль пружності $E = 2 \cdot 10^9$ Па, межа плинності $\sigma_T \approx 30$ МПа).
- Навантаження: прикладена сила $F = 10$ Н до підошви ноги (імітація реакції опори при вазі робота ~ 2 кг та опорі на 3 ноги).
- Фіксація: жорстке закріплення (Fixed Geometry) у зоні з'єднання з сервоприводом.
- Тип аналізу: статичний аналіз (Static Analysis) із врахуванням великих переміщень (Large Displacement) для коректного розрахунку поведінки полімерних деталей.

Результати моделювання:

Результати розрахунку напружень за мізесом (von Mises Stress), переміщень (Displacement) та деформацій (Strain) для обох моделей наведено у порівняльній таблиці (Табл. 5.4) та проілюстровано на рис. 5.5–5.6.

Таблиця 5.4. Порівняльна характеристика конструкцій ноги гексапода

Характеристика	Базова модель	Оптимізована модель	Відносна зміна
Маса деталі, г	10,78	13,35	+23,8%
Максимальне переміщення (прогин), мм	6,61	2,75	-58,4%
Максимальне напруження, МПа	11,42	12,77	+11,8%
*Коефіцієнт запасу міцності (n)	$\sim 2,6$	$\sim 2,3$	-

* Розраховано відносно межі плинності ABS-пластику (30 МПа).

Аналіз результатів:

1. Жорсткість конструкції: Впровадження ребер жорсткості дозволило зменшити максимальний прогин деталі під навантаженням з 6,61 мм до 2,75 мм. Зниження деформації на 58% є критично важливим показником, оскільки це мінімізує похибки позиціонування кінцівки та підвищує кінематичну точність руху робота загалом.

2. Міцність: Максимальні еквівалентні напруження в оптимізованій моделі становлять 12,77 МПа¹, що не перевищує допустимих значень для ABS-пластику. Конструкція працює в пружній зоні деформацій із достатнім запасом міцності ($n > 2$). Незначне підвищення напружень (на 1,35 МПа) пояснюється появою локальних концентраторів у місцях переходу ребер жорсткості, що не є критичним для цілісності деталі.

3. Масагабаритні показники: Збільшення маси однієї ноги на 2,57 г (сумарно +15,4 г для всього робота) є незначним у порівнянні з загальною вагою платформи і не чинитиме суттєвого впливу на енергоспоживання сервоприводів.

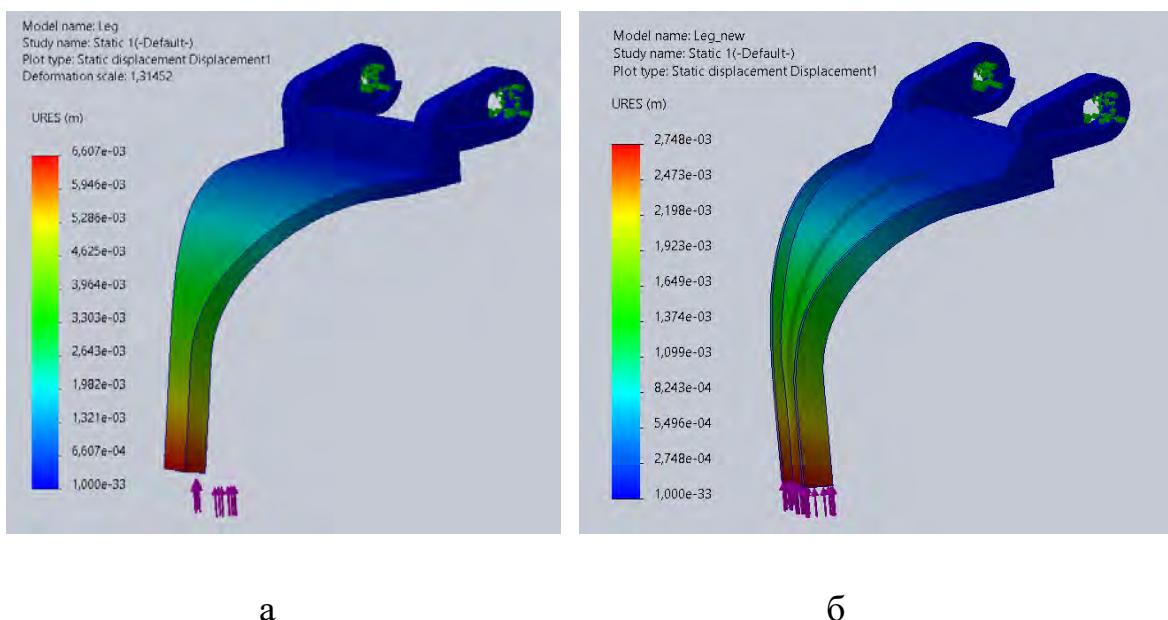


Рисунок 5.5. Графік переміщень (Displacement) для базової (а) та оптимізованої (б) моделей.

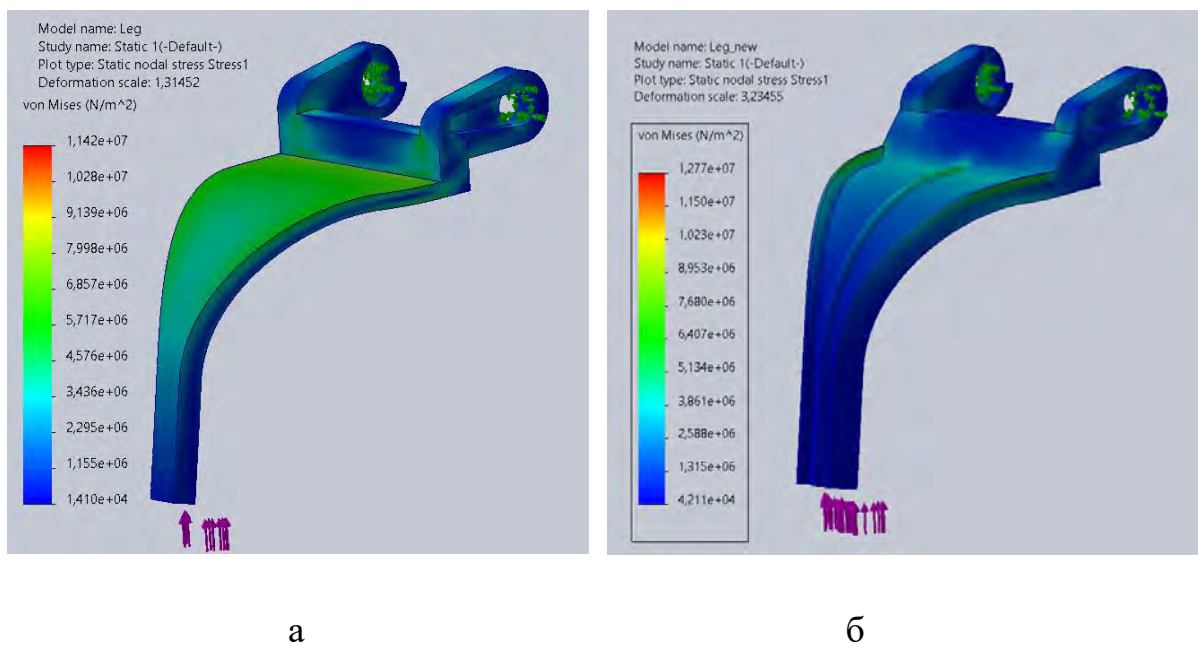


Рисунок 5.6. Графік напружень (Stress) для оптимізованої моделі.

За результатами скінченно-елементного аналізу, оптимізована конструкція демонструє у 2,4 рази вищу жорсткість при збереженні необхідного запасу міцності. Це підтверджує доцільність використання вдосконаленої моделі для виготовлення методом 3D-друку в рамках стартап-проєкту.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ШЕСТИНОГИЙ РОБОТ»

Важливо сприяти новим ідеям, які поєднують теоретичну залученість з практичним використанням. Одним із прикладів є дослідження, проведене в магістерській дисертації, яке вивчало використання генетичних алгоритмів для оптимізації руху в гекатоподів. Це дослідження може слугувати основою для майбутнього стартапу, спрямованого на перенесення роботизованої платформи у сфери промислового та освітнього використання, а також наукових досліджень.

Метою цього розділу є пояснення розробки концепції стартапу на основі наукових результатів, технічної та економічної оцінки, та оцінки ринкового потенціалу ідеї. У цьому розділі представлено систематичний план різних етапів

формування стартапу, починаючи з обґрунтування ідеї до розробки бізнес-моделі, маркетингової стратегії та прогнозування економічної ефективності.

Запропонований стартап у цьому розділі розширює наукові дослідження, вказуючи на великий потенціал дослідження в комерціалізації та розвитку інновацій на основі гекатоподів з алгоритмами руху.

6.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Ідея стартап-проекту полягає у створенні інтелектуальної робототехнічної платформи типу гексапод, здатної до автономного пересування з використанням алгоритмів оптимізації траєкторій на основі генетичних методів. На відміну від класичних роботів із фіксованими сценаріями руху, запропонована система має здатність адаптивно змінювати траєкторію та стратегію пересування в режимі реального часу залежно від умов середовища.

Метою проекту є комерціалізація наукових результатів магістерського дослідження через створення інноваційного продукту - компактного програмно гнучкого гексапода, який може використовуватися у навчальних цілях, наукових експериментах, дослідженнях з автономної навігації, а також у промислових або оборонних застосуваннях для розвідки чи моніторингу.

Основною інноваційною складовою стартапу є використання генетичних алгоритмів для оптимізації траєкторій руху, що забезпечує стабільність пересування, мінімізацію енергоспоживання. Такий підхід дозволяє створити конкурентний продукт, який поєднує наукову новизну з практичною ефективністю.

У межах стартап-проекту передбачається реалізація трьох основних напрямів розвитку:

1. *технологічний* — розроблення прототипу гексапода з програмним ядром оптимізації;
2. *комерційний* — створення готового продукту для ринку освітніх і наукових платформ;

3. *інноваційний* — подальше вдосконалення алгоритмів керування на основі машинного навчання.

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка гексапода (6-ногого робота) на базі Raspberry Pi, який здатний самостійно навчатися ходити та оптимізувати свою ходу під різні умови за допомогою генетичних алгоритмів.	1. Освіта та Наука: Вивчення машинного навчання, кінематики багатонігих систем та еволюційних алгоритмів у ВНЗ.	Економія часу: Користувач отримує готову платформу для експериментів з ШІ, не витрачаючи місяці на проектування механіки.
	2. R&D - Дослідження та використання як дешевої бази для тестування алгоритмів навігації та енергоефективності.	Унікальний досвід: Можливість спостерігати "еволюцію" робота в реальному часі, а не просто програмувати рухи вручну.
	3. DIY-сектор: Створення "розумних" іграшок ентузіастами.	Доступність: Вартість у 5-10 разів нижча за професійні наукові платформи.

Для визначення конкурентоспроможності проєкту необхідно провести порівняльний аналіз його техніко-економічних властивостей порівняно з існуючими на ринку аналогами та замінниками. Аналіз сфокусовано на трьох основних категоріях конкурентів: промислові роботи, прості DIY-набори та колісні навчальні платформи. За результатами зіставлення визначаються сильні (S), слабкі (W) та нейтральні (N) сторони проєкту, які є підґрунтям для формування його унікальної торговельної пропозиції. Цей порівняльний аудит представлений у табл. 6.2.

Ось 3 прямі конкуренти, яких було взято для порівняння:

1. Freenove Big Hexapod Robot Kit (для Raspberry Pi)

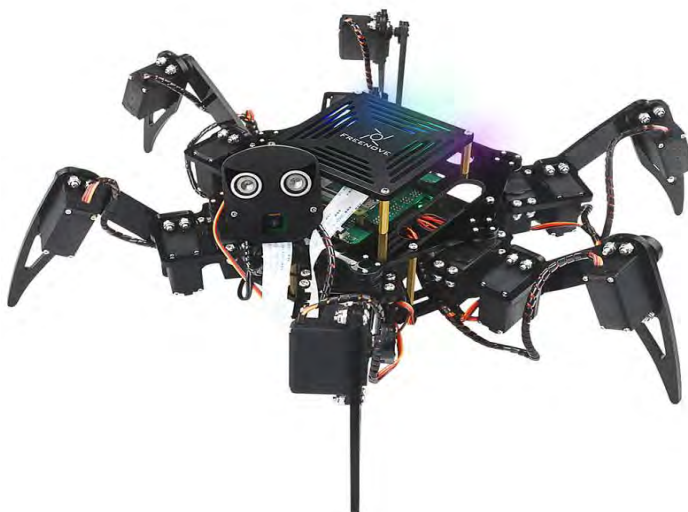


Рисунок 6.1. Перший конкурент Freenove Big Hexapod Robot Kit[38]

Це один із найпопулярніших наборів на ринку. Має 18 ступенів свободи (3 серво на ногу). Корпус зазвичай з акрилу. Базується на Raspberry Pi. Цей робот має готовий код для ходьби, але він стандартний і не використовує ШІ для самонавчання.

2. Adept RaspClaws Hexapod



Рисунок 6.2. Другий конкурент Комплект робота-павука Adept RaspClaws Hexapod[39]

Схожий на Freenove, але часто фокусується на комп'ютерному зорі (камера в комплекті). Також 18 DOF (сервоприводи MG90S або аналог). Корпус акриловий. Працює на Python. Це бюджетний варіант. Він популярний, але його механіка менш міцна. Цей робот не призначений для важких обчислень оптимізації ходи.

3. Hiwonder SpiderPi (Pro версія)



Рисунок 6.3. Другий конкурент Комплект р Hiwonder SpiderPi [40]

Це вже більш дорогий сегмент (High-end). Металевий корпус, потужні сервоприводи з послідовною шиною (не MG90S), готова складна кінематика. Основний недолік — дуже висока ціна і закритість коду (важко впровадити власні генетичні алгоритми).

Таблиця 6.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ з/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Проект (Науковий гексапод)	Конкурент 1 (Freenove Kit)	Конкурент 2 (Adeept RaspClaws)	Конкурент 3 (Hiwonder SpiderPi)			
1.	Вартість реалізації	Низька	Середня	Середня/Низька	Висока			S
2.	Матеріал корпусу	3D-друк ABS (Ударостійкий, ремонтпридатний)	Акрил (Крихкий)	Акрил (Крихкий)	Алюміній/Метал		N	
3.	Ступені свободи (DOF)	12 (2 на ногу)	18 (3 на ногу)	18 (3 на ногу)	18 (3 на ногу)	W		
4.	Гнучкість ПЗ (Адаптація під III)	Відкрита (Python, спеціально під ГА)	Обмежена (стандартні бібліотеки)	Обмежена (фокус на камеру)	Закрита (пропріетарне ПЗ)			S
5.	Складність збірки	Висока (потрібен друк, пайка)	Середня (тільки збірка на гвинтах)	Середня (тільки збірка)	Низька (готовий або напівготовий)	W		
6.	Наукова новизна	Висока (Дослідження генетичних алгоритмів)	Низька (Навчальна іграшка)	Низька (Розважальний робот)	Середня (Платформа для розробки)			S
7.	Енергоефективність	Оптимізується програмно (мета проекту)	Стандартна (не оптимізована)	Стандартна	Низька (потужні мотори їдять багато)			S

Аналіз показав, що проєкт «Шестиногий робот» має значну перспективність у сегменті освітньої та наукової робототехніки. Незважаючи на слабкі сторони, пов'язані з обмеженою кількістю ступенів свободи та відсутністю готових інструкцій для користувача, що є прямим наслідком бюджетної та дослідницької стратегії, проєкт демонструє вагомий набір сильних сторін.

До ключових переваг належать доступна ціна, що забезпечується відсутністю витрат на бренд та маркетинг, а також унікальна інтелектуальна складова - здатність робота навчатися та оптимізувати власні рухи. Використання

матеріалу ABS підвищує міцність конструкції у порівнянні з дешевими акриловими аналогами, що робить платформу більш надійною для експериментів.

Нейтральною характеристикою виступає матеріал корпусу: він поступається металевим рішенням, проте перевершує акрилові, що дозволяє розглядати його як компромісне рішення. Сукупність цих факторів формує унікальну науково-освітню платформу, яка заповнює нішу між дорогими промисловими роботами та надто спрощеними навчальними наборами, забезпечуючи баланс між економічною ефективністю та інтелектуальним потенціалом.

Технічний аудит стартап-проєкту спрямований на оцінювання готовності технологічної бази, визначення необхідних ресурсів, компонентів і програмних засобів для реалізації робототехнічної платформи типу гексапод. На цьому етапі проаналізовано апаратну, програмну та конструктивну складові системи, а також можливі технічні ризики, що можуть вплинути на процес розроблення та впровадження проєкту.

Таблиця 6.3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Створення механічної конструкції	FDM 3D-друк з використанням ABS-пластику. Проектування у CAD-системах.	Технологія широко розповсюджена та відпрацьована. Не потребує доробки.	Доступні. Є вільний доступ до 3D-принтера та матеріалів на ринку.
2.	Забезпечення руху	Використання сервоприводів (MG90S) та ШІМ-контролерів (PCA9685) для керування 12 ступенями свободи.	Стандартні електромеханічні компоненти. Наявні готові рішення.	Доступні. Компоненти є у вільному продажу.
3.	Інтелектуальна система керування та навчання	Одноплатний мікрокомп'ютер + ОС Linux. Мова Python для реалізації логіки.	Технології наявні. Висока обчислювальна потужність у компактному розмірі.	Доступні. Відкрите ПЗ та документація.
4.	Оптимізація ходи	Генетичні алгоритми + зворотний зв'язок через IMU-сенсори (акселерометр/гіроскоп).	Математичний апарат розроблений. Потребує програмної адаптації (написання коду) під конкретну модель.	Доступні. Необхідні знання та бібліотеки доступні автору.

Для реалізації проекту обрано технологію адитивного виробництва (3D-друк ABS-пластиком) для створення корпусу, що забезпечує міцність та легкість конструкції.

Електронна частина базується на модульній архітектурі з використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi та драйверів PCA9685, що є оптимальним за співвідношенням ціна/продуктивність.

Програмна реалізація здійснюється мовою Python із застосуванням генетичних алгоритмів, що є доступним технологічним шляхом для створення адаптивної системи руху. Всі необхідні технології є наявними на ринку та доступними автору проекту.

Для перевірки ключових гіпотез стартап-проекту було створено мінімально життєздатний продукт (MVP). Головною метою створення MVP є підтвердження технічної можливості реалізації адаптивної ходи гексапода на базі бюджетних компонентів з використанням генетичних алгоритмів.

Для обґрунтування вибору технічних рішень при створенні прототипу було використано метод морфологічного аналізу. Морфологічна карта (Таблиця 6.4) демонструє можливі варіанти реалізації та рішення, обрані для MVP, виходячи з критеріїв вартості та доступності.

Таблиця 6.4. Морфологічна карта розробки продукту

Характеристика	Варіант 1 (Low-end)	Варіант 2 (MVP - Обрано)	Варіант 3 (High-end)
Матеріал корпусу	Картон/Фанера (лазерна різка)	ABS-пластик (3D-друк)	Алюміній/Карбон
Система керування	Arduino Uno	Raspberry Pi + PCA9685	NVIDIA Jetson Nano
Приводи	SG90 (пластиковий редуктор)	MG90S (металевий редуктор)	Bus Servo (Serial)
Алгоритм руху	Жорсткий скрипт (Hardcoded)	Генетичний алгоритм (Python)	Нейромережа (RL)
Живлення	Батарейки AA	Li-Ion акумулятори (18650)	Li-Po батарея високої ємності

Процес розробки MVP складався з трьох послідовних етапів:

1. Цифрове моделювання та симуляція.

Спочатку було створено 3D-модель робота у середовищі SolidWorks. Це дозволило перевірити кінематику руху та уникнути зіткнень деталей ніг. Паралельно код генетичного алгоритму було протестовано у симуляторі Webots, що дозволило навчити віртуальну модель ходити ще до виготовлення фізичного робота.

2. Апаратна реалізація.

Корпус робота виготовлено методом пошарового наплавлення (FDM) з ABS-пластику. Цей матеріал обрано через його ударостійкість, що важливо для навчального процесу. Електронна схема включає одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, який відповідає за обчислення траєкторій, та драйвер PCA9685, що керує 12-ма сервоприводами MG90S.

Створений прототип підтвердив працездатність концепції. Використання Raspberry Pi дозволяє запускати повноцінний Python-код "на борту" робота, що робить його унікальним інструментом для навчання. MVP повністю готовий до демонстрації потенційним клієнтам чи кафедрам ВНЗ як доказ концепції.

У рамках технічного аудиту було проведено перевірку надійності друкованих елементів корпусу. FEA-моделювання підтвердило, що оптимізована конструкція ніг забезпечує необхідну жорсткість та витримує робочі навантаження із запасом міцності понад 2,0, що мінімізує ризики механічних поломок під час експлуатації.

6.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Важливою умовою успіху стартапу є аналіз ринкового середовища. Оцінка ключових показників, таких як динаміка попиту та бар'єри входу, дозволяє спрогнозувати комерційний потенціал розробки. Попередня характеристика потенційного ринку освітньої робототехніки наведена у Таблиці 6.5.

Таблиця 6.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од.	Основні глобальні гравці: Freenove, Hiwonder, Adeept, Makeblock, SunFounder, Pololu. Ринок не монополізований, є місце для нових рішень.
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од.	Якісна оцінка: Обсяг продажів у ніші оцінюється як середній, але стабільний, з високим потенціалом зростання завдяки поширенням можливостей ІІІ.
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає. Прогнозується середньорічний приріст. Попит стимулюється впровадженням STEM-освіти та інтересом до ІІІ.
4	Наявність обмежень для входу	Середні. Технічні бар'єри низькі, оскільки компоненти доступні. Основні обмеження: конкуренція з боку дешевих китайських аналогів та необхідність створення якісного навчального контенту.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Для навчальних цілей вимоги мінімальні - безпека матеріалів, електробезпека низької напруги. Для продажу в ЄС/США потрібні сертифікати про відсутність шкідливих речовин та СЕ.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30% - 40%. Це маржа для апаратних стартапів, де основна цінність додається за рахунок програмного забезпечення та унікальної конструкції.

Ринок знаходиться на стадії активного зростання, що зумовлено глобальним трендом на STEM-освіту та вивчення штучного інтелекту. Хоча на ринку присутні великі гравці, ніша доступних платформ для глибокого вивчення адаптивних алгоритмів, а не простого програмування рухів, залишається вільною, а бар'єри входу для нішевого продукту оцінюються як низькі.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їхні характеристики та специфічні вимоги до продукту. Оскільки проєкт має подвійне призначення (освітнє та хобі), ми виділяємо два ключові сегменти споживачів: B2B та B2C. Деталізація наведена у Таблиці 6.6.

Таблиця 6.6. 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.	Вивчення складних алгоритмів руху, кінематики та машинного навчання (ШІ) на практиці.	Заклади вищої освіти (ВНЗ), наукові лабораторії та гуртки робототехніки.	Рішення про покупку приймається довго, через тендери або гранти. Цінують наявність методичних матеріалів та можливість модифікації коду (Open Source).	До продукції: Відкритий код (Python), наявність сенсорів зворотного зв'язку, ремонтпридатність (можливість друку деталей). До постачальника: Технічна підтримка, наявність документації.
2.	Самоосвіта, хобі, створення власних проектів на базі Raspberry Pi.	Індивідуальні мейкери, ентузіасти (DIY-спільнота), студенти технічних спеціальностей.	Купують емоційно або для конкретного завдання. Чутливі до ціни. Шукають унікальні функції, яких немає у стандартних китайських наборах.	До продукції: Низька ціна, у порівнянні з професійними роботами), сумісність з популярними бібліотеками, модульність конструкції. До постачальника: Швидка доставка компонентів, спільнота користувачів.

Аналіз цільової аудиторії свідчить про те, що ключовим драйвером покупки є бажання отримати практичний досвід роботи з сучасними технологіями за доступною ціною. Для навчального сегменту критично важливою є наявність методичного забезпечення, тоді як для B2C-клієнтів пріоритетом є відкритість архітектури та можливість модифікації.

Для формування реалістичної стратегії виведення продукту на ринок необхідно проаналізувати зовнішні фактори впливу. У Таблицях 6.7 та 6.8 визначено ключові загрози, що можуть перешкодити реалізації проекту, та можливості, які сприятимуть його розвитку.

Таблиця 6.7. Фактори загроз

№ з/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Демпінг з боку китайських	Поява дешевих аналогів на AliExpress, які візуально	Акцент на унікальному ПЗ (генетичні алгоритми) та

	виробників	схожі, але не мають "розумного" ПЗ.	навчальних матеріалах українською/англійською мовами, чого немає у китайців.
2.	Зростання цін на компоненти	Дефіцит або подорожчання Raspberry Pi (як було під час кризи напівпровідників).	Адаптація коду під альтернативні плати (Orange Pi, ESP32) або створення запасу компонентів.
3.	Швидке старіння технологій	Поява нових, простіших методів навчання роботів, що зробить поточний підхід застарілим.	Постійне оновлення ПЗ, інтеграція з сучасними симуляторами та підтримка спільноти розробників.
4.	Залежність від імпортованих комплектуючих	Збої у постачанні електроніки або зростання цін на сервоприводи/чипи через курсові коливання	Створення запасу критичних компонентів та адаптація конструкції під різні типи доступних сервоприводів (модульність).
5.	Низька платоспроможність освітнього сектору	Університети та школи можуть мати обмежені бюджети та складні бюрократичні процедури закупівель.	Запровадження гнучкої цінової політики: продаж дешевих наборів для самостійної збірки (DIY kit) та співпраця через грантові програми.

Таблиця 6.8. Фактори можливостей

№ з/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання ринку STEM-освіти	Глобальний ринок освітньої робототехніки зростає на 12–15% щороку, збільшується попит на навчальні платформи	Розробка методичних матеріалів та навчальних курсів для шкіл/ВНЗ, щоб продавати не просто робота, а комплексне освітнє рішення
2.	Попит на відкриті (Open Source) платформи	Дослідникам не вистачає роботів з відкритою архітектурою для модифікацій (більшість аналогів - закриті)	Публікація частини коду та креслень, створення ком'юніті навколо продукту для залучення ентузіастів та вчених
3.	Доступність грантового фінансування	Наявність програм підтримки стартапів (Startup Ukraine, Horizon Europe) для інноваційних проєктів	Підготовка якісної заявки на грант з акцентом на наукову новизну (генетичні алгоритми) для отримання безповоротних інвестицій.
4.	Потреба у роботах подвійного призначення	Високий інтерес до автономних платформ для розвідки, розмінування та моніторингу в Україні.	Адаптація алгоритмів прохідності для складних рельєфів та позиціонування продукту як платформи для оборонних R&D.
5.	Популярність 3D-друку	Доступність 3D-друку дозволяє дешево виготовляти та ремонтувати корпус робота	Продаж лише електронної «начинки» та надання файлів для друку клієнтам, що суттєво знижує логістичні витрати та ціну для клієнта.

Зіставлення факторів показує, що основні загрози, а саме - цінова конкуренція з боку китайських виробників та зростання попиту на AI-освіту,

можуть бути нівельовані шляхом використання можливостей ринку. Стратегія має будуватися на створенні унікального навчального контенту, який не можуть запропонувати масові виробники дешевих аналогів.

На завершальному етапі аналізу пропозиції визначаються загальні риси конкуренції на ринку. Це дозволяє обрати правильну стратегію поведінки (Таблиця 6.9)

Таблиця 6.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії)
1. Вказати тип конкуренції	Монополістична конкуренція. Багато продавців, але товари диференційовані (різні функції, дизайн).	Необхідно чітко виділити своє УТП (Унікальну Торгову Пропозицію): "Перший доступний робот, що вчиться ходити сам".
2. За рівнем конкурентної боротьби	Глобальний ринок. Основні конкуренти знаходяться за кордоном, продаж через Інтернет.	Орієнтація на онлайн-маркетинг, створення англomовного контенту для виходу на міжнародні майданчики.
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева. Конкуренція з іншими виробниками навчальних роботів.	Постійне оновлення програмного забезпечення, щоб залишатися актуальним інструментом для навчання.
4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова. Конкуренція між різними типами роботів (гексаподи vs машинки vs маніпулятори).	Доводити переваги саме гексапода: вивчення складної кінематики та рівноваги, що неможливо на колісних роботах.
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова. Боротьба йде не стільки за ціну, скільки за функціонал та якість навчання.	Інвестувати в розробку якісних методичних матеріалів та відеоуроків, а не лише знижувати ціну.

Аналіз конкурентного середовища підтверджує доцільність обрання стратегії диференціації. Оскільки ринок є насиченим, пряма цінова конкуренція є неефективною. Стартап повинен фокусуватися на нецінових перевагах: інтелектуальній складовій продукту, відкритості платформи та спільноті розробників, позиціонуючи гексапод не як іграшку, а як доступний науковий інструмент.

Після загального аналізу конкурентного середовища проводиться детальна оцінка привабливості галузі та інтенсивності конкуренції за моделлю п'яти сил М.

Портера. Цей інструмент дозволяє ідентифікувати ключові ринкові загрози з боку постачальників, клієнтів, товарів-замінників та нових гравців. Результати аналізу для проєкту "EvoNex" наведено у Таблиці 6.10.

Таблиця 6.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Зміст аналізу	Навести перелік Прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з Боку замінників
Аналіз та висновки	1. Масові DIY-набори: Freenove, Adept. 2. Професійні платформи: Hiwonder, Unitree 3. Локальні освітні набори: (обмежена пропозиція в Україні). Інтенсивність: Висока. Ринок насичений дешевими китайськими аналогами. Конкурувати ціною важко, необхідна диференціація через унікальне ПЗ (генетичні алгоритми).	1. Студенти-мейкери: мають 3D-принтери та доступ до Open Source. 2. Китайські OEM-виробники: можуть швидко скопіювати дизайн. 3. ІТ-школи: можуть розробити власні прості набори. Можливості входу: Високі. Бар'єри входу низькі. Строки виходу: Короткі (3-6 місяців для копіювання механіки). Захист — у складності ПЗ та методичці.	1. Виробники електроніки: Raspberry Pi Foundation 2. Виробники сервоприводів: TowerPro - ринок насичений. 3. Постачальники пластику: ринок ABS/PLA величезний. Диктат умов: Середній. Постачальники пластику та моторів не диктують умов. Ризик є лише у дефіциті Raspberry Pi (диктують ціну та наявність).	1. ВНЗ та коледжі: держзамовлення, тендери. 2. Приватні школи робототехніки. 3. Індивідуальні ентузіасти. Диктат умов: Високий. ВНЗ вимагають документацію та методичне забезпечення. Ентузіасти чутливі до ціни та вимагають підтримки спільноти.	1. Колісні роботи: 2. Віртуальні симулятори: Gazebo, Webots 3. Дрони/Квадрокоптери: альтернатива для вивчення робототехніки. Обмеження: Значні. Товари-замінники (колісні роботи) значно дешевші. Необхідно доводити перевагу саме <i>крокуючої</i> платформи (вивчення кінематики, прохідність).

Проте, проект має потенціал для успіху за умови реалізації стратегії диференціації: створення доданої вартості не за рахунок механіки, а за рахунок унікального програмного забезпечення (генетичні алгоритми) та методичного супроводу, що зменшує силу впливу конкурентів та товарів-замінників.

На основі аналізу конкурентного середовища та вимог споживачів визначено ключові фактори, які забезпечать ринковий успіх проекту. У Таблиці 6.11 наведено обґрунтування конкурентоспроможності, що базується на поєднанні низької вартості апаратної частини та унікальної цінності програмного забезпечення.

Таблиця 6.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор значущим)
1.	Інтелектуальна автономність	Чинники: Використання генетичних алгоритмів дозволяє роботу самостійно навчатися ходити, адаптуючись до пошкоджень або зміни поверхні. Значущість: Це ключова відмінність від масових наборів, які працюють лише за жорстко прописаним скриптом. Це перетворює робота з іграшки на науковий інструмент.
2.	Економічна доступність	Чинники: Використання бюджетних сервоприводів MG90S та технології 3D-друку. Значущість: Знижує поріг входу для студентів та українських ВНЗ, які не можуть дозволити собі професійні платформи вартістю \$500+.
3.	Модульність та ремонтпридатність	Чинники: Корпус виготовляється з ABS-пластику на 3D-принтері. Усі деталі є взаємозамінними. Значущість: Критично важливо для освітнього процесу, де обладнання часто ламається. Користувач може сам "надрукувати" нову ногу за ціною матеріалу (~20 грн), замість очікування дорогих запчастин з-за кордону.
4.	Відкрита архітектура	Чинники: Використання Python та Raspberry Pi. Значущість: Дозволяє дослідникам та студентам модифікувати код ядра, підключати власні сенсори (лідари, камери) та використовувати робота для написання наукових робіт.

Визначені фактори підтверджують, що проект займає унікальну нішу "доступної науки", пропонуючи функціонал дорогих дослідницьких платформ за ціною навчальних наборів.

Для кількісної оцінки ринкових позицій проведено бальне оцінювання сильних та слабких сторін стартап-проекту у порівнянні з ключовими конкурентами. Результати наведено у Таблиці 6.12.

Таблиця 6.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Шестиногий робот»

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (вага фактора)	Рейтинг конкурента: Професійний робот	Рейтинг конкурента: Масовий DIY-набір	Сила/слабкість проекту
I. Функціонально-технічні фактори					
1.	Наукова цінність ПЗ (Генетичні алгоритми, самонавчання)	18	+3	-4	Сильна
2.	Механічна надійність (Матеріали, сервоприводи)	15	+5	-2	Слабка
3.	Обчислювальна потужність (Контролер)	14	+4	-3	Сильна
II. Економічні фактори					
4.	Цінова доступність	20	-5	+4	Сильна
5.	Вартість ремонту/експлуатації	15	-3	+2	Сильна
III. Маркетингові фактори					
6.	Гнучкість для модифікацій (Open Source)	4	-2	+2	Сильна

Аналіз показує чітку картину конкурентного позиціонування:

1. *Основна слабкість (-2 бали):* Механічна частина. Використання дешевих сервоприводів MG90S робить робота менш витривалим і точним у порівнянні з професійними металевими аналогами (+5 балів).

2. *Основна сила (+5 балів):* Програмне забезпечення та наукова цінність. Проєкт перевершує масові набори, які не мають інтелектуальної складової, і конкурує з професійними платформами завдяки відкритості коду.

3. *Економічна перевага (+4 бали):* Проєкт значно доступніший за професійні аналоги, знаходячись в одній ціновій категорії з простими іграшками, але пропонуючи значно ширший функціонал.

Таким чином, стратегія розвитку повинна будуватися на компенсації механічної слабкості інтелектуальною силою, позиціонуючи продукт як "Розумний софт на доступному залізі".

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу - матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 6.12).

Таблиця 6.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони (S) – внутрішні переваги	Слабкі сторони (W) – внутрішні обмеження
S1. Інноваційне ПЗ: Використання генетичних алгоритмів для адаптації руху, що відсутнє у бюджетних аналогів.	W1. Обмежена потужність: Мікроконтролер STM32F103 може бути перевантажений складними обчисленнями.
S2. Відкрита архітектура: Можливість повної модифікації коду та «заліза» (Open Source), що критично важливо для науковців.	W2. Бюджетна механіка: Використання недорогих сервоприводів знижує точність позиціонування порівняно з професійними аналогами.
S3. Цінова доступність: Низька собівартість завдяки використанню дешевших двигунів та 3D-друку (дешевше за PhantomX).	W3. Відсутність бренду: Проект не має репутації на ринку, на відміну від відомих виробників (Interbotix, Hiwonder).
S4. Модульність: Легка заміна деталей корпусу та сенсорів завдяки уніфікованим кріпленням.	W4. Залежність від імпорту: Критична залежність від постачання електроніки з-за кордону.
S5. Інтеграція з симуляторами: Підтримка Webots для безпечного тестування алгоритмів без ризику пошкодити роботу.	W5. Обмежені фінанси: Фінансування лише за рахунок власних коштів команди на старті.
Можливості (O) – зовнішні сприятливі фактори	Загрози (T) – зовнішні несприятливі фактори
O1. Ріст ринку STEM: Глобальне зростання попиту на навчальну робототехніку).	T1. Демпінг з Китаю: Поява дешевих копій від великих виробників, з якими важко конкурувати ціною.
O2. Попит на подвійне призначення: Актуальність автономних платформ для розвідки та моніторингу в Україні.	T2. Технологічне старіння: Швидкий розвиток методів навчання (наприклад, End-to-End RL) може зробити поточний підхід застарілим.
O3. Грантова підтримка: Наявність програм для фінансування Defense Tech та інновацій.	T3. Проблеми логістики: Збої у ланцюгах постачання електроніки.
O4. Тренд на DIY: Популярність 3D-друку дозволяє продавати цифрові моделі замість фізичних деталей, розширюючи географію	T4. Низькі бюджети ВНЗ: Бюрократичні перепони та брак коштів у державних

збуту.	навчальних закладів.
O5. Дефіцит відкритих платформ: Науковці потребують доступних робіт для тестування ІІІ, оскільки існуючі рішення або занадто дорогі, або закриті.	T5. Кадровий голод: Складність залучення кваліфікованих програмістів у стартап на ранніх етапах.

На основі проведеного SWOT-аналізу можна зробити висновок, що стартап-проект має високий потенціал для ринкової комерціалізації, але потребує чіткої стратегії для нівелювання технологічних та ринкових ризиків.

1. Конкурентна перевага (Синергія S + O): Головною силою проекту є інтелектуальна складова (генетичні алгоритми), яка у поєднанні зі зростаючим попитом на відкриті дослідницькі платформи, дозволяє зайняти вільну нішу між дорогими професійними роботами (PhantomX) та простими іграшками. Відкрита архітектура робить продукт ідеальним для університетів, що дозволяє використати можливість отримання грантового фінансування для подальшої розробки.

2. Стратегія захисту (S + T): Основною загрозою є конкуренція з боку дешевих китайських аналогів. Протидіяти цьому слід через диференціацію продукту: не намагатися конкурувати лише ціною ("залізом"), а продавати цінність програмного забезпечення та навчальних матеріалів. Використання модульності та 3D-друку дозволяє знизити залежність від логістики — у випадку перебоїв з поставками корпусів, клієнт може надрукувати їх самостійно.

3. Напрями вдосконалення (W + O): Слабкою стороною є апаратні обмеження (бюджетні сервоприводи та контролер). Цю проблему доцільно вирішувати шляхом створення лінійки продуктів:

- *Базова версія (Low-cost)* для шкіл (на існуючій базі).
- *Pro-версія* для науковців та військових задач (із залученням грантових коштів для переходу на потужніші STM32F4/F7 та якісніші сервоприводи).

Реалізація проекту є доцільною. Рекомендована стратегія - сфокусована диференціація. Стартапу слід зосередитися на сегменті освіти та науки (B2B/B2G), де цінується можливість модифікації коду та алгоритмічна складність, а не на масовому споживчому ринку іграшок.

На основі здійсненого SWOT-аналізу та визначених сильних сторін, загроз і можливостей слід розробити кілька стратегічних варіантів ринкової поведінки проекту. Кожна з альтернатив оцінюється з огляду на складність залучення необхідних ресурсів та часові межі реалізації. Обрання найбільш відповідної стратегії дасть змогу знизити ризики та максимально ефективно використати конкурентні переваги проекту. Варіанти ринкового впровадження наведено у таблиці 6.14.

Таблиця 6.14. Альтернативи ринкового впровадження

№	Альтернатива (Стратегія)	Ймовірність ресурсів	Строки (міс.)	Чому підходить/не підходить вашому гексаподу
1.	Стратегія "AI-Education Kit". Продаж комплекту деталей + ПЗ для навчання нейромереж/генетичних алгоритмів. Ціль: ВНЗ, курси робототехніки.	Висока. У вас вже є 3D-модель і код. Потрібно лише упакувати це в методичку.	3-6	Оптимально. Це ваша ніша. Ви не конкуруєте з Boston Dynamics "залізом", ви конкуруєте "розумом" і ціною.
2.	Стратегія "Готовий робот-помічник". Спроба продавати зібраного робота для виконання домашніх завдань (наприклад, моніторинг квартири).	Низька. MG90S занадто слабкі і шумні для реальної роботи.	12	Не підходить. Для цього потрібні дорогі мотори і батареї.
3.	Стратегія "Тільки ПЗ". Продаж коду генетичних алгоритмів для інших роботів.	Середня.	6-9	Ризиковано. Код легко скопіювати. Без "заліза" його важко продати дорого.

Для реалізації проекту обрано Стратегію 1 (AI-Education Kit). На відміну від нестабільних роботів-собак, гексапод є механічно стійкою платформою. Це дозволяє змістити фокус з боротьби за рівновагу на вивчення інтелектуальних алгоритмів. Продукт позиціонується не як іграшка, а як доступний навчальний

стенд для дослідження еволюційної робототехніки, де користувач бачить, як генетичний алгоритм оптимізує рухи робота в реальному часі.

6.3 Розроблення ринкової та маркетингової стратегії проекту

Розробка ефективної ринкової стратегії розпочинається з вибору цільових сегментів, на яких стартап зосередить свої обмежені ресурси. Враховуючи специфіку продукту, необхідно обрати ті групи, які готові сприймати продукт не як за "іграшку", а за знання та можливості модифікації гексаподного робота.

У Таблиці 6.15 наведено вибір цільових груп споживачів.

Таблиця 6.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ з/п	Профіль цільової групи	Готовність сприйняти продукт	Орієнтовний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота входу в сегмент
1.	Заклади вищої освіти (B2B): Кафедри робототехніки, комп'ютерних наук, STEM-лабораторії. Шукають недорогі стенди для лабораторних робіт з ІІІ.	Висока. Гостра потреба у фізичних моделях для демонстрації роботи нейромереж та генетичних алгоритмів.	Середній. Попит стабільний, залежить від навчальних планів та грантового фінансування.	Низька. Професійні роботи занадто дорогі (\$5000+), а іграшки — занадто прості. Ніша вільна.	Середня. Потребує підготовки методичних матеріалів, участі у тендерах, бюрократичні процедури.
2.	Індивідуальні розробники / Мейкери (B2C): Програмісти, ентузіасти DIY, студенти. Цінують Open Source та можливість "колупатися" в коді.	Висока. Спільнота активно шукає складні проекти на Raspberry Pi для саморозвитку.	Високий. Імпульсивний попит, залежить від якості реклами та "хайпу" навколо ІІІ.	Висока. Конкуренція з дешевими китайськими наборами з AliExpress.	Висока. Легкий вхід через соцмережі, GitHub, YouTube.
3.	ІТ-школи та курси (B2B): Приватні гуртки робототехніки для підлітків.	Середня. Потребують адаптованого (спрощеного) контенту.	Зростаючий. Ринок EdTech активно росте.	Середня. Конкуренція з LEGO Mindstorms.	Висока. Прямі продажі власникам шкіл.

За результатами аналізу обрано стратегію концентрованого маркетингу з фокусом на сегменті B2B як найбільш стабільному та платоспроможному, із паралельним розвитком спільноти B2C для популяризації майбутнього бренду та вдосконалення коду.

Далі необхідно визначити базову стратегію розвитку (Таблиця 6.16).

Таблиця 6.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ з/п	Обрана альтернатива (Стратегія охоплення ринку)	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку (за Портером)
1.	Стратегія "Smart Lab" (B2B): Фокус на наданні комплексного рішення для навчання (Робот + Методичка + Курс Python).	Унікальна навчальна цінність (вивчення генетичних алгоритмів), яку не пропонують конкуренти.	Стратегія диференціації. (Ми відрізняємося інтелектом, а не ціною).
2.	Стратегія "Open Evolution" (B2C): Залучення спільноти до покращення коду через GitHub.	Відкритість архітектури, використання популярних компонентів (Raspberry Pi), ремонтпридатність.	Стратегія диференціації. (Ми продаємо платформу для творчості, а не закритий продукт).

Для стартапу обрано стратегію диференціації. Конкурувати виключно за ціною з масовими китайськими виробниками є ризикованим для малого бізнесу. Натомість, проєкт виділятиметься за рахунок унікального програмного забезпечення (самонавчання робота) та спеціалізації на освітніх потребах.

Таблиця 6.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ з/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих?	Чи буде компанія копіювати характеристики конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так, у ніші. Проєкт першим пропонує доступну платформу саме для вивчення генетичних алгоритмів ходи, а не просто програмування рухів.	Шукати нових. Залучення ВНЗ, які раніше не могли дозволити собі обладнання типу Boston Dynamics Spot для навчання студентів.	Копіювати принципи, а не продукт. Використовуються загальні принципи біоніки, але на значно дешевшій елементній базі.	Стратегія "Нішера" (Nicher). Зайняття вузької спеціалізованої ніші "доступна наукова робототехніка".

Обрана стратегія "Нішера" дозволяє уникнути прямого зіткнення з гігантами ринку. Стартап створює власний мікро-ринок "бюджетних дослідницьких платформ", де він є технологічним лідером.

Таблиця 6.18. Визначення стратегії позиціонування

№ з/п	Вимоги цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентні позиції	Вибір асоціацій (Позиціонування)
1.	ВНЗ (B2B): Хочуть "справжню науку", а не іграшку. Потрібен інструмент для дипломних робіт.	Диференціація	Використання реальних алгоритмів ШІ та машинного навчання.	1. Асоціація "Науковий інструмент": "Це ваша персональна лабораторія Штучного Інтелекту".
2.	Мейкери (B2C): Хочуть свободу дій, доступ до коду, можливість ремонту.	Диференціація	Open Source (Python), 3D-друк, Raspberry Pi.	2. Асоціація "Відкритість": "Робот, який належить вам на 100%. Кодуйте, змінюйте, друкуйте".
3.	Всі сегменти: Обмежений бюджет, чутливість до ціни.	Лідерство у витратах (в ніші)	Використання дешевих сервоприводів MG90S та ABS-пластику.	3. Асоціація "Доступність": "Технології майбутнього за ціною смартфона".

Таким чином, ринкова стратегія проєкту "Шестиногий робот" базується на позиціонуванні продукту як першої доступної платформи для еволюційної робототехніки. Головний акцент у просуванні робиться не на механічні характеристики, а на інтелектуальні можливості ПЗ та методичну цінність для освіти. Це дозволяє обґрунтувати ціну, вищу за вартість компонентів, та сформувати лояльну спільноту користувачів.

Наступний етап – це комплексна маркетингова програма, що слугує дорожньою картою від створення прототипу до масштабування бізнесу. Програма розроблена з урахуванням обраної стратегії «Нішера» та стратегії диференціації.

Метою програми є створення стійкої екосистеми навколо продукту, яка дозволить стартапу зайняти лідируючу позицію в сегменті доступної навчальної робототехніки, орієнтованої на вивчення штучного інтелекту.

Основою маркетингового комплексу є продукт, що пропонує споживачеві унікальну ціннісну пропозицію. В умовах насиченого ринку стартап фокусується

не на продажі компонентів, а на наданні комплексного інструменту для опанування технологій адаптивного руху та генетичних алгоритмів.

У Таблиці 6.19 визначено ключові переваги концепції товару, які формують його унікальну торгову пропозицію порівняно з конкурентами.

Таблиця 6.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ з/п	Потреба клієнта	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Потреба у глибокому Tech-навчанні: Студенти та інженери прагнуть зрозуміти принципи роботи біоніки та AI на практиці, а не в теорії.	Інтерактивна лабораторія. Користувач отримує платформу, де він виступає «тренером» робота, спостерігаючи роботу генетичних алгоритмів у реальному часі.	Інтелектуальна глибина. На відміну від конкурентів, що пропонують лише скриптовий рух, проєкт надає методологію створення адаптивного інтелекту, перетворюючи гру на науковий процес.
2.	Потреба у доступності R&D: Освітні заклади мають обмежені бюджети, але потребують складних кінематичних схем (12 DOF) для досліджень.	Професійний функціонал за доступною ціною. Використання 3D-друку та стандартних компонентів знижує поріг входу в 5-10 разів порівняно з промисловими аналогами.	Економічна ефективність. Продукт надає можливості платформ вартістю \$1000+ за ціною смартфона, відкриваючи ринок масової освіти.
3.	Потреба у кастомізації: Користувачі прагнуть мати можливість ремонтувати та модернізувати обладнання самостійно.	Повна ремонтпридатність. Концепція Open Hardware дозволяє користувачеві самостійно виготовляти запчастини на 3D-принтері.	Живучість екосистеми. Закриті продукти конкурентів стають непридатними після поломки. Даний продукт є «вічним конструктором», що стимулює інженерну творчість.

Для чіткого розуміння структури пропозиції розроблено трирівневу модель товару (Таблиця 6.20). Це дозволяє трансформувати технічний виріб у завершене ринкове рішення з високою доданою вартістю.

Таблиця 6.20. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Навчально-дослідницька платформа автономного пересування. Основна вигода: можливість вивчення та тестування адаптивних алгоритмів руху (ШП) на реальному фізичному об'єкті без необхідності створення робота «з нуля»		
II. Товар у реальному	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор

виконанні	1.Адаптивність руху -використання генетичних алгоритмів для оптимізації траєкторій під рельєф.	Нм	Тх
	2. Модульність конструкції -змінні деталі корпусу, виготовлені методом 3D-друку, що дозволяє легкий ремонт/модернізацію.	М	Вр
	3.Сумісність із симуляторами -можливість перевірки коду у середовищі Webots перед завантаженням у робота.	Нм	Тл
	4.Відкрита архітектура - Open Source код та креслення, що дозволяє користувачу змінювати продукт під себе.	Нм	Ор
	5. Енергоефективність - мінімізація споживання енергії завдяки оптимізованим алгоритмам руху.	Нм	Е
	Якість: стандарти, норми, параметри тестування: використання стандартних сервоприводів та мікроконтролерів, тестування координації кінцівок (наприклад, присідання) та електричної безпеки (СЕ).		
	Пакування: Картонна коробка з ложементом для фіксації деталей корпусу (3D-друк) та антистатичні пакети для електронних компонентів (контролер, сенсори) для продажу у вигляді DIY-набору (kit).		
ІІІ. Товар із підкріпленням	Марка: Організація-розробник: Стартап-команда на базі кафедри автоматизації та робототехніки. Інтелектуальний гексапод «Hexa-Gen»		
	До продажу: Демонстрація можливостей симуляції, консультації щодо підбору комплектації.		
	Після продажу: 1. Доступ до репозиторію з кодом та оновленнями ПЗ. 2. Надання STL-файлів для самостійного друку запчастин. 3. Технічна підтримка через онлайн-спільноту/форум.		

Стратегія ціноутворення передбачає використання методу «цінового проникнення» з подальшим переходом до ціноутворення на основі цінності. Мета - забезпечити доступність продукту для студентської аудиторії, зберігаючи достатню маржинальність для масштабування бізнесу.

Аналіз цінових меж ринку наведено у Таблиці 6.21.

Таблиця 6.21. Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межі ціни
Прості конструктори / Колісні роботи:	Професійні гексаподи (Hiwonder /	Студенти/Мейкери: Готові інвестувати в освіту/хобі до 6 000 – 8 000 грн.	Нижня межа: 4 000 грн

1 500 – 3 500 грн.	PhantomX): 15 000 – 40 000+ грн.	ВНЗ (Лабораторії): Бюджет на дрібні закупівлі до 20 000 грн дозволяє купувати декілька комплектів.	Верхня межа: 8 500 гр Цільова ціна: 5 900 – 6 900 грн.
--------------------	---	--	---

Для ефективного охоплення ринку пропонується омніканальна система збуту, що поєднує прямі продажі інституційним клієнтам та використання e-commerce для масового ринку. Така структура дозволяє масштабуватися як локально, так і глобально (через продаж цифрових активів).

Систему збуту сформовано у Таблиці 6.22.

Таблиця 6.22. Формування системи збуту

№ з/п	Специфіка клієнтів	Функції збуту	Глибина каналу	Оптимальна система збуту
1.	B2B (ВНЗ, STEM-школи): Потребують договорів, безготівкового розрахунку, гуртових партій.	Укладання контрактів, участь у тендерах, технічний консалтинг.	Нульовий рівень	Відділ корпоративних продажів. Прямі співпраця з кафедрами. Пропозиція «Клас під ключ» (комплект робіт + методичні матеріали).
2.	B2C (Україна): Звикли до швидкої доставки, післяплати, маркетплейсів.	Логістика «останньої милі», клієнтська підтримка.	Однорівневий канал.	E-commerce. Власний інтернет-магазин та присутність на ключових маркетплейсах (Rozetka, Prom).
3.	B2C (Глобальний ринок): Висока платоспроможність, інтерес до DIY-проектів.	Цифрова дистрибуція (файли, код).	Глобальні платформи.	Digital Sales. Продаж STL-файлів та інструкцій на платформах (Etsy, Cults3D). Експорт електроніки через eBay.

Комунікаційна політика базується на контент-маркетингу та побудові спільноти (Community Building). Замість традиційної прямої реклами стартап використовує освітній контент, демонструючи експертність та наукову цінність продукту.

Концепцію комунікацій представлено у Таблиці 6.23.

Таблиця 6.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ з/п	Цільова аудиторія	Канали комунікацій	Ключове повідомлення (Message)	Завдання рекламного звернення
1.	Tech-ентузіаста та Мейкери	YouTube / TikTok / Shorts: Відео демонстрації еволюції робота (Timelapse навчання). GitHub: Публікація частини відкритого коду.	«Не купуй іграшку. Створи власний штучний інтелект. Завантаж код, надрукуй деталі, навчи його еволюціонувати.»	Створити вірусний ефект та wow-фактор. Залучити трафік на сайт через демонстрацію унікальних можливостей ПЗ.
2.	Академічна спільнота (ВНЗ)	Наукові конференції: Презентація методичних розробок. Linkedin: Кейси впровадження в навчальний процес.	«Готова лабораторія еволюційної робототехніки за ціною ноутбука. Залучайте студентів сучасними технологіями.»	Побудова довіри та репутації експерта. Демонстрація відповідності продукту навчальним планам.
3.	Батьки та приватні школи	Соціальні мережі (Target): Реклама на аудиторію батьків, зацікавлених у IT-освіті дітей.	«Інвестиція в майбутнє. Сьогодні дитина збирає гексапода, завтра - програмує складні системи.»	Емоційний продаж з акцентом на корисності навичок (Python, робототехніка) для майбутньої кар'єри.

Розроблена маркетингова програма створює цілісну стратегію виходу на ринок. Продукт позиціонується в унікальній ніші між простими іграшками та дорогим професійним обладнанням. Цінова політика забезпечує доступність для цільової аудиторії при збереженні прибутковості, а гібридна система збуту дозволяє масштабувати бізнес за межі локального ринку вже на ранніх етапах. Стратегія просування через контент та спільноту забезпечує органічне зростання впізнаваності бренду.

6.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності

Для комерціалізації проекту «Шестиногий робот» розроблено бізнес-модель, яка описує логіку отримання прибутку. В основі моделі лежить продаж

апаратних наборів (Hardware kits) для навчання та надання доступу до унікального програмного забезпечення.

Для візуалізації логіки функціонування стартапу розроблено канву бізнес-моделі (Business Model Canvas), наведену в таблиці 6.24.

Таблиця 6.24. Бізнес-модель Canvas стартап-проекту

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Цінісна пропозиція	Відносини з клієнтами	Сегменти клієнтів
Постачальники електроніки (сервоприводи, RPi). ВНЗ та освітні хаби. Спільноти мейкерів (GitHub, форуми).	R&D (вдосконалення алгоритмів). Виробництво (3D-друк, комплектація). Маркетинг та створення контенту. Технічна підтримка. Ключові ресурси Інтелектуальна власність (код). Обладнання (3D-принтери). Команда розробників. Веб-ресурс.	Доступна платформа для вивчення генетичних алгоритмів та ІІІ. Відкрита архітектура (Open Source). Модульність та ремонтпридатність.	Онлайн-спільнота. Технічна підтримка через форум. Спільна розробка (Community contribution). Канали збуту Прямі продажі (ВНЗ). Інтернет-магазин / Маркетплейси. Платформи цифрового контенту.	B2B: ВНЗ, коледжі, STEM-школи. B2C: Студенти, інженери, мейкери, ентузіасти робототехніки.
Структура витрат			Потоки доходів	
Закупівля комплектуючих. Матеріали для 3D-друку. Маркетинг та реклама. Логістика. Розробка ПЗ.			Продаж готових наборів (Full Kit). Продаж наборів для збірки (DIY Kit). Продаж цифрових моделей (STL-файли).	

Аналіз розробленої бізнес-моделі Canvas свідчить про те, що стартап фокусується на створенні унікальної ціннісної пропозиції через поєднання доступної апаратної платформи та інтелектуального програмного забезпечення. Обрана модель дозволяє диверсифікувати потоки доходів за рахунок роботи одночасно на B2B (навчальні заклади) та B2C (мейкери) ринках, знижуючи комерційні ризики. Орієнтація на спільноту та відкриту архітектуру (Open Source) сприяє органічному просуванню продукту та зменшенню витрат на технічну підтримку, що робить бізнес масштабованим та інвестиційно привабливим.

Наступним кроком є планування реалізації проекту. Календарний план-графік (табл. 6.25) передбачає поетапний запуск стартапу протягом першого року.

Таблиця 6.25. Календарний план-графік реалізації стартап-проекту

Етап	Тривалість (міс.)	Зміст робіт
1.Розроблення MVP і тестування	1-3	Створення і підтвердження технічної можливості реалізації адаптивної ходи.
2.Прототипування	1-3	Фіналізація конструкції, тестування генетичних алгоритмів, оптимізація друку.
3.Підготовка виробництва	4	Закупівля комплектуючих (Raspberry Pi, сервоприводи), налагодження 3D-друку.
4.Маркетинг та Presale	4-5	Створення сайту, демо-відео, збір попередніх замовлень.
5.Старт продажів	6	Відвантаження перших партій DIY-наборів.
6.Масштабування	7-12	Вихід на B2B клієнтів (ВНЗ), розробка методичних матеріалів.

Аналіз календарного план-графіку демонструє, що реалізація стартап-проекту розрахована на 12 місяців і має чітку етапність. Використання технологій швидкого прототипування (3D-друк) дозволяє скоротити етап підготовки виробництва до 4 місяців, забезпечуючи швидкий вихід на ринок (Time-to-Market). План передбачає поступове масштабування від роздрібних продажів DIY-наборів до системної співпраці з освітніми закладами, що мінімізує операційні ризики на стартовому етапі.

Для запуску проекту необхідно сформувати стартовий капітал. Розрахунок початкових інвестицій (Таблиця 6.26) проведено з урахуванням актуальних

ринкових цін на електроніку та логістику. Основну частку витрат становить закупівля компонентів для першої партії, оскільки оптові знижки на малих обсягах є незначними.

Таблиця 6.26. Розрахунок початкових інвестицій

Стаття витрат	Сума, грн	Примітка
Обладнання (3D-принтер, інструменти)	22 000	Надійний FDM принтер (типу Creality/Elegoo) + набір інструментів для монтажу
Закупівля першої партії комплектуючих	55 000	Електроніка на 10 роботів (RPI, сервоприводи, драйвери, акумулятори)
Маркетинг та створення веб-ресурсу	20 000	Розробка Landing Page, налаштування таргетованої реклами, контент
Реєстрація та адмін. витрати	8 000	Відкриття ФОП, сплата єдиного податку та ЄСВ за перші місяці
Непередбачувані витрати (резерв)	15 000	Резервний фонд (12,5%) на випадок коливання курсу валют або браку деталей
РАЗОМ	120 000	Загальна потреба в фінансуванні (~\$2 900)

Для оцінки економічної ефективності уточнено структуру собівартості та ціноутворення.

Змінні витрати на одиницю продукції розраховано, виходячи з поточних цін:

- Мікрокомп'ютер: ~3200 грн.
- Комплект сервоприводів: ~1400 грн.
- Контролер, живлення (BEC), акумулятор, кріплення: ~800 грн.
- Пластик та витратні матеріали: ~200 грн.

Разом собівартість: 5 600 грн.

Планова ціна реалізації встановлена на рівні 8 900 грн. Це дозволяє залишатися в ніші "до 10 000 грн", будучи значно дешевшим за професійні аналоги (\$500+), але покривати витрати на залучення клієнта.

Маржинальний прибуток з одиниці: $\$8\,900 - 5\,600 = 3\,300\$$ грн.

Постійні витрати (рекламний бюджет, підтримка сайту, амортизація обладнання, зв'язок) заплановано на рівні 8 000 грн/міс.

Таблиця 6.27. Показники економічної ефективності проекту

Показник	Значення
Собівартість одиниці продукції (змінні витрати), грн	5 600
Ціна реалізації, грн	8 900
Прибуток з одиниці (Маржа), грн	3 300
Точка беззбитковості (у натуральному виразі), шт/міс	3
Рентабельність продукції, %	37%
Термін окупності проекту (при продажі 10 шт/міс), міс	~ 5 місяців

Розрахунки демонструють реалістичну модель бізнесу. Точка беззбитковості складає 3 роботи на місяць ($8000 / 3300 \approx 2.42$), що є досяжним показником для одного каналу продажів. При реалізації планового обсягу (10 шт./міс) чистий операційний прибуток складе: $(10 * 3300) - 8000 = 25\,000$ грн/міс, що дозволяє окупити стартові інвестиції менше ніж за пів року.

Аналіз фінансових показників підтверджує, що навіть за умов зростання вартості комплектуючих проект зберігає інвестиційну привабливість. Рентабельність на рівні 37% є достатньою для покриття операційних ризиків, а низький поріг беззбитковості (3 одиниці) дозволяє стартапу функціонувати без значного зовнішнього фінансування після запуску.

Висновки до розділу 6

Проведений у розділі комплексний маркетинговий та техніко-економічний аналіз підтверджує доцільність реалізації стартап-проекту «Шестиногий робот». Ринок освітньої робототехніки демонструє стабільне зростання, зумовлене глобальним попитом на фахівців зі штучного інтелекту та робототехніки. Існуючі на ринку рішення поляризовані: це або дорогі професійні платформи, або примітивні іграшки без можливості глибокої модифікації. Розроблений проект успішно заповнює цю нішу, пропонуючи функціонал адаптивного руху на базі генетичних алгоритмів за ціною доступного навчального набору.

Технологічний аудит показав, що обраний стек технологій, а саме використання адитивного виробництва та доступної елементної бази, що дозволяє мінімізувати виробничі ризики та забезпечити високу ремонтпридатність продукту. Це є критично важливим фактором конкурентоспроможності для цільової аудиторії, яка включає заклади вищої освіти та індивідуальних розробників-ентузіастів. Відкрита архітектура продукту створює додаткову цінність, формуючи навколо бренду спільноту користувачів.

Для ринкового впровадження обрано стратегію диференціації, яка базується на унікальних характеристиках програмного забезпечення – здатності робота до самонавчання. Це дозволяє уникнути прямої цінової конкуренції з масовими китайськими виробниками. Маркетингова програма передбачає використання омніканальної системи збуту, що поєднує прямі продажі навчальним закладам та онлайн-реалізацію через спеціалізовані платформи. Комунікаційна стратегія фокусується на контент-маркетингу та демонстрації експертності команди розробників.

Розрахунок показників економічної ефективності свідчить про високу інвестиційну привабливість стартапу. Завдяки низьким капітальним витратам на старті та високій маржинальності продукту, проект характеризується швидкою окупністю та низькою точкою беззбитковості. Бізнес-модель є стійкою до коливань ринку завдяки можливості диверсифікації джерел доходу, включаючи продаж компонентів та цифрового контенту. Подальша імплементація проекту є економічно обґрунтованою та перспективною.[37]

ВИСНОВКИ

Основні результати дослідження

У межах магістерської роботи було проведено комплексний аналіз сучасного стану досліджень у галузі гексаподної робототехніки, методів оптимізації руху та інструментів віртуального моделювання. Це дозволило

сформувати методологічну базу для подальшої розробки й перевірки удосконалених алгоритмів управління.

1. Обґрунтовано актуальність дослідження. Встановлено, що складність кінематичної структури гексаподів (роботів із шістьма ногами) вимагає застосування 3D-середовищ моделювання, які забезпечують точну перевірку кінематичних і динамічних характеристик перед фізичною реалізацією.

2. Проведено структурний аналіз гексапода. Детально досліджено конструктивні особливості: механічну підсистему з двома ступенями вільності (2 DOF) на ногу, систему приводів і сенсорний комплекс (IMU, датчики навантаження). Визначено, що симетрична структура і 2 DOF кінцівок забезпечують підвищену стабільність та маневреність.

3. Систематизовано алгоритми ходи. Розглянуто три основні типи гейту:

- *Tripod gait* — максимальна швидкість, середня стабільність, оптимальний для рівних поверхонь;
- *Wave gait* — максимальна стабільність, мінімальна швидкість, ефективний на пересіченій місцевості;
- *Ripple gait* — компроміс між швидкістю та стійкістю.

Встановлено, що вибір типу ходи залежить від вимог до стабільності, швидкості й енергоефективності.

4. Досліджено методи оптимізації траєкторій. Генетичні алгоритми (GA) показали високу ефективність для налаштування параметрів ходи.

5. Обрано оптимальні інструменти моделювання. Проведено порівняння 3D-середовищ (Webots, Gazebo, CoppeliaSim, Unity, Matlab Simscape). Обґрунтовано вибір Webots як базового середовища, що є зручним для розробки та візуалізації.

Практичні рекомендації

1. Для моделювання:
 - Використовувати Webots для швидкої реалізації базових алгоритмів ходи (Tripod, Wave).
 - Використовувати URDF-модель як уніфікований формат для обох середовищ, що забезпечує узгодженість результатів.
2. Для розробки алгоритмів:
 - Використовувати генетичний алгоритм (GA) для оптимізації параметрів гейту (висота підйому ноги, фазовий зсув, довжина кроку) за багатоцільовою функцією, яка враховує енергоефективність, стабільність і швидкість.
3. Для конструктивних удосконалень:
 - Оптимізувати геометрію кінцівок і розподіл маси корпусу, зменшуючи центр ваги для підвищення стійкості.
 - Використовувати легкі, стійкі матеріали та гнучкі шарніри для зменшення навантаження на серводвигуни.

Перспективи подальших досліджень

1. Sim-to-Real перевірка: Реалізувати фізичний прототип гексапода на базі Raspberry Pi та провести порівняння результатів симуляції з реальними експериментами.
2. Кооперативна робототехніка: Дослідити координацію групи гексаподів у спільних завданнях (перенесення вантажів, пошук і рятування).
3. Енергетична модель: Розробити модель енергоспоживання сервоприводів і включити її до функції оптимізації для підвищення автономності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. PhantomX Hexapod (Trossen Robotics) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/figure/Trossen-Robotics-PhantomX-hexapod-a-leg-enumeration-rendered-and-simulated-in-ROS_fig1_348023505.
2. Vincross Hexa [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ifdesign.com/en/winner-ranking/project/vincross-hexa-robot/200299>.
3. Boston Dynamics RHex [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.roboticstoday.com/robots/rhex>.
4. Fundamentals of Hexapod Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hackaday.io/project/21904-hexapod-modelling-path-planning-and-control/log/62326-3-fundamentals-of-hexapod-robot>.
5. Hexapod Robot Gait Switching for Energy Consumption and Cost of Transport Management Using Heuristic Algorithms / M. Luneckas et al. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 3. – 1339.
6. Static Stability Analysis of Hexagonal Hexapod Robot for the Periodic Gaits // IJCCCE. – 2014. – Vol. 14, No. 3. – Режим доступу: <https://iasj.rdd.edu.iq/journals/uploads/2024/12/28/b95846b947170c91a74b3e0fdcbf54b3.pdf>.
7. Hexapod emerging gait patterns [Електронний ресурс]. – ResearchGate. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/275974702_Hexapod_emerging_gait_patterns.
8. Ripple Gait Sequential Pattern [Електронний ресурс]. – ResearchGate. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/241625363_Ripple_Gait_Sequential_Pattern.
9. Gait patterns of hexapod robot [Електронний ресурс] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 3. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1339>.

10. Gait Optimization for Legged Systems Through Mixed Methods [Электронный ресурс] // arXiv. – 2024. – Режим доступа: <https://arxiv.org/html/2410.02891v1>.
11. Optimization of Hexapod Locomotion Using Genetic Algorithms [Электронный ресурс]. – ResearchGate. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/258918645_Optimization_of_Hexapod_Locomotion_Using_Genetic_Algorithms.
12. Parameters optimization of central pattern generators for hexapods / B. Wang et al. // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2021. – Режим доступа: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/17298814211044934>.
13. Trajectory Optimization for Legged Robots with Slipping [Электронный ресурс] / J. Carius et al. – Режим доступа: <https://vladlen.info/papers/legged-slipping.pdf>.
14. Adaptive interlimb coordination in hexapod robots: A review / S. Aoi et al. // Frontiers in Neurorobotics. – 2017. – Vol. 11.
15. Coumans E. PyBullet, a Python module for physics simulation in robotics, games and machine learning [Электронный ресурс] / E. Coumans, Y. Bai. – 2016–2021. – Режим доступа: <https://pybullet.org>.
16. Official NVIDIA Isaac Sim Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.omniverse.nvidia.com/isaacsim/latest/index.html>.
17. Todorov E. MuJoCo: A physics engine for model-based control / E. Todorov, T. Erez, Y. Tassa // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2012. – P. 5026–5033.
18. Simscape Multibody Documentation [Электронный ресурс] // MathWorks. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sm/>.
19. Seven Widely Used Open-Source Robotics Platforms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://encyclopedia.pub/entry/43424>.
20. Why is Gazebo very famous in the ROS community? what about Webots? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://discourse.openrobotics.org/t/why-is-gazebo-very-famous-in-the-ros-community-what-about-webots/42459>.

21. Best simulation tools for robotics engineers: A comprehensive review [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://roboticsbiz.com/best-simulation-tools-for-robotics-engineers-a-comprehensive-review/>.
22. Руденко В. М. Основи робототехніки : навч. посіб. / В. М. Руденко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2018. – 312 с.
23. Мартиненко О. О. Генетичні алгоритми в задачах оптимізації технічних систем / О. О. Мартиненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2020. – № 69. – С. 45–53.
24. Webots User Guide R2023b [Електронний ресурс] // Cyberbotics Ltd. – 2024. – Режим доступу: <https://cyberbotics.com/doc/guide/index>.
25. Development and simulation of legged robots in Webots [Електронний ресурс]. – ResearchGate. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net>.
26. Gazebo Documentation [Електронний ресурс] // Open Robotics. – 2024. – Режим доступу: <https://gazebo.org/docs>.
27. Simulation-based analysis of hexapod locomotion using Gazebo [Електронний ресурс] // IEEE Access. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org>.
28. Webots User Guide R2023b [Електронний ресурс] // Cyberbotics Ltd. – 2024. – Режим доступу: <https://cyberbotics.com/doc/guide/index>.
29. Gazebo Official Manual [Електронний ресурс] // Open Robotics. – 2024. – Режим доступу: <https://gazebo.org>.
30. Comparative evaluation of robotic simulation platforms [Електронний ресурс] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12.
31. Simulation environments for legged robot locomotion // Springer Tracts in Advanced Robotics. – 2023.
32. Michel O. Webots: Professional Mobile Robot Simulation / O. Michel // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 39–42.

33. Smooth Gait Planning and Optimization for Multi-Legged Robots / C. Zhao et al. // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2021.
34. Stability Control for Hexapod Robots on Uneven Terrain / Y. Li et al. // IEEE Transactions on Robotics. – 2020.
35. Simulation and Control of a Hexapod Robot on Flat Terrain / G. Zhang, W. Li et al. // IEEE Access. – 2021.
36. Altendorfer R. RHex: A biologically inspired hexapod runner / R. Altendorfer, N. Moore, D. Koditschek // Autonomous Robots. – 2001. – Vol. 11. – P. 207–213.
37. Розроблення стартап-проекту : метод. рек. до викон. розд. магістер. дис. для студ. інж. спец. / за заг. ред. О. А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
38. Freenove Big Hexapod Robot Kit for Raspberry Pi [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://store.freenove.com/products/fnk0052>.
39. AdeepT RaspClaws Hexapod Spider Robot Kit for Raspberry Pi [Електронний ресурс] // RobotShop. – Режим доступу: <https://www.robotshop.com/products/adeept-raspclaws-hexapod-spider-robot-kit-raspberry-pi>.
40. HiwonderSpiderPi Pro: Raspberry Pi 5 AI Vision Hexapod Robot [Електронний ресурс] // Robotic Gizmos. – Режим доступу: <https://www.roboticgizmos.com/hiwonder-spiderpi-pro-raspberry-pi-5-robot/>.