

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

«На правах рукопису»
УДК 004.896, 007.52

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: «Багатофункціональний чотириногий робот»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПК-41мп

Сакута Анастасія Анатоліївна _____

Науковий керівник:

доцент, кандидат технічних наук

Галаган Роман Михайлович _____

Консультант з «Розробки стартап-проектів»:

д.е.н., проф., професор кафедри економічної кібернетики

Вовк Ольга Миколаївна _____

Рецензент:

доцент, с.н.с. кафедри КІТВП, кандидат технічних наук

Ключко Тетяна Реджинальдівна _____

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

Студент (-ка) _____

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
Сакута Анастасія Анатоліївна

1. Тема дисертації «Багатофункціональний чотириногий робот», науковий керівник дисертації Галаган Роман Михайлович доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. № 4793-с
2. Термін подання студентом дисертації 15.12.2025
3. Об'єкт дослідження: процес функціонування та адаптація чотиринокої платформи
4. Вихідні дані: тип приводів – серво MG966R, плата керування - Arduino Mega, вага - не більше 2 кг, матеріал корпусу - пластик PLA
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз сучасних чотириногих роботів і визначити основні принципи їхньої побудови та руху; адаптувати наявну 3D-модель під технічні вимоги прототипу; розробити систему керування рухом на базі мікроконтролера та серводвигунів; розробити власний програмний код та алгоритм координування кінцівок для реалізації базових рухів та статичного балансування; протестувати алгоритм руху на фізичному прототипі та оцінити стабільність його роботи; визначити напрями подальшої модифікації системи під спеціалізоване корисне навантаження.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 5 плакатів А4.

7. Орієнтовний перелік публікацій: публікація матеріалів конференції, стаття у журналі категорії Б

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., професор кафедри економічної кібернетики		

9. Дата видачі завдання 01.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання магістерської дисертації	07.09.2025	
2	Аналітичний огляд існуючих систем	21.09.2025	
3	Розробка структурної схеми	28.09.2025	
4	Підбір матеріалів та підходящої 3D моделі	12.10.2025	
5	Збір фізичного прототипу	02.11.2025	
6	Створення програмного коду та блок-схеми	07.11.2025	
7	Тестування прототипу	14.11.2025	
8	Розробка стартап-проекту	25.11.2025	
9	Формулювання висновків та оформлення пояснювальної записки	01.12.2025	

Студент

Анастасія САКУТА

Науковий керівник

Роман ГАЛАГАН

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. У сучасну епоху стрімкого розвитку інтелектуальних роботизованих систем чотириногі роботи займають особливе місце завдяки своїй високій маневреності та здатності адаптуватися до складних, небезпечних умов (зокрема, у військовій та пошуково-рятувальній сферах). Актуальність дослідження зумовлена подвійною потребою: у створенні доступних прототипів для навчання та у розробці універсальної апаратно-програмної основи, яку можна швидко та бюджетно модифікувати під спеціалізовані завдання (наприклад, інтеграція тепловізора, GPS, потужніших двигунів). Існуючі промислові аналоги, як-от Spot, є надто дорогими та мають закриту архітектуру, що унеможливорює їх широке використання як бази для R&D-прототипування в освітніх та дослідницьких установах. Саме тому розробка доступного і модифікованого прототипу має важливе стратегічне та практичне значення.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є створення та дослідження прототипу багатофункціонального чотириноного робота, який здатний здійснювати пересування за розробленими алгоритмами та служити доступною основою для подальшого розширення функціональності в напрямку автономного керування й використання у спеціалізованих місіях.

Для досягнення поставленої мети роботи потрібно вирішити ряд завдань:

- провести аналіз сучасних чотириногих роботів і визначити основні принципи їхньої побудови та руху;
- адаптувати наявну 3D-модель під технічні вимоги прототипу;
- розробити систему керування рухом на базі мікроконтролера та сервоприводів;
- розробити власний програмний код та алгоритм координування кінцівок для реалізації базових рухів та статичного балансування;
- протестувати алгоритм руху на фізичному прототипі та оцінити стабільність його роботи;

- визначити напрями подальшої модифікації системи під спеціалізоване корисне навантаження.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес функціонування мобільної чотиринової роботизованої платформи під час виконання базових рухів по рівних і злегка нерівних поверхнях, а також процес її адаптації до інтеграції різного типу корисного навантаження та спеціалізованих сенсорних систем.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є багатофункціональний чотириногий робот.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач проведено аналіз інформації про існуючі конструкції та стратегії керування чотириногими роботами. Здійснено кінематичні розрахунки системи, адаптацію та моделювання механічної конструкції, розробку програмного коду для мікроконтролера (Arduino Mega). Основні методи включають експериментальне визначення статичного балансування та тестування ітераційного алгоритму для оцінки стабільності прототипу.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна полягає у практичній реалізації прототипу чотиринового робота на основі спрощеної, але ефективної архітектури, а також у створенні власного програмного коду та алгоритму, який забезпечує послідовне координування роботи 12 сервоприводів та статичне балансування. Новизна створеної системи полягає у розробці відкритої, модульної платформи, яка є бюджетною основою для прототипування спеціалізованих мобільних комплексів.

Публікації. За використанням отриманих знань та результатів у кваліфікаційній роботі магістра було опубліковано працю конференції «Чотириногі роботи з функцією голосового управління» у збірник праць XXI Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». Також написана стаття "Перспективи розвитку чотириногих роботів із голосовим управлінням" в журналі категорії Б «Вісник Херсонського національного технічного університету» № 4/2025

Структура роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічних матеріалів. Пояснювальна записка містить вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Обсяг роботи: пояснювальна записка – 101 аркуші формату A4 та 2 аркуші формату A2, 13 ілюстрацій, 32 таблиці, було опрацьовано 22 джерела.

Ключові слова. Чотириногий робот, мехатроніка, статичне балансування, Arduino, R&D-платформа, Open-Source, кінематика, сервопривід.

ABSTRACT

Relevance of the topic. In the modern era of rapid development of intelligent robotic systems, quadrupedal robots occupy a special place due to their high maneuverability and ability to adapt to complex, dangerous conditions (in particular, in the military and search and rescue fields). The relevance of the research is determined by a dual need: to create affordable prototypes for training and to develop a universal hardware and software platform that can be quickly and inexpensively modified for specialized tasks (e.g., integration of a thermal imager, GPS, more powerful engines). Existing industrial analogues, such as Spot, are too expensive and have a closed architecture, which makes it impossible to use them widely as a basis for R&D prototyping in educational and research institutions. That is why the development of an affordable and modifiable prototype is of great strategic and practical importance.

Research objectives and tasks. The aim of the work is to create and study a prototype of a multifunctional quadrupedal robot that is capable of moving according to developed algorithms and serving as an affordable basis for further expansion of functionality in the direction of autonomous control and use in specialized missions.

To achieve the set goal, a number of tasks need to be solved:

- analyze modern quadrupedal robots and determine the basic principles of their construction and movement;
- adapt the existing 3D model to the technical requirements of the prototype;
- develop a motion control system based on a microcontroller and servo drives;
- develop proprietary software code and limb coordination algorithm for basic movements and static balancing;
- test the movement algorithm on a physical prototype and evaluate its stability;
- determine directions for further modification of the system for specialized payloads.

Object of study. The object of study is the process of functioning of a mobile quadruped robotic platform during the performance of basic movements on flat and slightly

uneven surfaces, as well as the process of its adaptation to the integration of various types of payloads and specialized sensor systems.

Subject of the study. The subject of the study is a multifunctional quadruped robot.

Research methods. To solve the set tasks, an analysis of information on existing designs and control strategies for quadrupedal robots was carried out. Kinematics calculations of the system, adaptation and modeling of the mechanical design, and development of software code for the microcontroller (Arduino Mega) were performed. The main methods include experimental determination of static balancing and testing of an iterative algorithm to evaluate the stability of the prototype.

Scientific novelty of the results obtained. The scientific novelty lies in the practical implementation of a quadruped robot prototype based on a simplified but effective architecture, as well as in the creation of proprietary software code and an algorithm that ensures the sequential coordination of 12 servo drives and static balancing. The novelty of the created system lies in the development of an open, modular platform, which is a budgetary basis for prototyping specialized mobile complexes.

Publications. Based on the knowledge and results obtained in the master's thesis, a conference paper entitled “Quadruped robots with voice control” was published in the collection of works of the XXI Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists “Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Making.” An article entitled “Prospects for the development of quadruped robots with voice control functionality” was also written in a category B journal “Bulletin of Kherson National Technical University” No. 4/2025.

Structure of the work. The master's thesis consists of an explanatory note and graphic materials. The explanatory note contains an introduction, 6 chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices. Scope of work: explanatory note – 101 A4 sheets and 2 A2 sheets, 13 illustrations, 32 tables, 22 sources were processed.

Keywords. Quadruped robot, mechatronics, static balancing, Arduino, R&D platform, Open-Source, kinematics, servo drive.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1: ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЧОТИРИНОГИХ РОБОТІВ.....	16
1.1. Аналіз конструктивних рішень та типів приводів крокуючих роботів	16
1.2. Проектні виклики та керування рухом чотириногих роботів	18
1.3. Методи керування рухом та адаптивні стратегії	19
1.3.1. Ієрархічні контролери та динаміка центроїдального імпульсу	19
1.3.2. Керування гібридними та мультимодальними системами.....	20
1.3.3. Глибоке навчання з підкріпленням (DRL)	20
1.4. Інженерні рішення та практичні аспекти розробки пошуково-рятувальних роботів.....	21
1.4.1. Гібридні конструкції та функціональна модульність	21
1.4.2. Адаптивне навантаження та стійкість	22
1.4.3. Оптимізація ресурсів та управління місією	23
1.4.4. Керування та сприйняття у змішаній реальності	24
Висновок до розділу	24
РОЗДІЛ 2: КІНЕТИКА ТА КІНЕМАТИКА СИСТЕМИ	26
2.1. Кінетика системи.....	26
2.1.1. Момент інерції	27
2.1.2. Момент навантаження.....	28
2.1.3. Вплив маси ніг та серводвигунів	29
2.1.4. Сумарний статичний момент	29
2.1.5. Момент прискорення.....	29

2.1.6. Повний (піковий) момент	30
2.1.7. Розрахунок для горизонтального тазового суглоба	30
2.2. Кінематика системи	31
2.2.1 Пряма кінематика однієї ноги	31
2.2.2 Зворотна кінематика однієї ноги.....	32
2.3. Кінематична схема	34
Висновок до розділу.....	36
РОЗДІЛ 3: РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ.....	37
3.1. Структурна схема та принцип роботи системи.....	37
3.2. Технологічна адаптація конструкції та процес складання.....	41
3.3. Розрахунок енергоспоживання та схема керування сервоприводами .	43
3.3.1. Розрахунок енергоспоживання сервоприводів	43
3.3.2. Архітектура силового живлення та підключення.....	44
Висновок до розділу.....	45
РОЗДІЛ 4: ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	47
4.1. Блок-схема та алгоритм керування кінематикою	47
4.2. Реалізація керуючого коду та аналіз базового функціоналу	49
Висновок до розділу.....	50
РОЗДІЛ 5: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ	
РЕЗУЛЬТАТІВ.....	51
5.1. Методика експериментального визначення статичного балансування..	51
5.2. Тестування функції координації кінцівок (присідання)	52
5.3. Аналіз обмежень та обґрунтування результатів	54
Висновок до розділу.....	54

РОЗДІЛ 6: РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	
«БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ЧОТИРИНОГИЙ РОБОТ»	56
6.1. Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....	56
6.1.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	56
6.1.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	60
6.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	62
6.3. Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту....	74
6.3.1. Розроблення ринкової стратегії проекту	74
6.3.2. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	78
6.4. Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності.....	84
Висновок до розділу.....	89
ВИСНОВКИ	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	93
ДОДАТОК А.1. СКЛАДАЛЬНЕ КРЕСЛЕННЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ	96
ДОДАТОК А.2. ДЕТАЛЮВАННЯ.....	99
ДОДАТОК Б. БЛОК-СХЕМА.....	100
ДОДАТОК В. КОД ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РУХУ РОБОТА	102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

B2B - Business-to-Business (Бізнес для бізнесу)

B2C - Business-to-Consumer (Бізнес для споживача)

CoG - Center of Gravity (Центр ваги)

CoM - Center of Mass (Центр мас)

CNN - Convolutional Neural Network (Згорткова нейронна мережа)

CPG - Central Pattern Generators (Генератори центральних патернів)

DOF - Degrees of Freedom (Ступені свободи)

DRL - Deep Reinforcement Learning (Глибоке навчання з підкріпленням)

FFF/FDM - Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling (Технологія пошарового наплавлення)

GPS - Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)

GRFs - Ground Reaction Forces (Сили реакції опори)

IMU - Inertial Measurement Unit (Інерційний вимірювальний блок)

ІВ - Інтелектуальна власність

LIPM - Linear Inverted Pendulum Model (Модель лінійного інвертованого маятника)

LQR - Linear-Quadratic Regulator (Лінійно-квадратичний регулятор)

M-R - Mixed Reality (Змішана реальність)

NMPC - Nonlinear Model Predictive Control (Нелінійне модельно-прогнозне керування)

Open-Source - Відкритий вихідний код

PDE - Post-Disaster Environments (Середовища після катастроф)

ПК - Персональний комп'ютер

ПЗ - Програмне забезпечення

ПРО - Пошуково-рятувальні операції

PWM - Pulse Width Modulation (Широтно-імпульсна модуляція)

QQR - Quadrupe-d-Quadrotor Robot (Гібридний робот-квадрокоптер)

QP - Quadratic Programming (Квадратичне програмування)

R&D - Research and Development (Науково-дослідна та дослідно-конструкторська робота)

ROS - Robot Operating System (Операційна система для роботів)

SAR - Search-and-Rescue (Пошук і порятунк)

SEAs - Series Elastic Actuators (Пружні серійні приводи)

SLAM - Simultaneous Localization and Mapping (Одночасна локалізація та картографування)

SOM - Serviceable Obtainable Market (Досяжний обсяг ринку)

STEM - Science, Technology, Engineering, and Mathematics (Наука, технології, інженерія та математика)

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Універсальний асинхронний приймач/передавач)

УТП - Унікальна торговельна пропозиція

ЦГС - Цільова група споживачів

ВСТУП

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується стрімким поширенням інтелектуальних роботизованих систем, здатних виконувати складні завдання в умовах, що є небезпечними або непридатними для людини. Інтенсивний розвиток галузей штучного інтелекту, мехатроніки, сенсорики та автономних систем управління сприяє формуванню нового покоління мобільних роботів, орієнтованих на забезпечення безпеки, проведення пошуково-рятувальних операцій, моніторинг ризикованих середовищ та виконання спеціалізованих місій в екстремальних умовах. У цьому контексті чотириногі роботи займають особливе місце завдяки своїй біонічній архітектурі, високій стабільності руху та здатності адаптуватися до складних рельєфів місцевості.

На відміну від колісних або гусеничних платформ, чотириногі роботи мають значно вищу маневреність і прохідність, що дозволяє їм пересуватися по нерівних, сипких або обмежених просторах. Такі характеристики відкривають широкі можливості для їх використання в місцях аварій, під завалами, у промислових зонах із високим рівнем небезпеки, а також у військовій та космічній сферах. У поєднанні з сучасними сенсорними системами та алгоритмами автономного управління подібні роботи можуть стати універсальними помічниками людини, здатними діяти у змінних або невідомих умовах.

Доцільність даного дослідження обумовлена необхідністю подолання стратегічного розриву: існуючі промислові моделі, такі як Spot від Boston Dynamics, демонструють високий рівень технологічності, проте їхня висока вартість, закритість програмної архітектури та складність обслуговування унеможливають їх широке використання як гнучкої бази для R&D-прототипування в більшості науково-дослідних і оборонних установ. Таким чином, основна увага приділяється створенню доступного, технічно спрощеного прототипу, який зберігає ключові принципи функціонування складних систем, але при цьому є доступним і модифікованим. Робота сфокусована на подвійній меті: забезпеченні якісної підготовки інженерів в освітньому середовищі та розробці універсальної апаратно-програмної основи, яку

можна швидко та бюджетно адаптувати під спеціалізовані завдання (наприклад, інтеграція тепловізора для військових або GPS для пошуково-рятувальних місій).

У межах даної магістерської роботи створюється прототип багатофункціонального чотириноного робота, який є відкритою та універсальною платформою. Для побудови механічної конструкції використано адаптовану 3D-модель, розроблену іншими авторами [1], яка була модифікована та спрощена відповідно до обмежень бюджету. У процесі роботи основна увага приділяється реалізації базових рухів, координуванню кінцівок та статичному балансуванню. Такий підхід дозволяє зосередитися на вдосконаленні системи керування, налаштуванні кінематики руху та аналізі поведінки робота в реальних умовах експлуатації.

У перспективі розроблений прототип може стати основою для розширення функціональності під конкретні місії: інтеграції сенсорних модулів для збору розвідувальних даних, камер для навігації в умовах обмеженої видимості або маніпуляційних пристроїв для виконання пошуково-рятувальних і військових завдань. Таким чином, розроблення багатофункціонального чотириноного робота навіть на базовому рівні реалізації є стратегічно важливим напрямом розвитку сучасної робототехніки, який поєднує практичні інженерні навички з науковими підходами до створення модифікованих автономних систем.

РОЗДІЛ 1: ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЧОТИРИНОГИХ РОБОТІВ

Розвиток робототехніки характеризується активним пошуком нових конструктивних рішень, здатних забезпечити високу мобільність, автономність і надійність роботизованих систем у складних умовах експлуатації. Серед різних типів пересувних платформ особливу увагу дослідників привертають чотириногі роботи, які завдяки біонічній архітектурі та багатоступеневій системі керування демонструють здатність ефективно пересуватися по нерівній місцевості, долати перешкоди та зберігати стійкість навіть за відсутності суцільної опори. Інтерес до таких систем зумовлений не лише науковими викликами у сфері механіки руху, а й практичною потребою у створенні техніки, здатної діяти в середовищах, небезпечних для людини.

1.1. Аналіз конструктивних рішень та типів приводів крокуючих роботів

Розвиток мобільної робототехніки спирається на три основні типи конструкцій — колісні, гусеничні та крокуючі системи. Колісні платформи відзначаються високою швидкістю руху, простотою керування та ефективністю на рівних твердих поверхнях. Гусеничні роботи мають підвищену прохідність і здатні долати нерівності середнього рівня, проте недоліками є низька маневреність та високі енергетичні витрати. У свою чергу, чотириногі крокуючі роботи вирізняються принципово іншим підходом до пересування — вони реалізують дискретний контакт із поверхнею, що забезпечує виняткову адаптивність до складного рельєфу, пересування по сипких або м'яких ґрунтах і підтримку стабільності навіть за часткової втрати опори [2, 3].

Основу конструкції чотириногого робота становить корпус (торс), до якого приєднані чотири ноги, що працюють незалежно одна від одної. Кожна нога зазвичай має кілька ступенів свободи (DoF) — у тазостегновому, колінному та гомілковому суглобах, що дозволяє моделювати біонічну кінематику руху тварин. Чотириногі системи, як правило, використовують від 8 до 12 приводів для забезпечення повного контролю над кінематикою [4]. Розрізняють декілька типів структурних схем:

жорсткий торс (простіший, енергоефективніший) та гнучкий торс (краща адаптація до рельєфу, але складніше керування). Сучасні платформи часто використовують біоміметичні принципи та пружні елементи (наприклад, Series Elastic Actuators — SEAs) для поглинання ударів та оптимізації енергоспоживання під час динамічних рухів, таких як біг і стрибки [2, 3]. Приклад чотириноного робота на рис. 1.1.

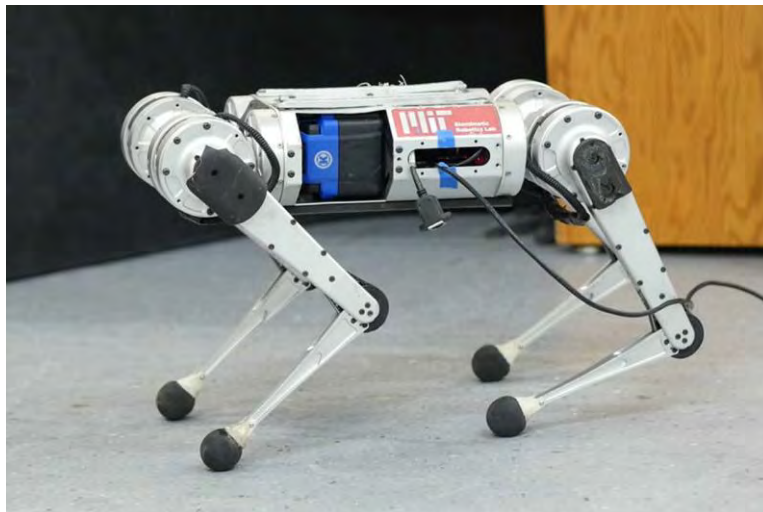


Рисунок 1.1 – Вигляд чотириноного робота [20]

Залежно від поставлених завдань та необхідної продуктивності, застосовуються різні типи приводів. Гідравлічні системи забезпечують найвищу потужність і крутний момент, необхідні для транспортування важких вантажів і руху по екстремально нерівній місцевості [2]. Водночас електричні приводи характеризуються легкістю, компактністю, високою точністю керування та меншим рівнем шуму, що є перевагою для розвідувальних місій. Останні тенденції вказують на зростання популярності електричних приводів із високим крутним моментом, які досягають продуктивності, близької до гідравлічних систем, при меншій складності обслуговування [4].

У порівнянні з іншими легованими системами, чотириногі роботи займають оптимальне проміжне положення між стабільністю й енергоефективністю. Вони мають вищу прохідність і несучу здатність, ніж двоногі аналоги, які страждають від низької динамічної стійкості та складності балансування. При цьому чотириногі роботи мають простішу конструкцію і систему керування, ніж шестиногі або

восьминогі моделі, які, хоч і мають надлишкову статичну стійкість, вирізняються вищою механічною та обчислювальною складністю та нижчою маневреністю [3, 4]. Таким чином, чотириногі платформи є універсальним рішенням, що поєднує необхідну стабільність із високою швидкістю пересування.

1.2. Проєктні виклики та керування рухом чотириногих роботів

Ключовим викликом у розробці чотириногих роботів є вдосконалення динамічних характеристик, підвищення адаптивності до середовища та максимізація вантажопідйомності [3]. Сучасні проєкти спрямовані на створення як високопродуктивних, так і бюджетних рішень. Наприклад, для цілей навчання та початкового розгортання існують розробки, що використовують спрощену кінематичну архітектуру (наприклад, 2-DoF на ногу замість 3-DoF), застосовуючи при цьому мінімальну кількість виконавчих механізмів. Таке рішення забезпечує зручність та знижує вартість (близько 4000 €), що є важливим критерієм для пошуково-рятувальних місій, де необхідна певна габаритна (довжина 20–80 см) і вагова (5–60 кг) категорія роботів [5].

Проте, проєктування керуючих систем для роботів наступного покоління стикається з низкою фундаментальних викликів, особливо в непередбачуваних умовах ПРО. До цих проблем належать динамічна непередбачуваність ґрунту (наприклад, сипкість, нестабільність уламків), затримки відстеження та неточності 3D-мап, які роботи будують під час руху [6]. Крім того, на точність керування впливають непередбачені події та проблеми калібрування сенсорів. Для подолання цих труднощів критично важливим є використання передової архітектури, яка поєднує дані від стереоскопічного зору та інерційних вимірювальних блоків (IMU) для точної навігації та орієнтації на незнайомій та складній місцевості [7].

У відповідь на ці виклики еволюціонували й самі стратегії керування рухом. Традиційні методи, такі як керування силою та імпедансом, забезпечують стабільність, але вимагають точних фізичних моделей. Наступним кроком стало застосування біологічно натхнених підходів, зокрема Генераторів Центральних Патернів (CPG), які можуть генерувати ритмічні рухи без постійного зовнішнього

втручання. Найсучасніші системи використовують інтелектуальні стратегії, такі як глибинне навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning — DRL), що дозволяють роботу автономно навчатися оптимальній взаємодії з динамічно змінним середовищем та досягати високої динамічної рівноваги [3, 6].

Особливе місце в розвитку керування посідає проблема узагальнення рухів. Керування великими та складними системами вимагає, щоб система була різноманітною та гнучкою. Дослідження демонструють, що, використовуючи методи автокодувальників та розкладання даних про рух на ознаки, можна досягти генералізації [7]. Це означає, що, навіть навчаючи робота лише руху "ходьба", можна витягнути приховані патерни руху для інших, не вивчених безпосередньо гайтів, таких як трот або галоп. Це відкриває можливість для створення більш адаптивних та гнучких систем керування, які можуть самостійно генерувати потрібні рухи у непередбачених ситуаціях.

Отже, майбутній прогрес чотиринової робототехніки у ПРО залежить від конвергенції надійного механічного дизайну (з акцентом на біоміметичні пружні приводи та мінімізацію DoF) із інтелектуальними системами керування, які можуть обробляти неповні та динамічні дані навколишнього середовища. Вирішення цих технічних викликів, пов'язаних з керуванням, автономним рухом та генералізацією, є необхідною умовою для повного розкриття потенціалу чотириногих роботів у таких критичних сферах, як пошук, спостереження та ліквідація наслідків катастроф [6].

1.3. Методи керування рухом та адаптивні стратегії

1.3.1. Ієрархічні контролери та динаміка центроїдального імпульсу

Ключовим елементом динамічного контролю є керування на основі центроїдального моменту (Centroidal Momentum Control). Цей метод, який є стійким до похибок інерційних параметрів (наприклад, маси), використовує спрощену модель лінійного інвертованого маятника (LIPM) та концепцію точки захоплення (Capture Point) для генерації бажаного руху центру мас (CoM). Для динамічних з'єднань QR-оптимізація дозволяє знайти необхідні прискорення суглобів та Сили Реакції Опори (GRFs), задовольняючи динамічні обмеження та обмеження тертя. У фазі подвійної

опори латеральна компонента лінійного моменту часто ігнорується, тобто встановлюється в нуль, оскільки в цей момент система є недоактивованою. [8]

1.3.2. Керування гібридними та мультимодальними системами

Особливий клас роботів — гібридні системи, що поєднують наземне (чотириногу) і повітряне (квадрокоптер) пересування (QQR). Ці мікро-роботи розробляються для довготривалих місій, використовуючи довгу витривалість робота та високу маневреність квадрокоптера. [9]

Керування QQR реалізується через ієрархічну координаційну схему. Використовуються біонічні контролери CPG (на основі осциляторів Хопфа) для генерації ритмічних рухів (ходьба, рись, обертання), тому робот адаптивно обирає паттерн руху: наприклад, рись для швидкого пересування на гладких поверхнях та ходьба для надійності на шорсткій місцевості. [9] Керування QQR дозволяє змінювати морфологію для адаптації до вузьких просторів (конфігурації X, H, T, O). Спеціальний компенсаційний контролер підтримує стійкість польоту, коригуючи швидкість роторів для уникнення втрати тяги під час зміни форми. [9]

Ця мультимодальна адаптивність дозволяє QQR оптимально розподіляти рух: використовувати наземний режим для низького енергоспоживання (до 30 хв) та переходити до повітряного режиму для швидкого подолання значних перешкод (до 10 хв польоту). [9]

1.3.3. Глибоке навчання з підкріпленням (DRL)

Глибоке навчання з підкріпленням (DRL) є вирішальною технологією для розробки спритних та інтелектуальних контролерів пересування, дозволяючи роботу приймати рішення, навчаючись без явного фізичного моделювання. DRL дозволяє створювати адаптивні поведінки у відповідь на мінливі ситуації. [10, 11]

Простір стану формується поєднанням пропріоцептивних даних (орієнтація, позиції суглобів) та екстероцептивних даних (глибинні зображення, карти висот). Для вирішення проблеми "розриву реальності", спричиненого неточностями у фізичних

параметрах та шумом сенсорів, застосовується рандомізація домену (рандомізація маси, інерції, сили моторів, тертя). Хоча DRL-алгоритми, такі як PPO (Proximal Policy Optimization), популярні завдяки своїй простоті та стабільності, вони критикуються за низьку ефективність вибірки, що вимагає мільйонів кроків градієнтного спуску для навчання. Майбутні дослідження зосереджені на прискоренні навчання через планування на основі моделей та повторне використання попередніх даних про рух [11]

Таким чином, сучасне керування чотириногими роботами еволюціонувало до інтегрованих ієрархічних систем, що поєднують точний динамічний контроль (на основі центроїдального моменту) з інтелектуальними стратегіями DRL. Крім того, розробка мультимодальних гібридних платформ (робот-квадрокоптер) підтверджує загальну тенденцію до створення високоадаптивних систем, здатних автономно оптимізувати своє пересування та конфігурацію для виконання складних і довготривалих місій у нестандартних умовах.

1.4. Інженерні рішення та практичні аспекти розробки пошуково-рятувальних роботів

1.4.1. Гібридні конструкції та функціональна модульність

Для максимальної ефективності в умовах катастроф (Post-Disaster Environments, PDE), що характеризуються уламками, сходами та нестабільною місцевістю, розробка фокусується на гібридних і мультимодальних конструкціях. На відміну від традиційних гусеничних чи колісних систем, які обмежені в подоланні перешкод, колісно-леговані (колісно-крокуючі) роботи ефективно поєднують високу швидкість і вантажопідйомність коліс із прохідністю крокуючих механізмів. Такі конструкції часто використовують чотириланкові механізми, що забезпечують добру жорсткість, високу несучу здатність і простоту керування. [12, 13]

Важливою особливістю SAR-роботів є функціональна модульність, що дозволяє їм не лише пересуватися, а й виконувати специфічні рятувальні завдання. Це досягається інтеграцією додаткових модулів: [13]

- Наприклад, висувна конструкція для нош.
- Аварійні модулі: системи пожежогасіння або подачі додаткового кисню для потерпілих.
- Візуальний моніторинг для передачі інформації рятувальникам.

Навіть у чотириногих роботах (як-от ANYmal на рис. 1.2), що призначені для роботи в промислових та небезпечних зонах, ключові компоненти, такі як агрегати ANYdrive, є модульними для швидкої заміни та простого обслуговування. [14]



Рисунок 1.2. – Робот ANYmal C [21]

1.4.2. Адаптивне навантаження та стійкість

Здатність робота переносити вантаж є критичною для доставки інструментів і припасів у небезпечні зони, такі як радіаційно забруднені ділянки. Одним з інженерних рішень є використання двох ніг робота як маніпуляційних "рук" для вивантаження вантажу, що дозволяє усунути необхідність у окремому вантажному маніпуляторі. Це максимізує корисне навантаження, оскільки вага маніпулятора не знижує максимальну вагу, яку може перенести робот. При цьому для забезпечення безпеки під час вивантаження, задні ноги розтягуються вперед, щоб запобігти падінню. Використовується спеціальний фіксувальний виступ на вантажній платформі, що відповідає формі сферичного кінчика ноги, оскільки кінцівки, оптимізовані для ходьби, не призначені для захоплення об'єктів. [15]

Для забезпечення стабільної ходьби з вантажем на нерівній місцевості (сходах, схилах), розроблено вдосконалені методи контролю. Ці методи динамічно підтримують баланс, використовуючи сенсори позиції. У режимі повзучого з'єднання, коли лише одна нога підіймається, центр ваги (CoG) повинен завжди залишатися всередині трикутника опори. Завдяки сенсорам, робот здатний динамічно коригувати крен до нуля і відстежувати кут нахилу підлоги, підвищуючи надійність пересування з вантажем. [15]

1.4.3. Оптимізація ресурсів та управління місією

Ефективність SAR-операцій значною мірою залежить від стратегічного планування та розподілу обмежених енергетичних ресурсів. Впровадження централізованих SAR-фреймворків, що використовують мобільний зв'язок (4G/5G) та Edge Computing, дозволяє оптимізувати використання парку роботів. [16]

Ключові параметри для планування місії включають:

- Розмір зони пошуку та необхідний відсоток покриття (Exploration Rate Required, ERR).
- Цільовий час реагування (Target Response Time, TRT).
- Енергетичний профіль кожного робота (ємність батареї та швидкість її споживання).

Порівняльний аналіз, що проводиться в рамках такого фреймворку, виявив, що чотириногі роботи (наприклад, Unitree GO1) мають значно вище загальне енергоспоживання порівняно з колісними аналогами через більшу кількість сенсорів, процесорів та складність ходьби, навіть у режимі простою. Однак, їхня більша ємність батареї частково компенсує це, але для великомасштабних місій їм може знадобитися більший розмір флоту порівняно з колісними. Цей фреймворк допомагає рятувальникам мінімізувати кількість роботів і планувати шлях, необхідний для успішного виконання місії. [16]

1.4.4. Керування та сприйняття у змішаній реальності

Для підвищення ефективності SAR-місії оператори використовують системи Змішаної Реальності (Mixed Reality, M-R). Інтерфейс M-R, наприклад, на базі окулярів Hololens та ROS-Unity, забезпечує високорівнєве керування роботом (наприклад, Unitree A1) за допомогою жестів. [12]

Система M-R [12]: оператор розміщує віртуальні конуси в зонах інтересу, і робот слідує оптимальному маршруту, обчислюваному планувальником шляху. Робот використовує CNN для виявлення жертв на основі RGB та тепловізійних зображень, що дозволяє знаходити людей, прихованих уламками або в умовах поганої видимості. Застосування M-R-інтерфейсу значно підвищує відчуття занурення та оптимізує час виконання місії порівняно з традиційними інтерфейсами (монітор, миша, клавіатура).

Таким чином, інтеграція M-R-систем дозволяє операторам, перебуваючи у безпечній зоні, керувати складною робототехнічною системою, отримуючи критично важливу візуальну інформацію для прийняття рішень. [12]

Інженерна розробка пошуково-рятувальних роботів зосереджена на гібридних, мультимодальних конструкціях та функціональній модульності, що забезпечує адаптивність на неструктурованій місцевості та виконання рятувальних завдань. Критично важливим є використання систем змішаної реальності (M-R) для інтуїтивного керування та стратегічне планування ресурсів, що враховує високе енергоспоживання роботів, для оптимізації довготривалих місій.

Висновок до розділу

Чотириногі роботи є одним із найперспективніших напрямків у галузі мобільної робототехніки. Їхня ключова перевага полягає у винятковій прохідності на складних ландшафтах, що робить їх набагато ефективнішими, ніж колісні або гусеничні платформи, для таких завдань, як пошуково-рятувальні місії (SAR) або інспекція промислових об'єктів. Завдяки конструкції, що імітує ходу тварин, ці роботи, як-от відомий Spot від Boston Dynamics, можуть долати сходи, уступи та нерівності,

підтримуючи при цьому динамічну стійкість. Їхня здатність до адаптації та точкового контакту з поверхнею є вирішальною для роботи у важких і потенційно небезпечних умовах.

Основними технічними аспектами та викликами у розробці чотириногих роботів є структурний дизайн, планування рухів та системи керування. Конструкція кінцівок і вибір потужних, але легких приводів безпосередньо впливають на швидкість і вантажопідйомність робота. Для досягнення спритності та стійкості використовуються складні алгоритми, які включають планування ходи (наприклад, рись, галоп), визначення траєкторії опорної точки та динамічне регулювання всім тілом. Останні дослідження все частіше зосереджуються на інтелектуальних стратегіях керування, таких як глибоке навчання з підкріпленням (DRL) та нелінійне модельно-прогнозне керування (NMPC), що дозволяють роботу автономно пристосовуватися до непередбачуваних умов і виконувати складні маневри.

Сфера застосування чотириногих роботів постійно розширюється, охоплюючи не лише пошук і порятунок у зонах стихійних лих, але й інспекцію трубопроводів, електростанцій та інших промислових об'єктів. Також вони використовуються для картографування невідомих середовищ, військових завдань та, у гібридних варіаціях (наприклад, чотириногий-квадрокоптер), для поєднання наземної витривалості з повітряною мобільністю. Майбутній розвиток буде спрямований на подальше підвищення автономності, енергоефективності та здатності працювати у спільних групах (мульти-робототехнічні системи), що дозволить їм стати невід'ємною частиною інфраструктурних, дослідницьких та рятувальних робіт.

РОЗДІЛ 2: КІНЕТИКА ТА КІНЕМАТИКА СИСТЕМИ

Одним з найважливіших етапів розробки рухомого робота є момент розрахунку його кінетики та кінематики, а також побудування кінематичної схеми, для візуалізації загального руху робота. Далі в розділі було обґрунтовано вибір виконавчих механізмів, та проведено аналіз динамічних навантажень на з'єднання. З огляду на вимоги до механічної стійкості, точності руху та надійності роботи всієї опорно-рухової системи, особливу увагу приділено перевірці відповідності технічних характеристик сервоприводів реальним експлуатаційним умовам.

2.1. Кінетика системи

Кожен вузол з'єднання у цій системі оснащено сервоприводом MG996R, який формує обертальний рух у межах заданого діапазону та забезпечує передачу моменту навіть за складних навантажувальних умов. Використання однакових приводів по всій довжині кінематичного ланцюга забезпечує стабільність характеристик, зменшує похибки в керуванні та підвищує точність позиціонування опорної точки. Завдяки високому крутному моменту та жорсткій фіксації положення приводи здатні забезпечувати синхронну роботу у динамічних режимах, що критично важливо для реалізації стабільної ходи.

Комплексний підхід, що поєднує конструктивний аналіз, кінематику та розрахунок навантажень, дозволяє створити механічну основу, придатну для подальшої інтеграції з системою управління. Це забезпечує точність позиціонування опорної точки, синхронізацію рухів ніг та стабільність корпусу під час пересування. Розрахунки, проведені на основі кінематичної схеми, підтверджують правильність вибору структури сегментів та параметрів приводів, а також дозволяють передбачити ефективність роботи робота у реальних умовах експлуатації.

Для забезпечення реалізації руху моделі було обрано двигуни типу MG996R, характеристики яких повністю відповідають вимогам кінематичної системи робота. Таблиця 2.1 містить основні параметри кінцівок моделі, які впливають на їхню здатність забезпечувати точність руху, передачу моменту та узгоджену роботу

приводів у всіх сегментах кінематичного ланцюга. Вхідні значення були визначені експериментальним шляхом, та будуть враховані в модифікації наявної 3D-моделі [1]

Таблиця 2.1 Основні параметри кінцівок моделі

Параметр	Значення
Маса робота	1.1 кг
Кількість ніг	4
Кількість секцій у нозі	2 (верхня і нижня)
Довжина повністю розігнутої ноги	164 – 165 мм
Довжина зігнутої ноги	115 – 116 мм
Довжина нижньої секції (приблизно половина ноги)	≈ 118 мм (0.118 м)
Маса нижньої секції ноги (груба оцінка)	≈ 0.1375 кг (тобто $1.1 / (4 \times 2)$)
Серво для нижньої частини	MG996R (9–11 кг·см, 0.13–0.17 с/60°)
Серво для верхньої частини	MG996R (9–11 кг·см, 0.13–0.17 с/60°)

Маємо 4 ноги , а отже, 12 серво MG996R — по 3 на кожну ногу у верхній частині ноги. Маса приводів на одну ногу $3 \times \text{MG996R}$: 165 г. Загальна маса сервоприводів: 12 MG996R : $12 \times 55 \text{ г} = 660 \text{ г}$. Решта $1,1 \text{ кг} - 0,66 \text{ кг} \approx 0,44 \text{ кг}$ — це пластик, батарея, Рі та інші деталі.

2.1.1. Момент інерції

Щоб оцінити момент інерції відносно осі обертання у "стегні" (там, де кріпиться верхній сервопривод), найпростіше у першому наближенні розглядати ногу як однорідний стрижень завдовжки $L_{leg,max} \approx 0,164$ м із масою m_{leg} . Формула 2.1 моменту інерції однорідного стрижня відносно краю (візьмемо $m_{leg} \approx 0,15$ кг):

$$I = \frac{1}{3} m_{leg} L_{leg,max}^2 = \frac{1}{3} * 0,15 * 0,164^2 = 0,0013 \text{ кг} * \text{м}^2 \quad (2.1)$$

Реально у ноги маса розподілена не рівномірно, а серводвигуни додатково концентрують масу ближче до осей обертання. Тож фактичний момент інерції може

бути меншим за цей «стрижневий» (оскільки значна частина маси – це мотори, які сидять не на самому кінці). Але цей розрахунок дає певну верхню оцінку.

2.1.2. Момент навантаження

Коли робот стоїть на всіх чотирьох ногах, теоретично кожна нога в має нести 1/4 від загальної ваги. При загальній масі 1,1 кг (формула 2.2):

$$m_{on\ one\ leg} = \frac{1,1}{4} = 0,275\text{кг.} \quad (2.2)$$

Щоби серводвигун у "стегні" (верхньому шарнірі) утримував робота, коли нога витягнута горизонтально (найгірший випадок «важіль на повну довжину»), потрібен момент (формула 2.3):

$$\tau_{load} = m_{on\ one\ leg} * g * \ell \quad (2.3)$$

де

$$g \approx 9,81\ \text{м/с}^2$$

$\ell \approx 0,165\ \text{м}$ (беремо максимальну довжину ноги, аби показати гірший випадок).

Тоді

$$\tau_{load} = 0,275 * 9,81 * 0,165 \approx 0,442\text{Н} \cdot \text{м.}$$

У «кг·см» це приблизно:

$$\frac{0,442\ \text{Н} \cdot \text{м}}{\left(0,09807\ \text{Н} \cdot \frac{\text{м}}{1\ \text{кг} \cdot \text{см}}\right)} \approx 4,5\ \text{кг} \cdot \text{см.}$$

Це статичний момент, необхідний лише для того, щоби утримувати (не враховуючи масу самої ноги, бо вона в цьому розрахунку менш суттєва порівняно з вагою "тулуба"). У реальності ще додається вага самої ноги (хоч трохи), тож можна взяти невеликий запас.

MG996R при 4,8 В має близько 9,4 кг·см, що більше за 4,5 кг·см. Тобто теоретично один MG996R здатен утримати навантаження в найгіршому випадку (якщо передавальний механізм напряду). При 6В запас іще більший і становить 11 кг·см.

2.1.3. Вплив маси ніг та серводвигунів

Кожна нога складається з двох секцій —горизонтальної секції та нижньої , секції що відповідає за рух нижньої частини ноги. Для обчислення моментів від власної маси використано модель дволанкової системи, де центри мас розташовані посередині кожної ланки (формула 2.4).

$$\tau_{leg} = m_{upper} * g * d_{upper} + m_{lower} * g * d_{lower} \quad (2.4)$$

де $d_{upper} = \frac{L_s}{2} = 0,059$ м,

$d_{lower} = L_s + \frac{L_s}{2} = 0,177$ м.

$$\tau_{leg} = 0,075 \cdot 9,81 \cdot 0,059 + 0,075 \cdot 9,81 \cdot 0,177 = 0,1736 \text{ Н*м} \approx 1,77 \text{ кг*см.}$$

До цього додається момент від маси сервоприводів, розташованих на відстанях від стегнового шарніра:

$$\tau_{servos} = 0,055 \cdot 9,81 \cdot 0,118 + 0,055 \cdot 9,81 \cdot 0,165 = 0,1526 \text{ Н*м} \approx 1,55 \text{ кг*см.}$$

2.1.4. Сумарний статичний момент

Сумарний момент, що припадає на один привід у верхньому вертикальному суглобі (формула 2.5):

$$\tau_{static} = \tau_{load} + \tau_{leg} + \tau_{servos} = 0,7682 \text{ Н * м} \approx 7,83 \text{ кг * см} \quad (2.5)$$

Таким чином, для статичного положення у горизонтальній площині верхній вертикальний привід повинен витримувати момент близько 8 кг·см, що точно і з запасом відповідає граничним можливостям MG996R.

2.1.5. Момент прискорення

Для обертання ноги з певним кутовим прискоренням α серводвигун повинен розвивати момент (формула 2.6):

$$\tau_{acc} = I * \alpha \quad (2.6)$$

де I – момент інерції всієї ланки/ноги відносно осі обертання, а α – бажане кутове прискорення.

Візьмемо швидкість двигуна MG996R, він обертається 60° за $0,17$ с (без навантаження). $60^\circ = \pi/3$ рад $\approx 1,047$ рад.

Швидкість (середня) $\omega_{avg} \approx 1,047/0,17 \approx 6,15$ рад/с. Якщо припустити, що розгін відбувається з приблизно нульової швидкості до ω_{final} за час $t \approx 0,12$ с, тоді середнє ω буде вполовину менше ω_{final} (формула 2.7), тож:

$$\omega_{final} \approx 2 \omega_{avg} \approx 12,31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.7)$$

А кутове прискорення:

$$\alpha \approx \frac{\omega_{final}}{t} \approx \frac{12,31}{0,17} \approx 72 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}. \quad (2.8)$$

Ми вище оцінили $I \approx 0,0013$ кг*м² (як «верхню» оцінку). Тоді підставляємо у формулу 2.6:

$$\tau_{acc} = I * \alpha = 0,0013 * 72 \approx 0,0936 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 0,95 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

2.1.6. Повний (піковий) момент

$$\tau_{total} = \tau_{static} + \tau_{acc} = 0,7682 + 0,0936 = 0,8618 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

$$\tau_{total} = 0,7874 \cdot 10,197 = 8,787 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Отже, максимальний момент, який повинен забезпечити привід у тазовому вертикальному суглобі, становить приблизно 8.7 кг*см, що не перевищує номінальний показник MG996R ($9,4$ – 13 кг*см). Це означає, що при активному русі привід працюватиме в оптимальному діапазоні потужності.

2.1.7. Розрахунок для горизонтального тазового суглоба

Момент у суглобі формується переважно масою нижньої секції:

$$\tau_{knee} = m_{lower} g \frac{L_s}{2} + m_{MG} g L_s = 0,1375 \cdot 9,81 \cdot 0,059 + 0,055 \cdot 9,81 \cdot 0,118 = 0,14 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 1,46 \text{ кг} \cdot \text{см}. \quad (2.10)$$

Інерційний момент для нижньої ланки (приблизно 40% від загального):

$$\tau_{\text{knee,acc}} = 0,4 * I * \alpha = 0,4 \cdot 0,0013 \cdot 72 = 0,0374 \text{ Н*м} \approx 0,38 \text{ кг*см.} \quad (2.11)$$

Загальний момент розраховується як сума моменту у суглобі та інерційного моменту для нижньої ланки (формула 2.12):

$$\tau_{\text{knee,total}} = 0,14 + 0,0374 = 0,1774 \text{ Н*м} \approx 1,81 \text{ кг*см.} \quad (2.12)$$

Отже, привід MG996R (9–11 кг·см) працює в межах свого граничного навантаження, але залишається допустимим при плавних і неагресивних рухах.

Отож, приводи MG996R задовольняють вимоги статичного навантаження, і навіть під час активних динамічних рухів працюють в оптимальних межах своїх можливостей. Приводи MG996R придатні для як для вертикального суглобу так і для горизонтальних суглобів. Двигуни забезпечують необхідний крутний момент із запасом, тому у статичних і динамічних режимах навантаження вони не наближаються до граничних значень потужності, що забезпечує довговічну та стабільну роботу.

2.2. Кінематика системи

2.2.1 Пряма кінематика однієї ноги

Довжина однієї частини ноги від тазу до коліна відповідно до 3D-моделі та реального прототипу становить $L_1 = 0.118$ м, частина ноги від коліна до стопи $L_2 = 0.118$ м

$$L_2 = L_1 = 0.118 \text{ м}$$

Нехай початковий кут тазу $\theta_1 = 10^\circ$, початковий кут коліна $\theta_2 = 100^\circ$. Формули 2.13 та 2.14 визначають кінцеві координати опорної точки.

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.13)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.14)$$

Обчислимо тригонометричні значення

$$\cos(10^\circ) = 0.9848$$

$$\cos(100^\circ) = 0.1736$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 110^\circ$$

$$\cos(110^\circ) = -0.3420$$

$$\sin(110^\circ) = 0.9396$$

Підставляємо

$$x = 0.118 * 0.9848 + 0.118 * (-0.3420) = 0.1162 - 0.0403 = 0.0759$$

$$y = 0.118 * 0.1736 + 0.118 * (0.9396) = 0.0204 - 0.1108 = 0.1313$$

Результат

$$(x, y) \approx (0.0759 \text{ м}, 0.1313 \text{ м})$$

2.2.2 Зворотна кінематика однієї ноги

Використаємо координати початкових точок з розрахунку прямої кінематики кінцівки:

$$x = 0.0759, y = 0.1313$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x^2 = 0.005756$$

$$y^2 = 0.01727$$

$$r^2 = \sqrt{0.005756 + 0.01727} = 0.023026$$

Звідси

$$r = 0.15175$$

Перевіримо досяжність

$$L_1 + L_2 = 0.236, \quad |L_1 - L_2| = 0$$

Оскільки $0 \leq r \leq 0.236$, точка досяжна.

Обчислимо γ

$$\cos\gamma = \frac{L_1^2 + L_2^2 + r^2}{2L_1L_2} \quad (2.15)$$

$$L_1^2 = L_2^2 = 0.013924$$

$$2L_1^2 = 0.027848$$

$$\cos\gamma = \frac{0.027848 - 0.023026}{0.027848} = \frac{0.004822}{0.027848} \approx 0.1732$$

$$\gamma = \arccos(0.1732) \approx 80.04^\circ$$

$$\theta_2 = \pi - \gamma \approx 180^\circ - 80.04^\circ \approx 99.96^\circ$$

Обчислюємо α для θ

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L_1^2 + r^2 - L_2^2}{2L_1r}\right) \quad (2.16)$$

$$L_1^2 + r^2 - L_2^2 = 0.01349 + 0.023026 - 0.01349 = 0.023026$$

$$2L_1r = 2 * 0.118 * 0.151752 \approx 0.03579$$

$$\frac{0.023026}{0.03579} \approx 0.6437$$

$$\alpha = \arccos(0.6437) \approx 50.00^\circ$$

Знайдемо кут φ

$$\varphi = \text{atan2}(y, x) = \text{atan2}(0.1313, 0.0759) \quad (2.17)$$

$$\frac{y}{x} \approx \frac{0.1313}{0.0759} \approx 1.73205 \Rightarrow \varphi \approx 60.00^\circ = 1.0472 \text{ рад.}$$

Знайдемо θ_1

$$\theta_1 = \varphi - \alpha \approx 60.00^\circ - 50.00^\circ = 10^\circ \quad (2.18)$$

Результатом є дуже близький збіг значень початкових кутів і заданих точок
робота

$$\theta_1 \approx 10^\circ \theta_2 \approx 99.96^\circ$$

Різниця від початкових значень — лише через округлення проміжних кроків; співпадає з точністю обчислень.

Отже, для заданих $\theta_1 = 10^\circ, \theta_2 = 100^\circ$ пряма кінематика дає положення стопи $(x, y) \approx (0.07585 \text{ м}, 0.13137 \text{ м})$. Зворотна кінематика для цієї точки коректно відновлює початкові кути θ_1 і $\theta_2 (10^\circ, \approx 100^\circ)$, отже формули і числові кроки узгоджені.

2.3. Кінематична схема

Кінематична схема чотириноного робота представлена на рисунку 2.1 та відображає взаємозв'язки між основними ланками механічної системи, а також розташування приводів, що забезпечують рух кожної з кінцівок. Робот має чотири ідентичні кінематичні гілки — по одній на кожну ногу, які симетрично розташовані відносно корпусу. Кожна кінематична гілка складається з трьох послідовно з'єднаних ланок, що утворюють просторову систему з трьома ступенями свободи (3 DoF) для кожної ноги.

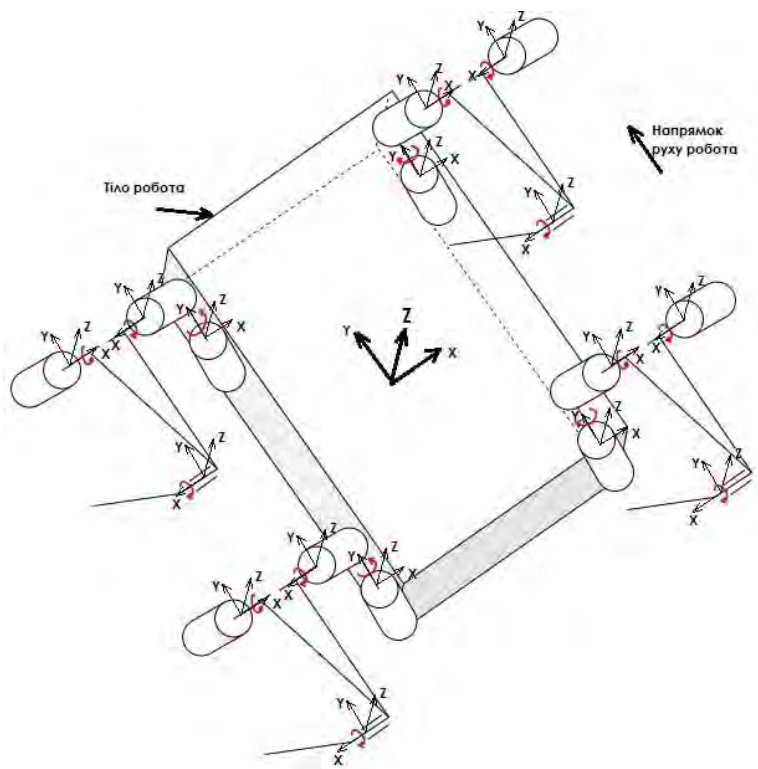


Рисунок 2.1. – Кінематична схема робота

Конструктивною основою є корпус робота («Тіло робота»), який слугує несучим елементом і до якого жорстко прикріплені вузли кріплення всіх сервоприводів. Кожна з чотирьох ніг являє собою послідовний кінематичний ланцюг, що забезпечує три ступені свободи.

У кожній нозі виділяються такі основні ланки:

1. Вертикальний тазовий сегмент — перша ланка кінематичного ланцюга, жорстко пов'язана з корпусом. У цьому з'єднанні розташований основний привід, який забезпечує обертання всієї ноги відносно корпусу. При роботі тазовий двигун здійснює обертання у вертикальній площині, приводячи в рух усю конструкцію ноги, включно з горизонтальним тазовим та гомілковим вузлами, які переміщуються як єдина система. Таким чином, обертання у вертикальному сегменті змінює напрямок положення ноги відносно тіла робота.

2. Горизонтальний тазовий сегмент — відповідає за підйом і горизонтальне переміщення ноги. Привід цього сегмента дозволяє регулювати висоту кінцівки під час кроку та забезпечує плавну передачу руху на нижню частину ноги. Механізм всередині сегмента гарантує узгодженість рухів і зменшує втрати енергії, підвищуючи точність позиціонування.

3. Гомілковий сегмент — третя ланка кінематичного ланцюга, з'єднана з горизонтальним вузлом підшипником. Гомілковий привід регулює кут між горизонтальною та вертикальною секціями, визначаючи положення кінчика ноги під час фази опори та фази переносу. Таким чином, завдяки узгодженій роботі горизонтального і гомілкового двигунів досягається точне позиціонування опорної точки.

4. Опорна точка — кінець кінематичного ланцюга, який безпосередньо взаємодіє з поверхнею та сприймає реактивні сили опори під час ходи.

У кожному вузлі встановлено сервопривід, що забезпечує обертальний рух у межах заданого діапазону. Усі вузли — вертикальні, горизонтальні та колінні — оснащені однаковими серводвигунами MG996R, які розвивають крутний момент до 11 кг·см. Використання єдиного типу приводу підвищує жорсткість конструкції, спрощує монтаж і забезпечує стабільність характеристик у всіх суглобах. Завдяки

цьому нижня секція ноги отримує достатній запас потужності навіть під час динамічного навантаження

Таким чином, кожна нога являє собою послідовний ланцюг типу 3R (Revolute–Revolute–Revolute), у якому обертання у першому вузлі задає орієнтацію всієї ноги, а два наступні з'єднання (гомілкове і горизонтальне) формують положення опорної точки у вертикальній площині.

Завдяки симетрії конструкції, передні та задні ноги мають однакову будову, що спрощує синхронізацію їх рухів. У результаті робот має 12 ступенів свободи (4×3 DoF), що забезпечує здатність до пересування по нерівних поверхнях, стабілізації положення корпусу та реалізації різних типів ходи.

Висновок до розділу

У цьому розділі було сформовано цілісне уявлення про механічну структуру ноги робота та визначено ключові кінематичні принципи, що лежать в основі її роботи. Розглянута трисегментна система —тазовий вертикальний, тазовий горизонтальний, та гомілковий сегменти— забезпечує необхідну гнучкість і точність для реалізації стабільної ходи. Використання сервоприводів MG996R у всіх з'єднаннях дозволяє підтримувати узгоджений рух ланок під навантаженням та гарантує достатній запас крутного моменту для формування опорної та переносної фаз.

Аналіз конструкції підтвердив, що вибрана кінематична схема забезпечує можливість точного позиціонування опорної точки в робочій площині та дозволяє формувати плавні траєкторії руху під час кроку. Узгоджена робота сегментів, достатня жорсткість ланок та стабільність приводів створюють надійну основу для подальшої розробки алгоритмів керування та оптимізації руху робота. Отже, описана механічна структура є ефективною та придатною для подальшої інтеграції в повноцінну робототехнічну систему.

РОЗДІЛ 3: РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ

Успішна реалізація багатофункціонального чотириноного робота вимагає не лише розробки ефективних алгоритмів керування, але й створення надійної, доступної та модифікованої апаратної платформи. Розділ 3 присвячений концептуальному та інженерному проєктуванню прототипу, що слугує універсальною R&D-базою для подальшої спеціалізації. Основна мета конструктивної розробки полягала у досягненні оптимального балансу між складністю кінематики (12 ступенів свободи) та мінімальною собівартістю.

Оскільки завдання дисертації сфокусоване на програмному забезпеченні та адаптації, було прийнято рішення базувати конструкцію на адаптованій 3D-моделі, що дозволило зосередити інженерні зусилля на оптимізації вузлів під бюджетні компоненти (сервоприводи) та забезпеченні модульності. Такий підхід гарантує, що кінцевий прототип буде не просто демо-зразком, а відкритою архітектурою, готовою до інтеграції додаткових сенсорів (тепловізорів, камер) та масштабування потужності під вимоги пошуково-рятувальних чи військових місій.

У межах розділу буде послідовно представлено структурну схему керування, детальний опис механічної архітектури та електронної обв'язки на базі мікроконтролера. Особлива увага приділяється розрахунку енергоспоживання, оскільки ефективне живлення є критично важливим для забезпечення синхронної роботи всіх кінцівок та підтримки стабільного балансування. Фінальним результатом є повний пакет інженерної документації та схема підключення, необхідна для збірки та першого запуску прототипу.

3.1. Структурна схема та принцип роботи системи

Розробка апаратної частини базується на створенні надійної та гнучкої системи, здатної реалізувати складні алгоритми координації рухів для забезпечення статичного балансування та подальшої ходи. В основу електронної архітектури покладено принцип розділення керуючих сигналів та живлення високого струму, що є критичним для стабільної роботи 12 сервоприводів.

Структурна схема керування роботом (рис. 3.1) має чітку трирівневу архітектуру, що забезпечує як дистанційне керування, так і стабільну роботу потужних виконавчих механізмів. Рівень взаємодії реалізовано за допомогою бездротового зв'язку: для передачі команд від персонального комп'ютера (ПК) або смартфона використовується модуль Bluetooth HC-05. Зв'язок між цим модулем та мікроконтролером здійснюється за допомогою протоколу UART (універсальний асинхронний приймач/передавач), що забезпечує можливість дистанційного керування, необхідного для тестування та відпрацювання алгоритмів руху.

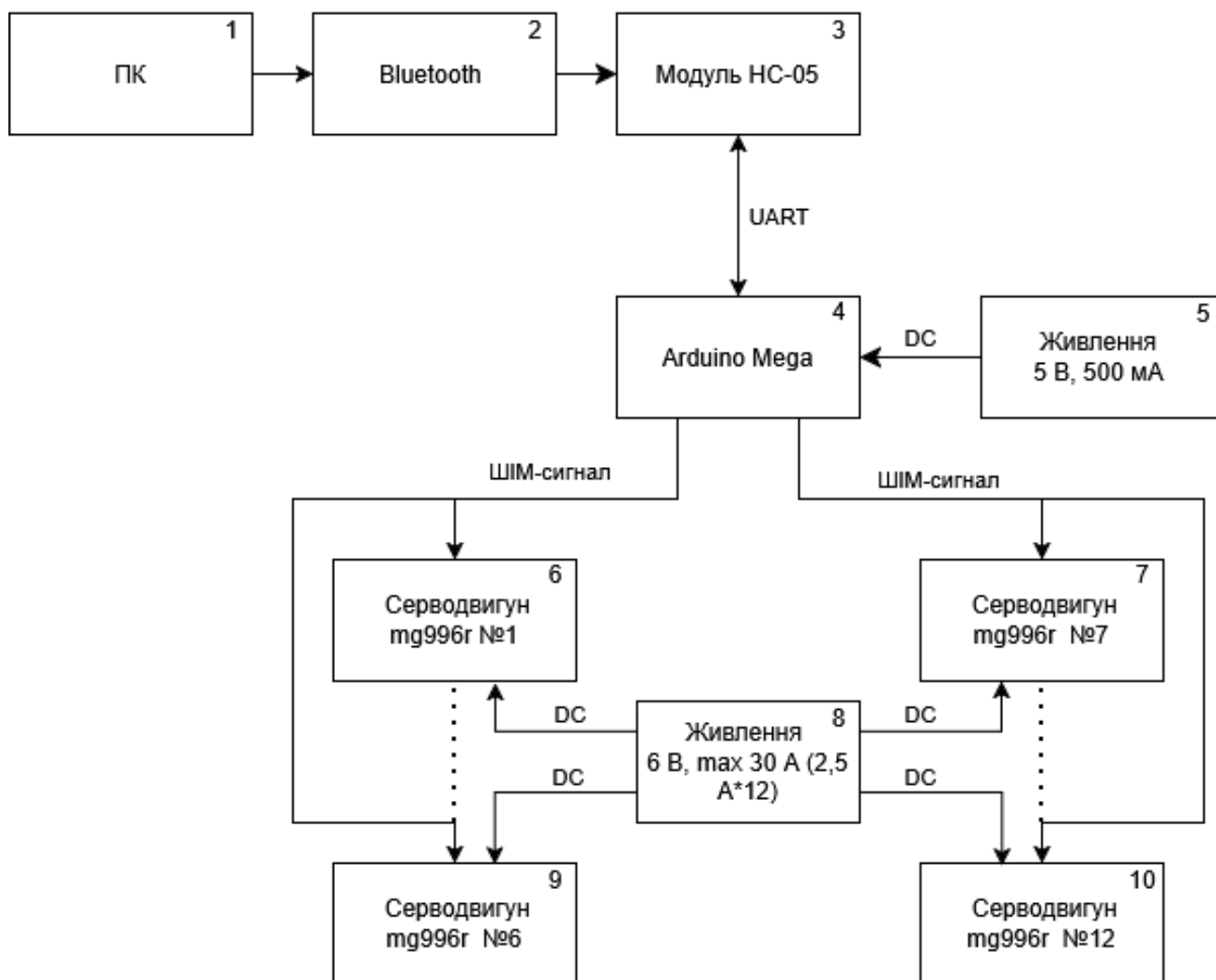


Рисунок 3.1. – Структурна схема керування роботом

Рівень обробки даних сконцентровано на платі Arduino Mega (технічні характеристики в табл. 3.1 [17]), обраній як головний керуючий елемент. Вибір цього мікроконтролера є стратегічним, оскільки він має велику кількість цифрових портів, здатних генерувати ШІМ-сигнал (PWM), що є критично необхідним для незалежного

керування всіма 12 сервоприводами. Arduino Mega відповідає за прийом команд, їх обробку згідно з закладеним алгоритмом кінематики та генерацію точних керуючих сигналів.

Таблиця 3.1. Технічні характеристики ATmega2560

Характеристика	Значення	Обґрунтування вибору
Мікроконтролер	ATmega2560	
Робоча напруга	5 В	
Кількість цифрових Вх/Вих (PWM)	54 (15 ШІМ-каналів)	Ключове: Необхідна кількість ШІМ-виходів для керування 12 сервоприводами без зовнішніх розширювачів.
Пам'ять Flash	256 КБ	Достатньо для розміщення складного алгоритму кінематики та керування (на відміну від Arduino Uno).
Тактова частота	16 МГц	Впливає на швидкість виконання алгоритму кінематики та частоту генерації ШІМ-сигналів.
SRAM (Оперативна пам'ять)	8 КБ	Критично для зберігання проміжних розрахунків кінематики та масивів даних (наприклад, калібрувальних значень).
Інтерфейси зв'язку	4 апаратних UART	Підтверджує можливість паралельного підключення декількох модулів (наприклад, GPS або сенсора IMU) у майбутньому (R&D-перспектива).

На виконавчому рівні працюють 12 серводвигунів mg996r (технічні характеристики в табл. 3.2 [18]). Ключовим архітектурним рішенням для забезпечення надійності є повна ізоляція живлення сервоприводів від живлення мікроконтролера. Сервоприводи живляться від окремого потужного джерела (6 В, макс. 30 А), що запобігає падінню напруги та збоям (перезавантаженням) плати Arduino під час пікових навантажень на двигуни, гарантуючи стабільність роботи системи під час виконання складних рухів. Ці сервоприводи були обрані як оптимальний компроміс між ціною та крутним моментом.

Таблиця 3.2. Технічні характеристики серводвигуна Tower Pro MG996R

Характеристика	Значення	Обґрунтування вибору
Пусковий момент	~11 кг*см при 6 В	Достатньо для статичного балансування та утримання ваги прототипу
Робоча напруга	4.8 В – 7.2 В (номінал 6 В)	
Тип редуктора	Металевий	Забезпечує необхідну надійність та довговічність при навчальній експлуатації.
Ціна	Низька	

Механічна конструкція робота (рис. 3.2) базується на біонічному дизайні квадрупеда, що забезпечує високу маневреність та прохідність. Ключовою особливістю є наявність 12 ступенів свободи (DOF) — по три на кожен кінцівку (Hip-Roll, Hip-Pitch, Knee-Pitch), що дозволяє реалізувати складні патерни руху та забезпечити статичне балансування. Корпус складається з жорсткої центральної рами (шасі), яка вміщує електронні компоненти (мікроконтролер, акумулятори) та мінімізує небажані вібрації під час руху. Важливим інженерним рішенням є те, що конструкція [1] була модифікована та адаптована під технологію 3D-друку (FDM)

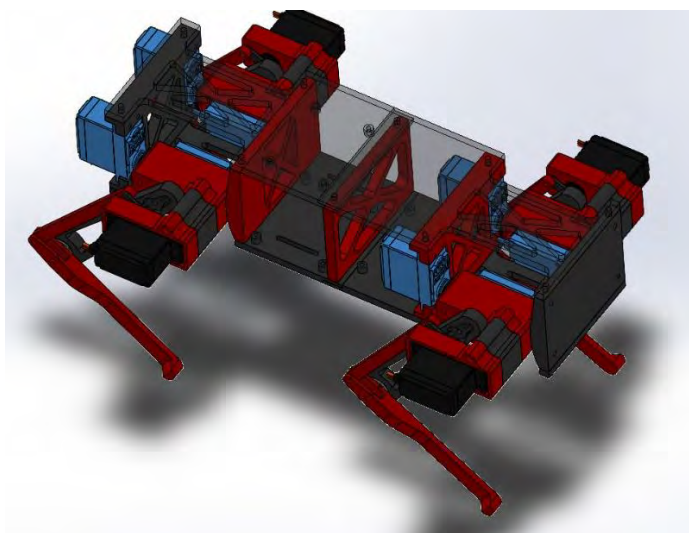


Рисунок. 3.2 – Модель конструкції робота

Вибір компонентів обумовлений необхідністю досягнення низької собівартості при збереженні достатньої потужності та надійності для системи.

3.2. Технологічна адаптація конструкції та процес складання

Ефективність роботизованої системи багато в чому залежить від точності та надійності її механічної збірки. Оскільки конструкція прототипу була адаптована під технологію FDM-друку, процес складання має бути максимально логічним та ітеративним. Це безпосередньо відповідає вимогам доступності та ремонтпридатності, що є критичним для платформи, призначеної для навчальних експериментів та R&D-прототипування. Нижче наведено поетапний алгоритм збору, що забезпечує необхідну жорсткість центрального шасі та точність кінематичних вузлів кінцівок. Детальні складальні креслення, специфікація та деталювання системи наведено у Додатку А.1 та А.2.

Хоча механічна конструкція ґрунтується на модифікованій готовій 3D-моделі, вся необхідна конструкторська документація (креслення, деталювання та специфікація) є результатом моєї самостійної роботи в межах проєкту.

Робот складається з корпусної частини та чотирьох вузлів ніг. Першим етапом складання є монтаж корпусних деталей. Верхня та нижня кришки корпусу складаються з двох пластин кожна (позиції 1–4 у додатку А.1). Пластини 1 і 2, а також 3 і 4 відповідно з'єднуються в місці стику за допомогою шурупів 27. Нижня пластина містить вентиляційні отвори для відведення тепла від акумуляторного відсіку, а також бобишки зверху та знизу, призначені для можливого додаткового встановлення акумуляторів, сенсорів, модулів руху тощо.

Горизонтальні кришки з'єднані п'ятьма вертикальними перегородками 5-8. Передня перегородка 5 містить у собі отвори для фіксування камери або датчика. На відміну від першої перегородки, всі інші, окрім пластин з підшипниками, мають також збільшену теплопровідність через особливості форми побудови. Перегородки 5 та 7 мають пази для підшипників 21, вставляємо підшипники у пази. На нижню пластину фіксуємо перегородку 5, далі іде перегородка 6, середня перегородка 7, перегородка 8 і друга перегородка 6. Накладаємо верхню складену кришку і фіксуємо гвинтовим способом кожен з перегородок з двох сторін шурупами 27.

Усі вузли кінцівок збираються за однаковим принципом. Спочатку необхідно з'єднати вісім серводвигунів 18 у фіксатори для двигунів 9-12 відповідно через шурупи 22 та 23. Далі описано алгоритм для збору лівої передньої ноги. У пази стегнової частини ноги 16 вставляємо підшипник 21 та лінійний важіль 19. Далі на ротор двигуна, що знаходиться в фіксаторі 9, насадити лінійний важіль 19, що закріплений у стегновій частині 16, та закріпити через гвинт. Аналогічним чином фіксуємо інший лінійний важіль 19 до ротора іншого серводвигуна, що з'єднаний з фіксатором 11. Виставляємо нульові положення двигунів, для цього повертаємо важелі до упору, за потреби можна змінити положення важелів та закріпити повторно. До лінійного важеля серводвигуна, що відповідає за рух гомілкової частини ноги, приєднуємо кінець з'єднувального стрижня 15 через шуруп 23. Наступний крок – з'єднати фіксатори через перегородку 13 та шурупи 22. Далі приєднуємо через гвинт 25 та гайку 26 гомілкову частину ноги 17 до стрижня 15. Опісля з'єднуємо стрижень 15 та внутрішній отвір підшипника 21, що знаходиться у стегновій частині 16, за допомогою гвинта 26 та гайки 27.

До фіксатора 9 з одного боку кріпимо круглий важіль 20 за допомогою двох шурупів 23, який в свою чергу кріпиться до ротора двигуна без фіксатора, що відповідає за вертикальний тазовий рух. Серводвигуни, що відповідають за горизонтальний і вертикальний рух тазу, повинні бути взаємно перпендикулярними.

Вузол кінцівки зібрано, тепер кріпимо його до корпусу. Фіксатор 9 через витягнутий боковий кінець приєднуємо до перегородки 5 через внутрішній отвір підшипника 21, який раніше був змонтований у цю ж перегородку. Далі серводвигун без фіксатора, що відповідає за вертикальний тазовий рух, кріпимо до перегородки 6. Аналогічним чином збираємо та приєднуємо до корпусу всі інші кінцівки.

Деталізований алгоритм збірки підтверджує, що конструкція прототипу є модульною та технологічно адаптованою під FDM-друк. Завдяки стандартизації вузлів кінцівок та використанню підшипників в ключових точках обертання, конструкція мінімізує люфти та забезпечує необхідну жорсткість для реалізації статичного балансування та наступних ітерацій R&D щодо динамічної ходи. Крім

того, завдяки цій модульності, конструкція є легко ремонтною, що критично важливо для зниження експлуатаційних витрат освітніх та дослідницьких платформ та гарантує її довгострокову актуальність як універсальної R&D-бази.

3.3. Розрахунок енергоспоживання та схема керування сервоприводами

Ефективне та надійне живлення є ключовим фактором для коректної реалізації алгоритмів руху чотириногих роботів. Необхідно забезпечити стабільне електроживлення для 12 сервоприводів, які є потужними споживачами, особливо під час пікових навантажень (наприклад, при статичному балансуванні або початку руху). Даний пункт присвячений розрахунку максимального струму споживання системи та детальному опису схеми підключення, що забезпечує ізоляцію силового живлення від керуючої електроніки.

3.3.1. Розрахунок енергоспоживання сервоприводів

Кількість сервоприводів: $N = 12$ шт.

Номінальна напруга живлення: $U_{\text{серво}} = 6$ В.

Струм споживання одним сервоприводом:

Струм холостого ходу: $I_{\text{хол}} \sim 100$ мА

Струм при роботі (номінальне навантаження): $I_{\text{роб}} \sim 500 - 700$ мА

Піковий струм (струм заклинювання або стартовий): $I_{\text{пik}} \sim 2.5$.

Оскільки всі 12 сервоприводів з'єднані паралельно, максимальний сумарний струм I_{Σ} (формула 3.1) розраховується як сума пікових струмів усіх двигунів. Хоча в реальних умовах піки струму рідко виникають одночасно на всіх двигунах, цей розрахунок є необхідним для безпечного вибору джерела живлення:

$$I_{\Sigma} = N * I_{\text{пik}} = 12 * 2.5\text{A} = 30\text{ A} \quad (3.1)$$

Для забезпечення стабільної роботи системи під час пікових навантажень необхідне джерело живлення, здатне видавати струм до 30 А при напрузі 6 В. Це підтверджує критичну необхідність використання високопродуктивного зовнішнього джерела для силової частини.

3.3.2. Архітектура силового живлення та підключення

Схема підключення сервоприводів до мікроконтролера Arduino Mega (рис. 3.3) реалізує принцип розділення живлення, що є ключовим для уникнення збоїв у керуючій логіці.

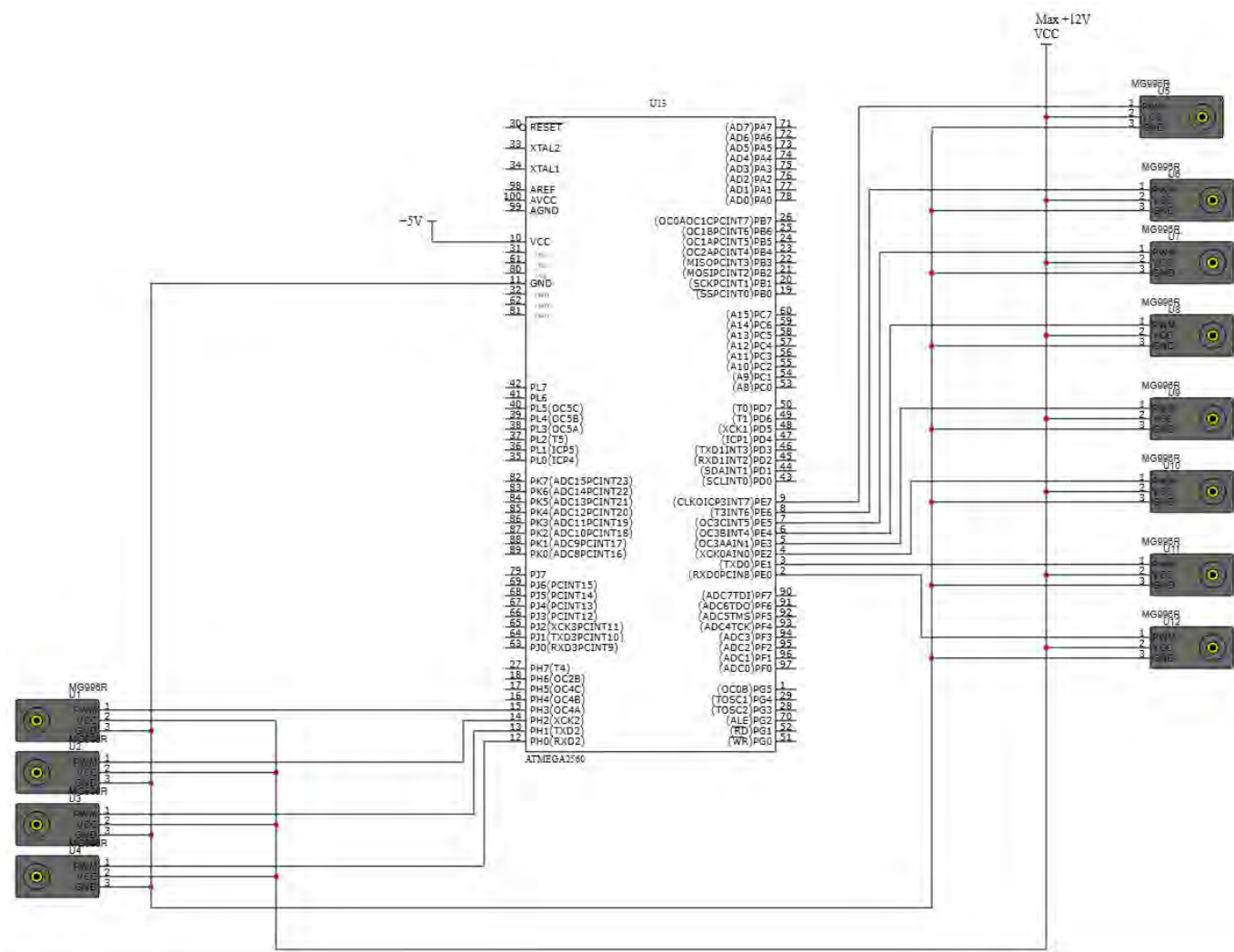


Рисунок 3.3. – Схема підключення сервоприводів до мікроконтролера Arduino Mega

Лінія Max +12 V на схемі позначає зовнішнє потужне джерело живлення (акумулятор), яке подає номінальну напругу 6 В безпосередньо на силові лінії (VCC) всіх 12 сервоприводів (MG996R). Використання 6 В забезпечує максимальний крутний момент 11 кг*см та швидкість спрацювання сервоприводів, що є необхідним для статичного балансування.

Мікроконтролер Arduino Mega та логіка отримують окреме, стабільне живлення 5 В. Ізоляція живлення запобігає падінню напруги на 5 V-лінії Arduino під час короткочасних стрибків струму до 30 А на силовій лінії.

Сервоприводи підключаються до Arduino Mega за стандартною трипровідною схемою. Силове живлення VCC (6 В) подається паралельно на всі 12 сервоприводів від потужного зовнішнього джерела, що є критичним для забезпечення струму до 30 А під час пікових навантажень. Провід GND (загальний нуль) є спільним для силової та керуючої частин, забезпечуючи загальну точку відліку. Кожен сервопривід отримує свій незалежний керуючий сигнал PWM (ШІМ) від окремого цифрового порту Arduino Mega. Схема демонструє ефективний розподіл, де сервоприводи 1-6 підключені до портів PL0 до PL5, а сервоприводи 7-12 використовують порти PE0 до PE5 та інші доступні ШІМ-виходи, що підтверджує стратегічний вибір плати Mega для керування такою великою кількістю виконавчих механізмів.

Застосування прямого підключення ШІМ-сигналів від Arduino Mega до кожного сервопривода та ізоляція силового живлення є найбільш надійним та простим архітектурним рішенням для керування багатоступеневою кінематикою.

Розрахунок енергоспоживання підтверджує, що пікове споживання струму системою становить до 30 А, що вимагає використання потужного, зовнішнього джерела живлення 6 В. Архітектура силового живлення, реалізована через повне ізолювання силової лінії від керуючої логіки Arduino Mega, є надійним інженерним рішенням. Ця схема підключення гарантує стабільність керуючого мікроконтролера під час пікових навантажень та забезпечує необхідну потужність для виконання алгоритмів статичного балансування та подальшого розвитку динамічної ходи.

Висновок до розділу

Розділ 3 підтвердив технологічну здійсненність та ефективність обраної апаратної платформи для створення універсальної R&D-бази. Була успішно розроблена та обґрунтована структурна схема керування, що базується на контролері Arduino Mega. Ключовим інженерним рішенням стало повне ізолювання силового

живлення сервоприводів від керуючої логіки, що запобігає збоям під час пікового споживання струму та забезпечує стабільність системи. Конструкція була адаптована під 3D-друк та включає модульні вузли кінцівок, що гарантує ремонтпридатність та доступність.

Особлива увага була приділена практичному аспекту: розроблений детальний покроковий алгоритм збірки та супровідна документація (додаток А.1 та А.2) є невід'ємною частиною проєкту. Це підвищує освітню цінність платформи, роблячи її придатною для використання як практичного посібника у навчальних лабораторіях. Таким чином, створений механічний та електронний фундамент є надійним та доступним, готовим до прийому керуючих алгоритмів та подальшої інтеграції спеціалізованого корисного навантаження.

РОЗДІЛ 4: ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Розділ присвячений розробці та практичній реалізації програмного забезпечення для багатофункціонального чотириноного робота. Основна мета — створення власного керуючого коду, який дозволить реалізувати базові рухи, синхронізувати роботу 12 сервоприводів та досягти статичного балансування прототипу.

Оскільки механічна конструкція є адаптованою, програмне забезпечення виступає ключовим елементом, що перетворює апаратну базу на функціональну роботизовану систему. У межах розділу буде представлено блок-схему алгоритму координації кінцівок, а також детальний аналіз керуючого коду, що забезпечив успішну реалізацію функції присідання. Цей функціонал підтверджує працездатність системи та є відправною точкою для подальшого впровадження складніших алгоритмів динамічної ходи.

4.1. Блок-схема та алгоритм керування кінематикою

Розробка алгоритму керування стала ключовим етапом роботи, оскільки саме програмний код забезпечує координацію 12 незалежних сервоприводів та реалізацію базових рухів. Оскільки метою була перевірка працездатності системи керування кінематикою, було розроблено алгоритм, що дозволяє реалізувати синхронне присідання та статичне балансування прототипу. Цей функціонал вимагає точного розрахунку кутів для кожного приводу, що досягається за допомогою прямої кінематики.

Блок-схема керуючого коду на рис. Б.1 та рис. Б.2 у додатку Б ілюструє послідовність виконання програми для реалізації функціоналу присідання. Програма має лінійну структуру з двома основними циклами, що відповідають за рух вниз і рух вгору.

Початковий етап виконання алгоритму включає підготовку програмного середовища: відбувається підключення бібліотеки `Servo.h` та оголошення 12 об'єктів «`Servo`», що відповідають за керування окремими приводами. Критичними кроками є

ініціалізація пінів (прив'язка об'єктів до ШІМ-виходів Arduino Mega) та встановлення початкових кутів, які були визначені експериментальним шляхом для забезпечення статичного балансування робота. Таким чином, програма готова до виконання рухових циклів.

Перший основний цикл алгоритму відповідає за присідання (рух вниз). Програма входить у цикл, де визначаються цільові кути для кінцевих точок присідання (наприклад, $\text{pos1}=140$). Умова перевірки (блок 8) постійно контролює, чи досягли поточні кути кінцівок заданого діапазону. Основний рух відбувається ітераційно: поточні кути кінцівок поступово змінюються з невеликим кроком ($++$ або $--$). Ця ітераційна зміна є ключовою для забезпечення плавності присідання і уникнення різких ривків, які могли б спричинити втрату балансу або пошкодження механіки. Після кожної ітерації вводиться мінімальна затримка ($\text{delay}(15)$), що дозволяє сервоприводам фізично виконати команду та запобігає перевантаженню мікроконтролера.

Після досягнення нижньої точки настає фіксація положення (затримка $\text{delay}(1000)$), після чого програма переходить до циклу 2: випрямлення (рух вгору). У цьому циклі визначаються нові цільові кути, які повертають робота до нульової позиції. Логіка залишається ітераційною: кути поступово змінюються у зворотному напрямку (блок 14), забезпечуючи плавність випрямлення. Умова перевірки контролює досягнення верхньої точки. Після виконання фінальної затримки програма завершує цикл та фіксує робота у стабільному початковому положенні.

Розроблений алгоритм, представлений блок-схемою, підтверджує, що вдалося створити функціональне програмне забезпечення, здатне керувати складною 12 DOF системою. Реалізація функціоналу синхронного присідання (через використання двох циклів і ітераційної зміни кутів) є прямим доказом виконання ключових завдань дисертації: координування роботи кінцівок та забезпечення статичного балансування. Хоча алгоритм не включає складні методи динамічного контролю, він є надійною основою, готовою до подальшого R&D-вдосконалення, включаючи інтеграцію сенсорів та розробку патернів ходи.

4.2. Реалізація керуючого коду та аналіз базового функціоналу

Реалізація керуючого коду є практичним доказом працездатності розробленої апаратно-програмної системи. Код, написаний на мові C++ для Arduino Mega, демонструє механізм прямого керування сервоприводами та використання ітераційних циклів для забезпечення плавності руху. Враховуючи, що кінематична схема має 12 ступенів свободи, досягнення синхронної роботи при реалізації функції присідання є головним інженерним досягненням, що підтверджує можливість статичного балансування. Ознайомитись з кодом можна у додатку В.

Представлений керуючий код підтверджує успішну реалізацію ключових інженерних рішень, необхідних для функціонування багатокоординатної системи. Головним досягненням є синхронізація 12 ступенів свободи (12 DOF), досягнута завдяки використанню 12 окремих об'єктів Servo та команд attach(), що забезпечує індивідуальне та ефективне керування кожним приводом. Крім того, експериментальне визначення кінематики (встановлення початкових та цільових кутів, наприклад, $pos1 = 140$) дозволило знайти оптимальне положення для статичного балансування прототипу. Це підтверджує успішне тестування системи та її готовність до виконання рухових команд.

Для забезпечення надійного виконання функції присідання було реалізовано плавність руху через ітераційні цикли for. Цей підхід, що використовує мінімальний крок зміни кута ($pos1 -= 1$) у поєднанні із затримкою ($delay(15)$), гарантує плавну зміну положення кінцівок. Це критично важливо для уникнення інерційних коливань, які могли б спричинити втрату стійкості, забезпечуючи узгоджений рух кінцівок. Два цикли for (рух вниз/рух вгору) також закладають базову структуру для подальшої розробки патернів ходи, що вимагатиме додавання методів інверсної кінематики та керування за часом.

Програмне забезпечення, представлене розробленим керуючим кодом, є практичним доказом виконання ключових завдань дисертації: створення власного алгоритму та забезпечення координації багатоступеневої системи. Успішна реалізація функції синхронного присідання та статичного балансування підтверджує

працездатність апаратно-програмної платформи та її готовність служити універсальною R&D-базою.

Висновок до розділу

Розділ 4 демонструє успішну практичну реалізацію програмного забезпечення, що є головним внеском роботи. Було розроблено та представлено блок-схему та керуючий код власного алгоритму, який забезпечив синхронну роботу 12 сервоприводів і досяг статичного балансування прототипу через реалізацію функції присідання. Ключове інженерне рішення полягало у застосуванні ітераційних циклів та затримок для забезпечення плавності руху та уникнення інерційних коливань. Хоча розроблений код не включає складних методів динамічного контролю, він є надійною та відкритою програмною основою, яка підтверджує функціональність системи та готова до подальшого R&D-вдосконалення, включаючи інтеграцію сенсорів та розробку патернів динамічної ходи.

РОЗДІЛ 5: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розділ 5 присвячений практичній перевірці функціональності розробленої апаратно-програмної платформи. Основною метою експериментального дослідження було підтвердження працездатності системи керування кінематикою та оцінка здатності прототипу реалізовувати базові рухи, необхідні для подальшого впровадження складних патернів ходи. Експерименти були сфокусовані на двох ключових завданнях: емпіричному визначенні статичного балансування та тестуванні функції синхронного присідання. Результати тестування дозволили не лише підтвердити виконання базових завдань, але й чітко визначити обмеження бюджетних компонентів системи та сформувати науково обґрунтовану дорожню карту для подальших R&D-ітерацій.

5.1. Методика експериментального визначення статичного балансування

Мета першого експерименту полягала у знаходженні оптимального початкового положення всіх 12 сервоприводів, за якого робот зберігає статичну стійкість на горизонтальній поверхні. Це положення, відоме як нульова позиція, є відправною точкою для всіх подальших рухових алгоритмів.

Експеримент з визначення статичного балансування розпочався з підготовки та ініціалізації всіх 12 сервоприводів згідно з кодом (розділ 4.3). Пошук нульової позиції проводився ітераційним методом, де кути кожного з 12 приладів (Hip-Yaw, Hip-Pitch, Knee-Pitch) коригувалися вручну за допомогою функції `for()`, а знайдені значення фіксувалися у блоці `setup()`. Критерієм успіху було визначено збереження роботом стійкості на рівній поверхні протягом не менше 30 секунд без сторонньої підтримки та помітних вібрацій. В результаті цього емпіричного пошуку було успішно знайдено 12 кутів для нульової позиції, що підтвердило працездатність апаратної платформи та її здатність витримувати власну вагу (крутний момент сервоприводів MG996R виявився достатнім для забезпечення статичного балансу).

В результаті експериментального пошуку було знайдено 12 кутів для нульової позиції, які забезпечили статичне балансування. Саме ці 12 значень були занесені в

блок `setup()` керуючого коду (розділ 4). Це підтвердило працездатність апаратної платформи та її здатність витримувати власну вагу (крутний момент сервоприводів MG996R є достатнім).

5.2. Тестування функції координації кінцівок (присідання)

Головна мета даного експерименту — підтвердити синхронність та плавність керування кінцівками за допомогою ітераційного алгоритму, розробленого в розділі 4. Експеримент полягав у циклічному виконанні функції присідання (рух вниз) з наступним випрямленням (рух вгору).

Для візуального підтвердження результатів та доказу досягнення статичної стійкості, було здійснено фотофіксацію прототипу в ключових фазах руху та положеннях:

Нульова позиція (вхідне статичне балансування у максимально низькій точці присідання) (рис. 5.1 та рис. 5.2) підтверджує, що в результаті експериментального пошуку кутів вдалося досягти статичного балансування та утримання ваги прототипу за допомогою 12 сервоприводів.

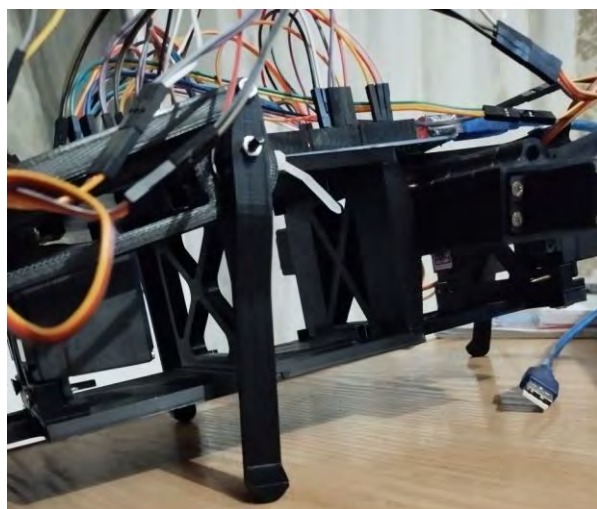


Рисунок. 5.1 - Фото прототипу збоку
робота у нульовій позиції

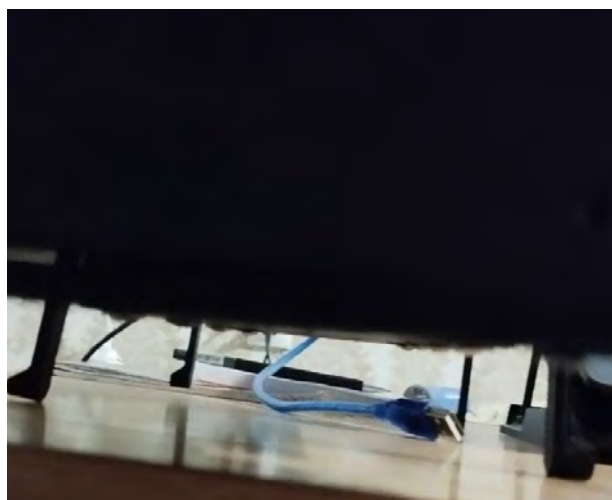


Рисунок. 5.2 - Фото прототипу
спереду робота у нульовій позиції

Фотофіксація у максимально високій точці присідання (рис. 5.3 та рис. 5.4) підтверджує успішну координацію 12 DOF та досягнення крайніх робочих кутів без втрати стійкості.



Рисунок. 5.3 - Фото прототипу збоку робота у максимальній висоті присяду

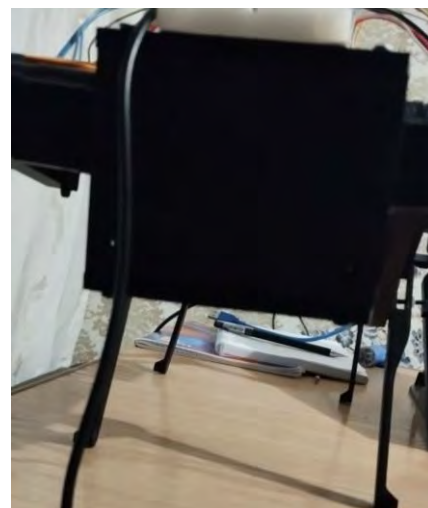


Рисунок. 5.4 - Фото прототипу спереду робота у максимальній висоті присяду

Експеримент підтвердив успішну реалізацію функції присідання, демонструючи, що прототип здатен виконувати циклічний рух плавно та синхронно. Це стало можливим завдяки надійній електронній архітектурі (розділ 3), де ізоляція силового живлення від керуючої плати Arduino Mega дозволила уникнути збоїв під час пікових навантажень на сервоприводи, які неминуче виникають при координованій зміні положення.

Критичним елементом успіху є розроблений програмний алгоритм. Використання ітераційних циклів `for` та малої затримки `delay(15)` забезпечило плавну зміну положення кінцівок. Цей підхід був необхідний для нівелювання люфтів бюджетних сервоприводів, що є критичним для підтримки статичної стійкості протягом усього циклу руху. Таким чином, експеримент доводить успішне виконання вимог дисертації щодо узгодженого руху кінцівок.

Крім того, фотофіксація робота у крайніх положеннях, де він демонструє самостійне утримання ваги, є прямим доказом досягнення необхідного рівня стабільності. Наявність відкритого доступу до електроніки на корпусі також візуально підкреслює реалізацію ключової вимоги до проєкту як відкритої R&D-платформи для подальшого вдосконалення.

5.3. Аналіз обмежень та обґрунтування результатів

Фінальний етап експериментального дослідження, який включав спроби реалізації динамічної ходи та бездротового керування, призвів до важливих наукових висновків щодо меж функціональності створеної платформи. При спробі інтегрувати навіть найпростіші патерни ходи, прототип втрачав баланс та не міг здійснити рух вперед. Це підтвердило, що просте ітераційне керування (на базі затримок delay) є достатнім лише для статичних рухів (присідання), але недостатнім для динамічних завдань, де потрібна швидка реакція на зміну центру маси.

Наукове обґрунтування цього обмеження вказує на необхідність кардинальної зміни архітектури керування. Динамічна хода вимагає обов'язкового використання сенсора IMU (Inertial Measurement Unit) для точного вимірювання нахилу та застосування методів адаптивного керування (наприклад, PID-регуляторів або LQR), які здатні миттєво реагувати на зовнішні збурення. Крім того, на успішність динамічної ходи критично впливають технічні обмеження MG996R, оскільки люфти редуктора, властиві бюджетним сервоприводам, знижують точність позиціонування, що є неприпустимим при динамічному русі.

Щодо обмежень керування, бездротове керування (Bluetooth/голос) не було реалізовано в межах проєкту. Хоча апаратна база (модуль Bluetooth HC-05) була включена у структурну схему (розділ 3), імплементація цього функціоналу вимагає окремого програмування протоколів зв'язку та парсингу команд (UART-комунікація). У зв'язку з пріоритетом реалізації та підтвердження базової кінематики, цей аспект є чітко сформульованим завданням для подальших напрямків R&D та розвитку відкритої платформи.

Висновок до розділу

Проведене експериментальне дослідження підтвердило працездатність розробленої апаратно-програмної платформи та досягнення ключових завдань дисертації, пов'язаних із керуванням кінематикою. Шляхом емпіричного пошуку було успішно знайдено 12 кутів для нульової позиції, що забезпечило стабільне статичне балансування прототипу. Вирішальним практичним досягненням стала успішна

реалізація функції синхронного присідання, яка наочно підтверджує, що розроблений програмний алгоритм та надійна електронна архітектура (з ізоляцією силового живлення) здатні ефективно координувати роботу 12 сервоприводів. Фотофіксація прототипу у крайніх робочих положеннях є прямим візуальним доказом досягнення необхідного рівня стійкості.

Аналіз результатів чітко розмежував можливості статичного та динамічного керування. Невдала спроба реалізації динамічної ходи та руху вперед призвела до важливого наукового висновку: для переходу від статичного до динамічного керування необхідне інтегрування сенсора IMU та використання адаптивних алгоритмів контролю (наприклад, PID-регуляторів). Також було підтверджено, що технічні обмеження бюджетних сервоприводів (люфти редуктора MG996R) є критичним фактором, що вимагає програмної корекції або використання більш точних приводів.

Незважаючи на обмеження, експериментальне дослідження підтверджує, що створений прототип є функціональною та відкритою R&D-платформою, готовою до подальшої імплементації. Таким чином, результати цього розділу не лише закривають початкові завдання дисертації, але й формують чітку, науково обґрунтовану дорожню карту для подальшого розвитку, зокрема, у напрямку бездротового керування та розробки алгоритмів для спеціалізованих місій.

РОЗДІЛ 6: РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ЧОТИРИНОГИЙ РОБОТ»

Розділ 6 присвячений маркетинговому, стратегічному та економічному обґрунтуванню комерційної реалізації розробленої багатофункціональної чотиринової платформи. Якщо попередні розділи сфокусовані на технічних та інженерних рішеннях, то даний розділ перетворює прототип на життєздатний стартап-проект. Основна мета полягає у доведенні реальної ринкової доцільності товару, який позиціонується як доступна та відкрита R&D-база для прототипування спеціалізованих місій, що раніше вимагало значних капіталовкладень.

У межах розділу послідовно проводиться технологічний аудит ідеї, який підтверджує можливість її реалізації на основі доступних компонентів (3D-друк, Arduino Mega), та детальний аналіз ринкового середовища. Застосування моделей SWOT та 5 Сил М. Портера дозволило виявити високу конкурентоспроможність проекту, яка ґрунтується на диференціації за рахунок відкритості архітектури та високої навчальної цінності. [19]

Фінальна частина розділу присвячена формуванню узгодженої системи стратегічних рішень, включаючи вибір стратегії диференціації та Нішера, обґрунтування оптимальної альтернативи впровадження («Освітній Kit & R&D База») та розробку детального маркетингового комплексу 4P (Товар, Ціна, Збут, Просування). Економічний аналіз завершує обґрунтування, підтверджуючи контрольовану точку беззбитковості та високу маржинальність, необхідну для фінансування подальших, критично важливих R&D-розробок (алгоритму ходи). [19] Таким чином, розділ визначає чіткий, реалістичний та економічно доцільний шлях виведення проекту на ринок.

6.1. Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

6.1.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Ідея стартап-проекту розширює функціональне призначення товару від суто навчальної платформи до універсальної R&D-бази, здатної стати основою для прототипування спеціалізованих квадрупедів (зокрема, для пошукових, рятувальних

та військових місій). У табл 6.1 подано зміст ідеї, можливі напрямки її застосування та основні вигоди для потенційних користувачів, акцентуючи на модифікованості та масштабованості платформи.

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та виробництво доступної, модульної, чотиринової роботизованої платформи (квадрупеда) з відкритою архітектурою (Open-Source), що слугує універсальною базою для інтеграції спеціалізованих сенсорів та виконавчих механізмів.	1. Навчання та R&D: вивчення складної кінематики, розробка алгоритмів руху та SLAM-систем у ВНЗ та дослідницьких лабораторіях.	Економія: значне зниження витрат на отримання функціональної бази для R&D порівняно з комерційними аналогами.
	2. Прототипування місій: швидке створення та тестування спеціалізованих квадрупедів (наприклад, для пошуково-рятувальних, інспекційних, військових, логістичних цілей) шляхом інтеграції додаткових модулів	Модульність та відкритість: можливість швидкої модифікації апаратного та програмного забезпечення під конкретні завдання.
	3. Індивідуальні проекти: створення високотехнологічних роботів ентузіастами та приватними розробниками.	Універсальність: доступ до складної 12 DOF кінематики, яка є основою для будь-якого вдосконаленого чотиринового робота (наприклад, тепловізор та більший акумулятор для військових цілей).

Ключова цінність проекту полягає у наданні доступного інструменту для прототипування складних спеціалізованих місій, що раніше було можливе лише за значних капіталовкладень. Така диференціація дозволяє проекту конкурувати як за ціною в освітньому сегменті, так і за технологічною гнучкістю у сегменті R&D

Порівняємо загальні характеристики з аналогами-конкурентами (табл. 6.2) Це порівняння має чітко показати, де саме стартап займає свою нішу, підкреслюючи, що "недоліки" (відсутність ходи та сенсорів) насправді є ключовими перевагами на цільовому ринку (освіта та R&D)

Таблиця 6.2. Порівняльна характеристика з аналогами

Критерій	Проект (платформа-основа)	Промислові роботи (наприклад, Spot)	DIY Набори (наприклад, на Arduino)
Основна мета продукту	Освітня та R&D платформа для розробки кінематики та сенсорики.	Готовий автономний робот для промислових і комерційних завдань.	Іграшка або проста демонстрація, обмежений функціонал.
Ціновий сегмент	Низький/Середній (орієнтовно \$500–\$1000).	Преміум (десятки/сотні тисяч доларів).	Дуже низький (часто менше \$100).
Апаратна архітектура	Відкрита та модульна. На основі поширених мікроконтролерів (наприклад, ESP32/Arduino).	Закрита. Власні високопродуктивні контролери.	Відкрита, але часто дуже спрощена.
Програмний код	Відкритий (власний алгоритм "присідання" як база). Заохочується модифікація коду.	Закритий. Користувач може писати лише API-скрипти.	Часто простий прикладний код.
Наявність сенсорів	Немає (універсальна "чиста" база).	Вбудовані високоточні сенсори, LiDAR, камери.	Базові ІЧ-датчики.
Ключова відмінність (УТП)	Найдоступніша база для розробки складних алгоритмів кінематики та інтеграції власних унікальних сенсорних систем.	Високий рівень автономності та надійності "з коробки".	Низька ціна, але обмежена можливість для серйозного R&D.

Продукт відрізняється тим, що він є ідеальним мостом між надто дорогими промисловими моделями та надто простими навчальними наборами. Робот доступний і дозволяє дослідникам глибоко втручатися в ядро керування (код, кінематику) та апаратне забезпечення. Прототип має достатньо складну механіку (багатосуглобову конструкцію), яка вимагає розробки складних алгоритмів керування — на відміну від простих, обмежених наборів.

Для визначення конкурентоспроможності проєкту необхідно провести порівняльний аналіз його техніко-економічних властивостей порівняно з існуючими на ринку аналогами та заміниками. 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. 6.3.

Конкурент 1: промисловий, наприклад, Spot; конкурент 2: DIY проєкт або навчальний набір; конкурент 3: товар-замінник, наприклад, колісний робот для освіти

Таблиця 6.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічна характеристика ідеї	Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1.	Складність кінематики	Багато-суглобова, 12DOF	Висока, промислова точність	Проста, 4-8DOF	Середня (колісний/гусеничний)			✓
2.	Архітектура ПЗ	Власний алгоритм	Закрита, API-інтерфейс	Відкритий, простий	Відкритий, простий			✓
3.	Наявність сенсорів	Немає	Вбудовані високоточні (LiDAR, IMU)	Базові (ІЧ, ультразвук)	Базові (ІЧ, одометрія)	✓		
4.	Рівень реалізованого руху	Базові рухи	Повна ходьба, динамічна стабілізація	Рух вперед/назад	Рух вперед/назад/поворот	✓		
5.	Модернізація	Висока	Низька	Середня	Середня			✓

Продовження таблиці 6.3

№ п/п	Техніко-економічна характеристика ідеї	Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
6.	Кінцева ціна	Низька/Середня	Дуже висока	Дуже низька	Низька			✓
7.	Доступність комплектуючих	Висока	Низька (спеціалізовані)	Висока	Висока			✓
8.	Цінність для навчання (R&D)	Висока	Середня	Низька	Середня			✓

Аналіз показав, що стартап-проєкт «Багатофункціональний чотириногий робот» має високу конкурентоспроможність на цільовому ринку освітньої та дослідницької робототехніки.

Незважаючи на слабкі сторони (W) у реалізованому рівні руху (W4) та наявності вбудованих сенсорів (W3), які є прямим наслідком бюджетної стратегії, проєкт має значну кількість сильних сторін (S). Ці переваги полягають у доступній ціні (S6), відкритій архітектурі (S2, S7) та високій модифікованості (S5), що перетворює робота на універсальну платформу (S3), ідеальну для навчання та науково-дослідних робіт (S8). Цей набір характеристик дозволяє проєкту ефективно заповнити нішу між дорогими промисловими аналогами та надто спрощеними навчальними наборами.

6.1.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

Переходимо до технологічного аудиту проєкту, де доводиться, що його реалізація цілком можлива завдяки використанню доступних технологій. Даний проєкт — це поєднання механіки, електроніки та програмування (табл. 6.4)

Таблиця 6.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Механічна частина: виготовлення корпусу та кінцівок.	3D-друк (FFF/FDM) пластиком (наприклад, PLA/PETG).	Наявна. Технологія масового виробництва та прототипування.	Доступна. Можливість використання власного 3D-принтера або послуг комерційних друкарень.
2.	Електронна частина: система керування.	Мікроконтролерні платформи (наприклад, Arduino, ESP32, Raspberry Pi Pico) та сервоприводи.	Наявна. Масово доступні, стандартизовані компоненти та драйвери.	Доступна. Компоненти є бюджетними.
3.	Програмна частина: взаємодія з кінцівками.	Програмування мікроконтролерів (C++/Python) та бібліотеки для керування сервоприводами.	Наявна та частково розроблена. Базовий код розроблено. Код для повної ходи потребує покращення.	Доступна. Необхідні знання та навички програмування.
4.	Інтеграційна частина: складання та тестування.	Методи інтеграції мехатроніки та тестування функціоналу.	Наявна. Стандартні інженерні методики.	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проєкту:

Гібридна технологія прототипування та виробництва, що поєднує

1. 3D-друк (PLA) для швидкого, дешевого та ітеративного виготовлення механічних компонентів (корпус, кінцівки).
2. Відкриті мікроконтролерні платформи (наприклад, Arduino Mega) для забезпечення доступної та модифікованої електронної бази.
3. Власна розробка програмного забезпечення для створення унікального алгоритму руху.

Технологічна реалізація проєкту є можливою. Всі ключові технології, необхідні для створення прототипу (3D-друк, мікроконтролери та базове програмування керування), є наявними, масово доступними та бюджетними. Хоча фінальний алгоритм ходи потребує вдосконалення (як зазначено в п. 3), база для цього вже створена. Це підтверджує, що ідея є технологічно здійсненною і не вимагає винаходу принципово нових технологій.

6.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ключових показників стану ринку, таких як його динаміка та наявність бар'єрів для входу, дозволить зробити висновок про його привабливість. Основні показники, що характеризують потенційний ринок стартап-проекту «Багатофункціональний чотириногий робот», подано у табл. 6.5.

Таблиця 6.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку	Пояснення
Обсяг ринку (За методикою PAM, TAM, SAM, SOM)	TAM (Total Available Market): Світовий ринок мобільної робототехніки. SAM (Serviceable Available Market): Глобальний ринок навчальних (освітніх) робототехнічних платформ. SOM (Serviceable Obtainable Market): Ринок доступних, відкритих чотириногих платформ для ВНЗ та невеликих R&D лабораторій в Україні, Східній Європі та країнах, що розвиваються.
Кількість головних гравців, од	Дві основні групи: 1. Преміум гравці (Boston Dynamics, ANYbotics — одиниці); 2. Масові виробники (виробники простих DIY наборів — десятки). У ніші відкритої, складної, але доступної платформи — одиниці.
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Якісна оцінка: Обсяг продажів у ніші SOM оцінюється як невеликий, але стабільний, з високим потенціалом зростання завдяки потребі у локальній підготовці інженерних кадрів.
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає. Світовий ринок робототехніки демонструє прискорене зростання. Освітній сегмент зростає завдяки державним програмам підтримки інженерної освіти та мехатроніки.
Стадія життєвого циклу галузі	Стадія прискореного зростання. Технологія чотириногої ходи стає стандартом, але масові освітні платформи тільки формуються. Галузь активно розвивається завдяки зниженню вартості компонентів.

Ринок для стартап-проекту «Багатофункціональний чотириногий робот» знаходиться на стадії прискореного зростання і демонструє позитивну динаміку. Проект орієнтується на специфічний сегмент SOM — доступні, відкриті платформи для освіти та R&D.

Ключові обмеження для входу пов'язані не з високими капітальними витратами, а з необхідністю надання високоякісної технологічної підтримки та боротьбою за впізнаваність бренду у світі, де домінують великі гравці. Однак, завдяки низькій ціні та відкритій архітектурі (сильні сторони проекту), існує високий потенціал для

швидкого проникнення в освітній та малий R&D сегменти, де вартість є критичним фактором.

Після попередньої оцінки привабливості ринку критично важливим етапом є чітке визначення цільових груп споживачів (ЦГС) та їхніх специфічних вимог до потенційного товару. Оскільки проєкт орієнтований на нішу відкритих мехатронних платформ, ми виділяємо дві основні категорії покупців: організації, що займаються освітою та науковими дослідженнями, та індивідуальні розробники. У табл. 6.6 детально охарактеризовано цільові сегменти, їхні потреби та очікування від продукту та компанії-постачальника.

Таблиця 6.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару/компанії-постачальника
1.	Доступ до платформи для навчання складної кінематики.	ВНЗ та Освітні установи (B2B).	Цикл купівлі довгий, через тендери. Чутливість до наявності методичної бази та сертифікації.	До продукції: надійність, повна технічна документація, низька кінцева ціна. До постачальника: гарантія, пряма технічна підтримка.
2.	Потреба у гнучкій та бюджетній базі для R&D прототипування.	Технічні лабораторії та R&D відділи (B2B).	Цикл купівлі середній. Чутливість до відкритості архітектури (коду/3D-моделей) та можливості кастомізації.	До продукції: відкрита архітектура ПЗ/АП, 12 DOF, можливість модернізації. До постачальника: наявність спільноти, швидкі консультації.
3.	Потреба у складному, але доступному DIY-проєкті.	Індивідуальні розробники та ентузіасти (B2C).	Цикл купівлі короткий. Чутливість до кінцевої ціни, легкості збірки та якості туторіалів.	До продукції: низька кінцева ціна, доступність комплектуючих. До постачальника: швидка логістика (Kit), відео-інструкції.

Дослідження підтверджує, що цільова аудиторія залишається гібридною, але з'являється високомаржинальний сегмент спеціалізованих R&D (ЦГС 4). Це вимагає від компанії підтримки подвійного стандарту: низької ціни та навчальної цінності для

B2C/ВНЗ та високої надійності та можливості масштабування потужності для спеціалізованих структур.

Аналіз зовнішнього ринкового середовища є критично важливим для формування реалістичної стратегії ринкового впровадження. Необхідно ідентифікувати як сприятливі фактори (можливості), що дозволяють проєкту реалізувати його сильні сторони, так і несприятливі фактори (загрози), які можуть перешкоджати досягненню цілей. Нижче, у табл. 6.7 та табл. 6.8, представлено ключові зовнішні фактори ризику та потенціалу, ранжовані за їхньою значущістю для стартап-проєкту.

Таблиця 6.7. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Технологічний бар'єр (Недосконалість базового ПЗ)	Наявність лише базових рухів (присідання) створює ризик, що ЦГС 2 (R&D) віддадуть перевагу конкурентам, які вже мають готові алгоритми ходи.	Випуск регулярних оновлень (v1.1, v1.2) з новими алгоритмами ходи (навіть бета-версіями) та активне залучення спільноти (ЦГС 3) до спільної розробки.
2.	Висока чутливість ЦГС 1 та 3 до ціни	Зростання собівартості компонентів може нівелювати ключову конкурентну перевагу — доступність.	Пошук альтернативних постачальників, перехід на масове замовлення компонентів та подальша стандартизація 3D-моделі для зменшення витрат на друк.
3.	Ризик появи дешевих аналогів з Азії	Масові виробники можуть випустити ще більш дешеві, але подібні чотириногі платформи, конкуруючи виключно за ціною.	Акцент на навчальній цінності (якісна документація, методички) та модифікованості (відкритий код і апаратна база), що не зможуть забезпечити масові виробники.
4.	Низька впізнаваність нового бренду	Недовіра освітніх установ та R&D лабораторій (ЦГС 1, 2) до невідомого постачальника у порівнянні з гігантами ринку.	Пілотні проєкти з ВНЗ (безкоштовна передача кількох одиниць для тестування), публікація наукових статей та участь у профільних конференціях.
5	Проблеми з якістю компонентів (сервоприводи)	Використання бюджетних сервоприводів може призвести до швидкого виходу їх з ладу та негативного впливу на репутацію.	Пропонувати базову комплектацію (бюджетні сервоприводи) та преміум-комплектацію (більш надійні приводи) за вищою ціною, чітко інформуючи клієнтів про гарантійні зобов'язання.

Таблиця 6.8. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання попиту на STEM-освіту та мехатроніку	Урядові програми та гранти на модернізацію освітньої бази ВНЗ, що відкриває великий канал збуту (ЦГС 1).	Комплект має включати не лише роботу, а й методичні матеріали та лабораторні роботи з кінематики, що відповідають навчальним програмам.
2.	Відсутність складних, але доступних конкурентів у ніші	Існує великий "ціновий розрив" між дорогими промисловими та примітивними DIY-роботами. Проєкт заповнює цю порожню нішу (SOM).	Активна комунікація УТП ("Складна кінематика за ціною навчального набору"). Створення двох ліній: "Навчальний Kit" та "R&D База".
3.	Тренд на Open-Source апаратне та програмне забезпечення	Спільнота інженерів (ЦГС 3) та R&D (ЦГС 2) охоче приймає та підтримує проєкти з відкритою архітектурою.	Створення репозиторію на GitHub, проведення хакатонів та конкурсів на найкращий алгоритм ходи або інтеграцію сенсорів. Це прискорить доопрацювання продукту.
4.	Низькі бар'єри для виходу на міжнародний ринок	3D-друк та загальнодоступні компоненти дозволяють легко експортувати продукт як комплект для самостійної збірки (DIY Kit), мінімізуючи логістичні витрати.	Розробка якісних інструкцій англійською мовою та початок продажів на міжнародних маркетплейсах (наприклад, Tindi).
5	Можливість співпраці з 3D-друкарнями та MakerSpaces	Існує широка мережа локальних 3D-друкарень, які можуть стати виробничими партнерами та точками збуту для індивідуальних розробників.	Розробка ліцензійної програми для партнерів-друкарень, що дозволить їм друкувати механічні частини на місцях, знижуючи логістичні витрати та час доставки для кінцевого споживача.

Деталізований аналіз зовнішнього середовища свідчить про те, що ринкові можливості у сегменті освітньої та R&D робототехніки значно переважають існуючі загрози. Основним завданням для стартапу є використання зростання попиту на STEM-освіту (Можливість 1) та тренда на Open-Source (Можливість 3) для нівелювання головних загроз: технологічного бар'єру (Загроза 1) та низької впізнаваності бренду (Загроза 4). Це формує міцну основу для розробки стратегії ринкового впровадження проєкту. Продовжуємо аналіз пропозиції. Заповнимо табл. 6.9, сфокусувавшись на ніші доступних, відкритих платформ для освітньої та R&D робототехніки.

Таблиця 6.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	У чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1.	Тип конкуренції	Монополістична конкуренція. На ринку існує велика кількість продавців (DIY набори, навчальні роботи), які пропонують диференційовані товари (за функціоналом, складністю та ціною).	Необхідність створювати сильний унікальний торговельний проєкт (УТП), фокусуючись на відкритості архітектури та складності кінематики, щоб виділитися серед простих аналогів.
2.	Рівень конкурентної боротьби	Глобальний/національний. Ринок простих DIY-наборів (ЦГС 3) є глобальним. Ринок ВНЗ (ЦГС 1) та R&D (ЦГС 2) є більш національним, оскільки закупівлі часто орієнтовані на місцевих постачальників або тендерні вимоги.	Спочатку зосередитися на національному ринку (ЦГС 1, 2) для отримання репутації та кейсів, а потім масштабуватися на глобальний ринок (ЦГС 3) через онлайн-платформи (продаж Кіт-наборів).
3.	За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева конкуренція. Боротьба відбувається між виробниками робототехнічних платформ, які задовольняють одну й ту саму потребу: практичне навчання та дослідження.	Постійне технологічне вдосконалення (доопрацювання алгоритмів ходи) та розширення функціоналу (додавання модульності) для випередження існуючих аналогів.
4.	Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова конкуренція. Конкуренція з колісними, гусеничними та роботизованими маніпуляторами, які є альтернативними платформами для R&D та освіти.	Підкреслення унікальних переваг чотиринової платформи: мобільність на нерівних поверхнях (перспектива), вивчення складної динамічної стабілізації, що неможливо на колісних роботах.
5.	За характером конкурентних переваг	Нецінова конкуренція. Переваги ґрунтуються не лише на ціні (хоча вона низька), а й на унікальних характеристиках: відкритий код, модифікованість, освітня цінність та складність кінематики.	Активне просування навчальних та R&D переваг. Ціна використовується для входу на ринок, але утримання клієнта — через якість коду та підтримку.
6.	За інтенсивністю	Марочна (брендова) конкуренція у сегменті R&D (Boston Dynamics — висока довіра). Низька у сегменті DIY.	Необхідність побудови власного бренду, що асоціюється з надійністю та інженерною відкритістю. Здобуття довіри через публікації та пілотні проєкти.

Загальний аналіз конкурентного середовища свідчить про домінування монополістичної конкуренції, де успіх залежить від диференціації продукту. Для забезпечення конкурентоспроможності стартап-проекту ключовими діями є:

1. Фокус на відкритості, модифікованості та високій освітній цінності, що є сильними сторонами проекту.
2. Пріоритетне доопрацювання алгоритмів ходи для випередження існуючих аналогів та реалізації повного потенціалу чотиринової платформи.
3. Акцент на ніші, де колісні роботи (товарно-видові конкуренти) не можуть запропонувати адекватну заміну — вивчення динамічної стабілізації та складної кінематики.

Детальний аналіз умов конкуренції в галузі є визначальним для оцінки її привабливості та ризиків. З цією метою застосовується модель п'яти сил конкуренції М. Портера, яка дозволяє комплексно оцінити вплив на проект з боку прямих конкурентів, потенційних новачків, постачальників, клієнтів та товарів-замінників. Результати аналізу, що визначають інтенсивність боротьби та силу кожного агента на ринку доступних R&D платформ, представлені у табл. 6.10

Таблиця 6.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновок	Визначити інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів	Чи є потенційні конкуренти? Строки виходу їх на ринок?	Чи постачальники диктують умови роботи на ринку? Які?	Чи клієнти диктують умови роботи на ринку? Які?	Обмеження для роботи на ринку через товари-замінники

Продовження таблиці 6.10

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Аналіз та висновки	Прямі конкуренти: 1. Виробники преміум-роботів (Spot, ANYmal). 2. Виробники простих DIY наборів. 3. Виробники відкритих колісних/гусеничних R&D платформ. Інтенсивність: середня. Боротьба відбувається не за ціною, а за диференціацією (відкритість/складність).	Бар'єри входу: низькі (завдяки 3D-друку та доступним компонентам). Можливість: висока для компаній, що мають сильні навички у програмуванні кінематики. Строки: короткі. Будь-яка R&D команда може швидко створити подібний прототип.	Сила: низька/середня. Товар використовує стандартизовані, масові компоненти Постачальників багато, і їх легко замінити. Умови: постачальники не диктують умови, окрім ринкових цін на компоненти.	Сила: висока. Клієнти (ВНЗ, R&D) мають високу чутливість до ціни та великий вибір між замінниками (колесні платформи). Умови: клієнти диктують умови: потрібна відкритість, низька ціна та якісна документація.	Загроза: висока. Товари-замінники (колесні/гусеничні і робототехнічні платформи) є набагато простішими для реалізації (немає складної кінематики) і часто дешевшими. Обмеження: необхідність чітко доводити переваги чотиринової ходи для навчання та R&D.

Аналіз за моделлю М. Портера підтверджує, що ринок є складним через високу силу клієнтів та загрозу товарів-замінників (колесних роботів). Проте, проєкт має принципову можливість для роботи, оскільки його унікальні характеристики такі як відкритість, модифікованість та складність кінематики дозволяють успішно конкурувати шляхом диференціації, а не цінової боротьби. Для забезпечення конкурентоспроможності критично важливо розвивати саме технологічну відкритість та високу навчальну цінність продукту.

На основі узагальнення результатів попередніх етапів аналізу, включаючи оцінку конкурентів (табл. 6.3 та 6.10), вимог клієнтів (табл. 6.6) та зовнішніх факторів (табл. 7-8), необхідно визначити ключові чинники, які забезпечать конкурентоспроможність проєкту на ринку. Обґрунтування цих факторів є фінальним етапом маркетингового аудиту. У табл. 6.11 представлено перелік стратегічних конкурентних переваг стартап-проєкту

Таблиця 6.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Висока економічна доступність (низька ціна)	Чинники: використання бюджетних компонентів та 3D-друку. Значущість: нівелює силу преміум-конкурентів (Spot) і відповідає ключовій вимозі ЦГС 1 та 3 (освітні установи, індивідуальні розробники), де цінова чутливість є високою
2.	Відкрита та модульна архітектура	Чинники: відкритий програмний код, доступ до керуючих портів, використання поширених мікроконтролерів. Значущість: це ключовий елемент нецінової конкуренції. Відповідає вимогам ЦГС 2 (R&D) щодо модифікованості та нівелює загрозу закритих систем, дозволяючи інтегрувати власні сенсори
3.	Висока навчальна та дослідницька цінність	Чинники: складна багатосуглобова кінематика (12 DOF) вимагає самостійної розробки алгоритмів керування (навіть для базової ходи). Значущість: чітко диференціює проєкт від простих DIY-наборів та колісних замінників. Забезпечує високу цінність для ЦГС 1 та 2, оскільки фокусує на ядерній компетенції робототехніки
4.	Технологічна універсальність	Чинники: пропонується "чиста" база. Значущість: перетворює слабку сторону на сильну, тобто забезпечує гнучкість для R&D команд (ЦГС 2), які можуть встановлювати будь-яке спеціалізоване обладнання (камери, LiDAR) без переплати за небажані компоненти.
5.	Простота обслуговування та ремонту	Чинники: використання стандартизованих сервоприводів та 3D-друку. Значущість: знижує експлуатаційні витрати, що є критичним для бюджетів ЦГС 1 (ВНЗ), де потрібне швидке та дешеве відновлення після експлуатації студентами.

Визначений перелік факторів конкурентоспроможності підтверджує, що проєкт має чітко окреслену та обґрунтовану ринкову нішу. Перевага проєкту базується на поєднанні доступності з високою навчальною цінністю та технологічною відкритістю. Це дає можливість ефективно протистояти ціновій чутливості клієнтів та нівелювати загрозу з боку простіших товарів-замінників. Наявність цих обґрунтованих факторів є підґрунтям для розробки подальшої стратегії ринкового впровадження (комплекс 4P).

Переходимо до останнього підпункту аналізу конкурентоспроможності — аналізу сильних та слабких сторін на основі факторів, визначених у таблиці 6.11. Ця

табл. 6.12 фактично є продовженням аналізу, де ми оцінюємо, наскільки проєкт перевершує (+) або поступається (-) конкурентам за найважливішими факторами.

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

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (вага фактора) 1-20	Рейтинг товару-конкурента: промисловий R&D робот (Spot)	Рейтинг товару-конкурента: простий навчальний DIY набір	Сила/слабкість проєкту
I. Функціонально-технічні фактори					
1.	Висока навчальна та дослідницька цінність (складна кінематика)	18	-2	+3	Сильна
2.	Відкрита та модульна архітектура (ПЗ та апаратна частина)	17	+3	+1	Сильна
3.	Рівень реалізованого руху (базові рухи vs ходьба)	15	-3	-1	Слабка
II. Економічні фактори					
4.	Висока економічна доступність (низька ціна)	20	+3	-1	Сильна
5.	Простота обслуговування та ремонту	12	+2	-1	Сильна
III. Маркетингові фактори					
6.	Технологічна універсальність (для власних сенсорів)	14	+1	+2	Сильна

Обґрунтування Рейтингу:

1. Проєкт значно поступається промисловим роботам за рівнем готового функціоналу (-2), але значно перевершує (+3) прості DIY-набори, оскільки вимагає вивчення складної кінематики.

2. Відкритість архітектури - це найбільша перевага над закритими промисловими роботами (+3). Над DIY-наборами перевага менша (+1), оскільки вони також часто відкриті, але код складніший.
3. Рівень руху є слабкою стороною, оскільки реалізовано лише базові рухи. Проєкт значно поступається промисловим (-3) і навіть трохи простим DIY-наборам (-1), які часто можуть виконувати базову ходьбу.
4. Доступність (ціна) - головна перевага над промисловими моделями (+3). поступається простим DIY-наборам (-1), які можуть бути ще дешевшими.
5. Завдяки 3D-друку та поширеним компонентам, проєкт значно легше ремонтувати, ніж промислові аналоги (+2), але трохи складніше, ніж найпростіші DIY-набори (-1).

Проведений аналіз підтверджує, що стартап-проєкт «Багатофункціональний чотириногий робот» має п'ять основних сильних сторін та одну ключову слабку сторону. Ключовими перевагами є економічна доступність (вага 20) та висока навчальна цінність (вага 18), які є критичними для проникнення в сегмент освітньої та R&D робототехніки. Єдина, але значуща слабка сторона – це низький рівень реалізованого руху (-3), що вимагає концентрації ресурсів на доопрацюванні програмного забезпечення (алгоритму ходи) на наступних етапах розвитку стартапу.

Фінальний і узагальнюючий крок, який інтегрує всі попередні висновки - SWOT-аналіз. Він поєднує внутрішні фактори (сильні та слабкі сторони, табл. 6.12) із зовнішніми (можливості та загрози, табл. 6.7 і 6.8). Заповнимо табл. 6.13. SWOT-аналіз стартап-проєкту.

Таблиця 6.13. SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (S) – внутрішні переваги проєкту	Слабі сторони (W) – внутрішні обмеження проєкту
S1. Низька ціна, що робить продукт доступним для освіти та R&D.	W1. Наявність лише базових рухів (присідання), повна ходьба відсутня.
S2. Відкрита архітектура ПЗ та обладнання.	W2. Потреба клієнта самостійно додавати базові сенсори.

Продовження таблиці 6.13

Сильні сторони (S) – внутрішні переваги проекту	Слабі сторони (W) – внутрішні обмеження проекту
S3. Складна кінематика (12 DOF) стимулює самостійну розробку алгоритмів.	W3. Відсутність сформованого бренду та сервісної мережі.
S4. Простота заміни компонентів та ремонту (3D-друк).	W4. Обмеження точності та надійності через використання бюджетних компонентів.
S5. Відсутність сенсорів як чиста база для будь-якого вдосконалення.	W5. Ризик виходу з ладу бюджетних сервоприводів.
Можливості (O) – зовнішні сприятливі фактори	Загрози (T) – зовнішні несприятливі фактори
O1. Зростання попиту на STEM-освіту.	T1. Поява ще більш дешевих, хоча й примітивних, аналогів з Азії.
O2. Існує великий ціновий розрив між промисловими та DIY-роботами (SOM).	T2. Перехід клієнтів на простіші та вже реалізовані колісні/гусеничні платформи.
O3. Активна підтримка та доопрацювання продукту інженерною спільнотою.	T3. Ризик зростання цін на мікроконтролери та сервоприводи.
O4. Можливість продажу комплекту (Kit) по всьому світу.	T4. Складність швидкого доопрацювання алгоритму ходи власними силами.
O5. Створення локальної партнерської мережі для виробництва та збуту.	T5. Посилення значущості цінового фактора при виборі товару (цінова конкуренція).

Фінальний SWOT-аналіз підтверджує, що для успішного ринкового впровадження проекту слід реалізувати наступальну стратегію (SO): використовувати економічну доступність (S1) та високу навчальну цінність (S3) для швидкого зайняття незайнятої ніші (O2) у сфері STEM-освіти (O1).

Для нівелювання ключових слабких сторін (W1 – відсутність ходи) та загрози (T4 – технологічний бар'єр), необхідно активно використовувати можливості Open-Source (O3) та співпрацю з 3D-друкарнями (O5). Пріоритетним напрямом стартапу на початковому етапі є фокус на освітній цінності, а не на автономному функціоналі, що вимагає концентрації ресурсів на програмному забезпеченні та методичній підтримці.

На основі проведеного SWOT-аналізу та виявлених сильних сторін, загроз і можливостей, необхідно сформувати кілька стратегічних альтернатив ринкової поведінки проєкту. Ці альтернативи оцінюються з точки зору складності залучення необхідних ресурсів та часових рамок їх реалізації. Вибір оптимальної стратегії дозволить мінімізувати ризики та найбільш ефективно використати конкурентні переваги проєкту. Альтернативи ринкового впровадження подано у табл. 6.14.

Таблиця 6.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Стратегія «Освітній Kit & R&D База» (Фокус на ЦГС 1, 2, 3) Заходи: фіналізація 3D-моделі та коду базових рухів, розробка якісних методичних матеріалів та технічних інструкцій для R&D. Збут через тендери ВНЗ та онлайн-платформи.	Висока. Ресурси (час, кошти) необхідні на створення документації та освітнього контенту. Фінансування можливе через перші продажі та освітні гранти.	Стислі (3–6 місяців). Швидкий вихід на ринок для отримання зворотного зв'язку та фінансування.
2.	Стратегія «Нішевий Спеціаліст» (Фокус на ЦГС 4) Заходи: глибока R&D розробка алгоритму ходи та динамічної стабілізації, інтеграція потужніших сервоприводів та акумуляторів, демонстрація здатності нести тепловізор або спеціалізоване навантаження.	Низька/середня. Потребує значних зовнішніх інвестицій (венчурний капітал або державне фінансування/гранти на оборону). Високий технологічний ризик.	Довгі (12–18 місяців і більше). Вимагає повного циклу НДДКР для досягнення автономної ходи.
3.	Стратегія «Масштабування Open Source» (Фокус на ЦГС 2, 3) Заходи: активне залучення глобальної спільноти до доопрацювання коду та механіки, створення екосистеми аксесуарів, мінімальна комплектація продукту.	Середня. ресурси потрібні на підтримку спільноти та розробку репозиторію. Окупність залежить від успіху спільноти.	Середні (6–12 місяців). Повна реалізація залежить від внеску спільноти та швидкості її зростання.

Обрана альтернатива: стратегія «Освітній Kit & R&D База». Обрана альтернатива є найбільш ефективною для старту проєкту, оскільки: стратегія спирається на вже реалізований функціонал (базові рухи) та сильні сторони проєкту (економічна доступність). Вона дозволяє отримати перші продажі та фінансові ресурси через освітній сегмент, які необхідні для фінансування дорогої R&D розробки (хода/динамічна стабілізація, необхідна для альтернативи 2). Також

швидкий вихід на ринок мінімізує ризики, пов'язані з технологічним бар'єром (Т4), та дозволяє закріпитися у ніші до виходу потенційних конкурентів.

6.3. Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

6.3.1. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ефективної ринкової стратегії розпочинається з чіткого визначення стратегії охоплення ринку. З огляду на гібридний характер проєкту (B2B та B2C) та обмеженість початкових ресурсів, необхідно оцінити потенційні цільові сегменти за їхньою готовністю до сприйняття продукту, інтенсивністю конкуренції та простотою входу. У табл. 6.16 наведено порівняльний аналіз цільових груп для обґрунтування вибору оптимальної стратегії.

Таблиця 6.16. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Освітні установи (B2B)	Висока. Потреба у доступній, але складній платформі для лабораторних робіт є гострою, оскільки промислові аналоги недоступні.	Середній/високий. Попит стабільний, підтримується державними програмами STEM-освіти.	Низька. Немає прямих конкурентів, які пропонують таке поєднання складності + доступності.	Середня. Потребує підготовки методичної бази та участі у тендерах.
2.	Науково-дослідні (R&D) лабораторії та технологічні стартапи (B2B)	Середня. Сприйняття залежить від рівня відкритості та легкості інтеграції власних сенсорів. Потрібен час для тестування.	Низький/середній. Попит нішевий, але з високою маржинальністю.	Середня. Конкуренція з відкритими колісними платформами та необхідність боротися за довіру.	Середня. Потребує якісної технічної підтримки та демонстрації успішних кейсів.

Продовження таблиці 6.16

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
3.	Індивідуальні розробники та інженери-ентузіаста (B2C)	Висока. Спільнота активно шукає складні, але бюджетні Open-Source проєкти для особистого навчання.	Низький/середній. Попит нестабільний, але забезпечує швидкий початковий збут та зворотний зв'язок.	Висока. Сильна конкуренція з дешевими DIY-наборами та простими роботами.	Висока. Потребує мінімальних ресурсів (онлайн-магазин, GitHub).

За результатами аналізу було обрано стратегію диференційованого маркетингу, сфокусовану на освітніх установах (B2B) як на ключовому сегменті, та індивідуальних розробниках (B2C) як на допоміжній і Open-Source базі. Цей вибір обґрунтований високою потребою освітнього ринку у доступній платформі та низькою конкуренцією у цій ніші. Обрана стратегія дозволить забезпечити стабільний початковий збут та задіяти інженерну спільноту для доопрацювання ключового функціоналу (алгоритму ходи). Наступним етапом є деталізація маркетингового комплексу 4P відповідно до потреб обраних цільових груп.

Вибір здійснюється на основі аналізу ключових конкурентоспроможних позицій проєкту, визначених раніше (табл. 6.11), з урахуванням трьох основних стратегій за М. Портером. Визначення базової стратегії розвитку подано у табл. 6.17.

Таблиця 6.17. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей (стратегія SO за SWOT)	Диференційований маркетинг (фокус на ВНЗ та R&D)	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотний зв'язок з клієнтами (через Open Source), висока навчальна цінність.	Стратегія диференціації

Продовження таблиці 6.17

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
2.	Використання Open-Source тренду для нівелювання слабких сторін (стратегія WO)	Диференційований маркетинг	Технологічна відкритість для спільного доопрацювання алгоритмів ходи (W1), доступність та ремонтпридатність.	Стратегія диференціації
3.	Перетворення слабкості (ціна) на силу (цінність) (стратегія ST)	Диференційований маркетинг	Найкраще співвідношення ціна/функціонал у ніші, модульність для інтеграції власних сенсорів (відповідь на загрозу T2).	Стратегія диференціації

Для проєкту обрано стратегію диференціації. Такий вибір обґрунтований тим, що проєкт має унікальні нецінові переваги: відкрита архітектура та складна кінематика, які не можуть бути легко скопійовані конкурентами, і які цінні для ЦА. Диференціація дозволяє знизити тиск з боку цінової конкуренції та товарів-замінників, створюючи стійку прихильність клієнтів на основі високої навчальної цінності продукту.

Продовжуємо розробку стратегії. Проєкт є технологічно новим у ніші доступних платформ, але не може прямо кинути виклик лідерам (Spot). Тому ми вибираємо одну з адаптивних стратегій (табл. 6.18).

Таблиця 6.18. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так, у ніші. Проєкт є першим у ніші доступних, відкритих та складних чотириногих платформ (SOM).	Шукати нових. Основна мета — залучення ВНЗ, які раніше не могли дозволити роботів. Також шукатиметься лояльність індивідуальних розробників.	Копіювати технічні принципи. Копіюються принципи складної кінематики, відкритість та модульність.	Стратегія заняття конкурентної ніші (Нішера)

Продовження таблиці 6.18

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
2.	Ні, у галузі. Компанія не є лідером і не може фронтально атакувати лідерів (Boston Dynamics).	Забирати у замінників. Компанія активно переманюватиме клієнтів від колісних/гусеничних навчальних платформ, доводячи переваги чотиринової ходи.	Ні, не копіювати. Уникається копіювання високої ціни, закритої архітектури та спеціалізованих компонентів промислових аналогів.	Стратегія заняття конкурентної ніші (Нішера)

Для проєкту обрано стратегію заняття конкурентної ніші (Нішера). Це найбільш доцільна стратегія, оскільки вона дозволяє сконцентруватися на задоволенні специфічних потреб обраного сегменту (ВНЗ та R&D), де клієнти вимагають відкритості та навчальної цінності, а не готового функціоналу; захистити свою ринкову частку, роблячи нішу непривабливою для лідерів (занадто низька ціна) та недоступною для простих DIY-виробників (занадто висока технічна складність); використовувати проєкт як першопрохідця у вузькому сегменті доступних складних платформ, отримуючи переваги раннього входження.

На основі вимог цільових сегментів (табл. 6.6) та обраної стратегії диференціації необхідно сформулювати стратегію позиціонування проєкту. Вона полягає у формуванні трьох ключових асоціацій, які мають відрізнити торговельну марку від конкурентів та фіксувати у свідомості споживача її унікальну цінність. У табл. 6.19 розроблено фінальне позиціонування стартап-проєкту.

Таблиця 6.19. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
1.	Висока навчальна цінність, відкритий код, доступна ціна, легкість ремонту (ЦГС 1, 3).	Стратегія диференціації	Формування лояльності споживачів завдяки відкритості та постійному зворотному зв'язку.	1. Навчальна цінність (замість швидкості ходи)

Продовження таблиці 6.19

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
2.	Можливість інтеграції власних сенсорів, гнучкість для R&D (ЦГС 2). Реакція: підтримка вхідних бар'єрів для лідерів галузі через низьку ціну та відкритість.	Стратегія диференціації	Технологічна відкритість та складна кінематика (якість інженерного рішення).	2. Відкрита архітектура (замість закритого бренду)
3.	Надійність для експлуатації, низька початкова вартість. Реакція: постійна турбота про підтримку та розвиток конкурентної переваги.	Стратегія диференціації	Найкраще співвідношення ціна/складність у ніші.	3. Доступність R&D (замість високої ціни)

Таким чином, проєкт має позиціонуватися як «Найкраща відкрита навчально-дослідницька платформа для вивчення кінематики за доступною ціною». Це позиціонування є узгодженою системою рішень, що використовує навчальну цінність та відкриту архітектуру як нецінові переваги, щоб забезпечити доступність R&D для цільових сегментів. Ця стратегія визначає напрями роботи компанії та є підґрунтям для формування маркетингового комплексу 4Р.

6.3.2. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для закріплення продуктової концепції необхідно чітко сформулювати, як саме розширена функціональність перетворюється на ключові переваги перед конкурентами. Це дозволить підкреслити унікальність товару як бюджетної основи для прототипування високотехнологічних спеціалізованих рішень. Визначення ключових переваг концепції товару, що відображають його універсальну R&D-спрямованість, подано у табл. 6.20.

Таблиця 6.20. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Отримати практичний досвід у роботі з кінематикою та програмуванням.	Швидкий доступ до повноцінної 12 DOF платформи.	Найвища навчальна цінність у своєму ціновому діапазоні за рахунок складної кінематики та відкритого коду.

Продовження таблиці 6.20

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
2.	Створити прототип спеціалізованого робота (військовий/рятувальний) без великих інвестицій.	Універсальна, модифікована основа для швидкого R&D та інтеграції спеціалізованого обладнання.	Відкрита та гнучка архітектура ПЗ (на відміну від закритих комерційних аналогів), що дозволяє інтегрувати тепловізори, потужніші двигуни та GPS для спеціалізованих місій.
3.	Забезпечити довгострокову актуальність платформи.	Постійний розвиток функціоналу завдяки Open-Source спільноті та відкритій 3D-моделі.	Екосистема та підтримка спільноти як постійний ресурс для модернізації та доопрацювання.

Концепція товару успішно використовує слабку сторону (відсутність вбудованих сенсорів) як сильну перевагу (універсальність) для R&D-прототипування. Ключова перевага полягає у наданні найдоступнішої бази для розробки спеціалізованих квадрупедів, що нівелює необхідність створення механіки з нуля і дозволяє клієнту зосередитися на цільовому функціоналі (сенсори, місії, автономність).

Переходимо до деталізації продуктової стратегії за допомогою трирівневої маркетингової моделі товару (модель Ф. Котлера). Це дозволить чітко сформулювати, що саме пропонується клієнту в рамках обраної стратегії диференціації (табл. 6.21).

Таблиця 6.21. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тр/Тх/Е/Ор
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди	Базова потреба: доступ до складної мехатроніки для навчання та R&D. Дає можливість самостійної розробки алгоритмів кінематики та інтеграції сенсорів на бюджетній, але функціональній платформі.	М	Тх
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики:			
1.	4 кінцівки, 12 ступенів свободи, управління мікроконтролером (наприклад, ESP32).	М	Тх	

Продовження таблиці 6.21

Рівні товару	Сутність та складові	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тр/Тх/Е/Ор
2.	Середня ремонтпридатність; Гарантійний термін на електроніку — 12 місяців.	Нм	Тх	
3.	Відкрита 3D-модель (для друку запчастин), відкритий програмний код (C++/Python).	М	Тх	
4.	Рациональність розміщення керуючих елементів, компактність та відносно мала маса.	М	Ер	
5.	Сучасний, мінімалістичний дизайн, що підкреслює інженерну чистоту та модульність (як база для R&D).	Нм	Ест	
6.	Можливість постачання у розібраному вигляді (Kit) для мінімізації вартості логістики.	М	Тр	
7.	Електрична безпека (ізоляція), низьковольтний режим роботи.	М	Бп	
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування: використання стандартних сервоприводів та мікроконтролерів; тестування узгодженості роботи кінцівок (наприклад, присідання) та електричної безпеки (СЕ).			
	Пакування: набір (Kit) постачається в екологічному пакуванні з відділами для компонентів; електронна документація (QR-код/посилання).			
	Марка: назва організації-розробника + «OpenQuad-Lab: Education & R&D Platform».			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: онлайн-консультації, доступ до Open-Source репозиторію (GitHub), повна технічна документація та інструкції зі збірки.			
	Після продажу: гарантія (12 місяців на електроніку), сервісна підтримка (консультації щодо програмного коду), доступ до спільноти розробників.			

Продуктова стратегія проекту «Багатофункціональний чотириногий робот» повністю узгоджена зі стратегією диференціації, орієнтованою на нішевий ринок.

На відміну від конкурентів, які пропонують або готові, але закриті продукти, або примітивні набори, даний товар диференціюється на другому рівні за рахунок

відкритої технологічної бази та на третьому рівні за рахунок високої навчальної цінності та підтримки Open-Source спільноти. Захист від копіювання забезпечується не лише правами на власний програмний код, а й неможливістю відтворення комплексної цінності. Це гарантує, що клієнт купує не просто роботу, а доступну, живу платформу для R&D.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар. Це передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари-субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проводиться експертним методом (табл. 6.22).

Таблиця 6.22. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1.	Інші платформи для освіти: \$150 – \$300 (заміна за функціоналом, але нижча за навчальною цінністю)	Spot/ ANYmal: \$50,000+ (аналог за формою, недосяжний за ціною та закритий)	Бюджети ВНЗ на обладнання можуть сягати \$3,000–\$5,000 на лабораторію/рік.	Нижня межа: \$350
2.	DIY-набори низької складності: \$80 – \$150 (заміна за ціною, але нижча за технічною складністю)	Go1/ Mini Cheetah: \$1,500 – \$2,500 (найближчі аналоги)	Приватні розробники/ Ентузіасти: готові витратити \$500 – \$1,000 на складний Open-Source проєкт.	Верхня межа: \$950
3.				Орієнтовна ціна: \$500 - \$800

Проект реалізує стратегію диференціації, що дозволяє встановлювати цінову премію, але у рамках стратегії Нішера ціна має бути доступною.

Верхня межа (\$950) встановлена на рівні значно нижчому, ніж у найближчих аналогів (\$1,500+), але враховує бажання платити приватних R&D-розробників та частину бюджету ВНЗ.

Нижня межа (\$350) встановлена вище, ніж у простих товарів-замінників, щоб підкреслити вищу навчальну цінність (12 DOF) та уникнути цінової війни з виробниками простих наборів.

Оптимальна цінова ніша знаходиться у діапазоні \$500 – \$800, що дозволяє максимізувати охоплення цільових сегментів (ВНЗ та ентузіасти), зберігаючи прибутковість.

Система збуту має бути максимально ефективною та контрольованою для підтримки високої якості продукту та його унікальної цінності (табл. 6.23).

Таблиця 6.23. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Довгий цикл купівлі для ВНЗ, тендери, вимога сертифікатів та методичної документації.	Встановлення контактів та підтримка клієнтів; доробка товару; організація руху товару (логістика); робота з відстрочками платежів.	Канал нульового рівня (прямий маркетинг): Виробник -> клієнт.	Власна (пряма): збут власними силами через онлайн-платформу компанії та прямі продажі (B2B).
2.	ЦГС 2 (R&D): Швидкий цикл купівлі, потреба в технічній підтримці та гнучкості комплектації.	Дослідницька робота (збір маркетингової інформації/зворотного зв'язку); Технічна підтримка (консультації по коду).	Канал нульового рівня	Власна (пряма): збут власними силами через онлайн-платформу компанії та прямі контакти з R&D.
3.	ЦГС 3 (ентузіасти): Імпульсивна купівля, висока чутливість до ціни доставки, потреба в самообслуговуванні.	Формування попиту та стимулювання збуту (онлайн-реклама); Організація руху товару (швидка доставка).	Канал одного рівня (через посередників): Виробник -> роздрібний посередник -> клієнт.	Залучена (непряма): використання онлайн-ритейлерів (Amazon/eBay/спеціалізовані платформи) та локальних партнерів (3D-друкарні).

Для реалізації стратегії диференціації та Нішера обрано гібридну (змішану) систему збуту. Це рішення дозволяє компанії зберегти контроль над якістю обслуговування (прямий маркетинг) та технічною підтримкою для ключового сегменту B2B (ВНЗ, R&D), що є критичним для унікальної ціннісної пропозиції. Водночас, залучення зовнішніх посередників (онлайн-ритейлерів та 3D-друкарень) для сегменту B2C (ентузіасти) забезпечує необхідну широту та швидкість дистрибуції комплекту для самостійної збірки. Таким чином, система збуту є гнучкою, економічно ефективною та адаптованою до специфіки кожного цільового сегменту.

Переходимо до останнього, четвертого елементу маркетингового комплексу 4P — стратегія просування, що також називається концепція маркетингових комунікацій (табл. 6.24).

Таблиця 6.24. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	ЦГС 1 (ВНЗ): шукають інвестиційну цінність, проводять тендери, читають наукові публікації.	Прямі контакти, наукові конференції, освітні виставки, спеціалізовані інженерні журнали.	Навчальна цінність та доступність R&D.	Інформування про наявність доступної, але складної навчальної платформи.	"Робототехніка доступна: тепер кожен ВНЗ може дозволити собі навчання на кінематиці рівня Spot."
2.	ЦГС 2 (R&D): потребують технічної документації, активно шукають Open-Source рішення, цінують гнучкість.	GitHub, LinkedIn (професійні інженерні групи), спеціалізовані технічні форуми, YouTube (технічні огляди).	Відкрита архітектура та доступність R&D.	Стимулювання до купівлі як універсальної R&D-бази. Залучення до Open-Source спільноти для доопрацювання.	"Наступний R&D-проект починається тут: відкрита чотиринога база для унікальної сенсорної системи."
3.	ЦГС 3 (ентузіаста): активні користувачі соціальних мереж та YouTube, шукають DIY-проекти та технічні виклики.	YouTube (огляди та tutorіали), Instagram/TikTok (короткі відео про можливості), Reddit (форуми), платформи для 3D-друку.	Навчальна цінність та відкрита архітектура.	Формування попиту через демонстрацію технічних можливостей платформи та її потенціалу для особистих проєктів.	"Не купи іграшку, навчися створювати: складна кінематика, доступна для кожного інженера."

Результатом пункту 5 є комплексна ринкова програма, яка визначає шлях виведення стартап-проекту на ринок, відповідно до обраної альтернативи 1 ("Освітній Kit") та стратегії диференціації.

Доступна, відкрита навчально-дослідницька платформа з фокусом на високій навчальній цінності та підтримці спільноти. Ціна у ніші \$500 – \$800, що значно нижча за промислові аналоги, але вища за прості DIY-набори (стратегія цінового

проникнення у нішу). Програма має гібридну систему — прямий збут для B2B (контроль якості та підтримка) та непрямий збут через онлайн-ритейлерів/3D-друкарні для B2C. А також диференційована комунікація через технічні/наукові канали для B2B та відео-контент/соціальні мережі для B2C, є з'єдиним ключовим повідомленням про навчальну цінність та відкритість.

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

На рисунку 6.1 наведено бізнес-модель Canvas [22], що базується на стратегіях диференціації та нішера для гібридного ринку (B2B та B2C). Основна цінність полягає у наданні доступної 12 DOF платформи, яка дозволяє освітнім установам та розробникам зосередитися на інтеграції ПЗ та сенсорів без значних капіталовкладень. Ключові ресурси компанії зосереджені на R&D та створенні інтелектуальної власності.

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Взаємовідносини з клієнтами	Сегменти споживачів
Постачальники електроніки (оптові дистриб'ютори сервоприводів та МК), виробничі партнери (локальні 3D-друкарні та MakerSpaces), академічні партнери (ВНЗ для пілотних проєктів)	R&D (постійне вдосконалення алгоритму ходи та динамічної стабілізації), управління ланцюгом постачання (контроль якості та оптові закупівлі компонентів), створення контенту (розробка навчальних методичок та технічних тьюторіалів для ВНЗ)	Доступна та відкрита R&D-платформа, найкраще співвідношення ціна/складність у ніші. Універсальна база для інтеграції спеціалізованих сенсорів (тепловізор, GPS).	Спільнота Open-Source: активна підтримка репозиторію та залучення ентузіастів (B2C) Персональна підтримка (B2B): технічні консультації для R&D-лабораторій. Самообслуговування: надання вичерпної документації та відеоінструкцій.	1. B2B (освітні установи): кафедри мехатроніки та робототехніки. 2. B2B (спеціалізовані R&D): лабораторії для прототипування місій (військові, пошукові). 3. B2C (індивідуальні розробники): ентузіасти та учасники змагань.
	Ключові ресурси Інтелектуальна власність (власний алгоритм керування кінематикою), людські ресурси (головний інженер-програміст та R&D-команда), фінансові ресурси (стартовий капітал для закупівлі першої партії)		Канали збуту Прямі продажі (B2B): тендери та контракти з ВНЗ. Онлайн-ритейлери (B2C): міжнародні платформи та спеціалізовані Open-Source майданчики. Партнерська мережа 3D-друку (місцевий збут комплектуючих).	
Структура витрат		Потоки доходів		
Змінні витрати (Компоненти, 3D-друк) Постійні витрати (оплата праці R&D-команди, підтримка репозиторію) НДДКР (витрати на доопрацювання алгоритму ходи) Маркетинг (участь у профільних конференціях, створення контенту)		Продаж Кіт-наборів для самостійної збірки (B2C), продаж зібраних, протестованих одиниць ВНЗ та додаткові послуги (технічний консалтинг, розробка спеціалізованих модулів).		

Рисунок 6.1. — Бізнес-модель Canvas

Реалізація моделі використовує гібридну систему збуту та диференційовані взаємовідносини: прямі продажі B2B-сегменту забезпечують контроль якості та високу маржу, тоді як онлайн-продажі Kit-наборів через Open-Source спільноту забезпечують широке охоплення B2C. Структура витрат є контрольованою, з фокусом на мінімізації постійних витрат за рахунок аутсорсингу 3D-друку та оптових закупівель компонентів. Висока валова маржа (близько 60%) від продажів Kit-наборів є ключовим потоком доходів, що фінансує подальший, критично важливий R&D — нівелювання слабкої сторони (відсутність ходи), що є необхідною умовою для довгострокової стійкості та переходу до більш амбітних цілей (альтернатива 2, «Нішевий Спеціаліст»).

На етапі старту компанія обирає плоску (горизонтальну) організаційну структуру, що є типовою для стартапів. Така структура забезпечує гнучкість, швидке прийняття рішень та ефективну внутрішню комунікацію, що критично важливо для швидкого доопрацювання продукту на основі зворотного зв'язку від Open-Source спільноти (табл. 6.25).

Таблиця 6.25. Організаційна структура та команда проекту

Роль	Ключові функції та обов'язки	Обґрунтування
1. Керівник проекту	Стратегічне планування, фінанси, B2B-продажі (BНЗ), R&D-координація, захист ІВ.	Власник ноу-хау та рушійна сила стартапу. Відповідає за реалізацію стратегії диференціації.
2. Головний інженер / програміст	Доопрацювання алгоритму ходи (W1), підтримка Open-Source репозиторію, технічна підтримка ЦГС 2 та 3.	Критичний для нівелювання слабких сторін (W1) та підтримки відкритості архітектури (S2).
3. Маркетолог / спеціаліст з комунікацій	Ведення соціальних мереж, створення навчального контенту (туторіалів), комунікація з B2C-спільнотою.	Забезпечення зворотного зв'язку та просування навчальної цінності (S3).

Продовження таблиці 6.25

Роль	Ключові функції та обов'язки	Обґрунтування
4. Спеціаліст із закупівель та логістики	Організація постачання компонентів (мінімізація T3), контроль якості (T5), логістика наборів.	Контроль витрат (S4) та забезпечення надійності ланцюга постачання.
5. Технічний консультант (аутсорс)	Надання експертизи у сфері динамічної стабілізації та інверсної кінематики.	Залучається на основі аутсорсингу для вирішення складних R&D завдань без збільшення штату.

Обрана структура є оптимальною для стартапу на стадії раннього впровадження, оскільки вона мінімізує постійні витрати та концентрує ресурси на R&D (програмісту) та B2B-комунікаціях (керівнику проєкту). Цей склад команди здатний ефективно реалізувати стратегію диференціації та нівелювати ключові слабкі сторони (W1 – відсутність ходи).

Виробнича стратегія ґрунтується на використанні аутсорсингу та децентралізованих підходів до організації виробництва (O5), що дає змогу уникнути значних капітальних витрат, підвищити операційну гнучкість та швидше адаптуватися до змін ринку (табл. 6.26).

Гібридна модель виробництва (власне складання електроніки + аутсорсинг 3D-друку) підтверджує економічну ефективність та гнучкість проєкту. Вона дозволяє підтримувати низьку собівартість (ключовий фактор S4) та швидко розширювати партнерську мережу (O5) для виходу на міжнародний ринок.

Таблиця 6.26. Виробництво та логістика

Етап виробництва	Технологія / канал	Обґрунтування (для стратегії диференціації)
1. Механічні компоненти	Аутсорсинг 3D-друку (FFF/FDM) у локальних партнерів або спеціалізованих бюро 3D-друку.	Мінімізація інвестицій та можливість швидкої зміни дизайну (модифікації) без простою.
2. Електронні компоненти	Централізовані закупівлі (МК, сервоприводи) через оптових дистриб'юторів, обов'язковий вхідний контроль якості.	Забезпечення низької собівартості (S4) та зменшення ризиків від неякісних компонентів (T5).

Продовження таблиці 6.26

Етап виробництва	Технологія / канал	Обґрунтування (для стратегії диференціації)
3. Складання та пакування	Власна невелика складальна дільниця.	Складання та тестування ключових електронних модулів. Комплектація Kit-наборів для B2C та B2B.
4. Створення контенту (ІВ)	Розробка коду та методичок всередині команди.	Формування нематеріальної цінності (нНоу-хау) — головного захисту від копіювання.
5. Логістика	Прямі продажі (B2B) + використання поштових сервісів та міжнародних онлайн-ритейлерів (B2C).	Забезпечення гібридної системи збуту (табл. 6.23) та вихід на міжнародний ринок (O4).

Календарний графік розроблено на 12-місячний період, що відповідає реалізації альтернативи 1 («Освітній Kit & R&D База»). Графік має чіткі цілі, спрямовані на швидку монетизацію через освітній сегмент для фінансування подальших, більш дорогих R&D-завдань (розробка ходи) (табл. 6.27).

Таблиця 6.27. Календарний графік реалізації стартапу

Етап	Місяці	Ключові завдання	Результат
1. Фундамент та ІВ	1–3	Юридична реєстрація, фіналізація Bill of Materials (BOM), створення Open-Source репозиторію, оформлення авторського права на код.	Готовий до виробництва прототип, захищена ІВ.
2. Продукт та пілот	4–6	Створення методичних матеріалів (лабораторні роботи), формування прайс-листів B2B, запуск пілотних продажів (B2C).	Перші доходи, активна Open-Source спільнота.
3. Проникнення на B2B	7–9	Активна робота з тендерами ВНЗ та прямими контрактами R&D-лабораторій, пошук партнерів-друкарень (O5).	Забезпечення стабільного B2B-потoku.
4. R&D розвиток	10–12	R&D доопрацювання алгоритму ходи (v1.1 – перші кроки), тестування інтеграції спеціалізованих сенсорів (тепловізор)	Часткове нівелювання W1, підготовка до Alt. 2.
5. Масштабування	13–18	Вихід на міжнародний ринок (O4) через онлайн-ритейлерів, запуск преміум-комплектації (для ЦГС 4).	Значне зростання продажів, фінансування R&D на постійній основі.

Дотримання цього графіку є критично важливим для успіху проєкту, оскільки він дозволяє отримати перші доходи протягом 6 місяців та почати нівелювати слабку

сторону (W1), включивши R&D-доопрацювання алгоритму ходи у фінальні місяці першого року. Це забезпечує плавний перехід до більш амбітної стратегії розвитку.

Оцінювання економічної ефективності ґрунтується на експертному аналізі необхідних початкових інвестицій, прогнозованої собівартості та очікуваної норми прибутку (табл. 6.28 та табл. 6.29).

Таблиця 6.28. Витрати та інвестиції

Стаття витрат	Характеристика	Орієнтовні початкові витрати (\$)
1. Стартова закупівля компонентів	Перша партія (30 комплектів) для пілоту та демо-зразків.	\$8,000 – \$12,000
2. R&D та документація	Оплата праці програміста (алгоритм ходи), створення методичних матеріалів та технічних тьюторіалів.	\$5,000 – \$7,000
3. Маркетинг та просування	Створення сайту, відео-контенту, участь у конференціях, реєстрація ІВ.	\$3,000 – \$5,000
4. Операційні та організаційні	Реєстрація, оренда мінімального складу/офісу на 3 міс., запаси.	\$4,000 – \$6,000
5. Резервний фонд (на ризику ТЗ, Т5)	Резерв на випадок браку компонентів або логістичних затримок.	\$2,000 – \$4,000
ЗАГАЛЬНІ ПОЧАТКОВІ ІНВЕСТИЦІЇ (капітальні витрати):		\$22,000 – \$34,000

Таблиця 6.29. Показники економічної ефективності

Показник	Орієнтовна оцінка	Обґрунтування
Собівартість 1 комплекту (компоненти + 3D-друк)	≈\$250	Низька собівартість забезпечує S4 та можливість роботи у B2B-сегменті.
Середня ціна продажу	≈\$650	Встановлена у ніші \$500–\$800, доступна для ВНЗ, але достатня для покриття R&D витрат.
Валова Маржа (Gross Margin)	≈60% (Маржа \$400)	Висока маржинальність є ключем для фінансування подальшого R&D (W1) та є характерною для стратегії диференціації.
Точка беззбитковості (ТБЗ)	≈60–85 одиниць	Низька ТБЗ дозволяє швидко окупити початкові інвестиції та мінімізувати фінансові ризики.
Термін окупності інвестицій	≈15–20 місяців	Досягається за рахунок високої маржинальності та швидкого виходу на ринок через освітній сегмент.

Продовження таблиці 6.29

Показник	Орієнтовна оцінка	Обґрунтування
Середня норма рентабельності	≈25% (Net Profit Margin)	Прибутковість проєкту є вищою за банківський відсоток на вкладення, що підтверджує його економічну доцільність.

Фінансова модель проєкту є економічно стійкою та привабливою, що демонструється високою маржинальністю (близько 60%) та низькою точкою беззбитковості (до 85 одиниць). Це дозволяє швидко окупити початкові інвестиції та забезпечує фінансову базу для реінвестування прибутку у доопрацювання ключового функціоналу (ходу), що є необхідним для реалізації довгострокової стратегії.

Проєкт «Багатофункціональний чотириногий робот» демонструє високу економічну ефективність завдяки обраній стратегії диференціації, що забезпечує високу маржинальність та низьку точку беззбитковості. Необхідні інвестиції є контрольованими і можуть бути окуповані протягом 1.5 років. Фінансова модель дозволяє реінвестувати прибуток у доопрацювання ключового функціоналу (ходу), що є критичним для переходу до альтернативи 2 («Нішевий Спеціаліст») та подальшого масштабування.

Висновок до розділу

Проведений маркетинговий, технологічний та економічний аудит підтверджує, що стартап-проєкт «Багатофункціональний чотириногий робот» має реальну можливість ринкової комерціалізації та високий потенціал для подальшої імплементації. Аналіз стану ринку демонструє позитивну динаміку у сегменті STEM-освіти та R&D-прототипування, підкріплену глобальним трендом на мехатроніку та зниженням вартості ключових компонентів. Головна привабливість ринку полягає у наявності значної незайнятої ніші (SOM) — проміжку між надто дорогими промисловими квадрупедами (як-от Spot) та надто примітивними навчальними наборами. Фінансова модель проєкту є стійкою та ефективною, забезпечуючи високу маржинальність (близько 60%), що дозволяє швидко досягти точки беззбитковості та підтверджує рентабельність роботи у цьому нішевому сегменті.

Перспективи впровадження проєкту є значними, що підтверджується високою конкурентоспроможністю, яка базується на стратегії диференціації. Проєкт успішно долає високі бар'єри входу, властиві технологічним галузям, завдяки своїм унікальним сильним сторонам: економічна доступність та відкрита архітектура. Товар позиціонується як універсальна R&D-платформа з найвищою навчальною цінністю у своєму ціновому діапазоні, що є критичним для обраних цільових груп. Проєкт не лише задовольняє потреби освітніх установ (ЦГС 1) у практичних посібниках, але й надає гнучку базу для спеціалізованих R&D-лабораторій (ЦГС 2 та 4), дозволяючи їм бюджетно прототипувати високотехнологічні рішення (наприклад, для пошуково-рятувальних чи військових місій). Стратегія поведінки Нішера дозволяє компанії уникнути прямої конкурентної боротьби з лідерами ринку, фокусуючи зусилля на вузькому, але високомаржинальному сегменті.

Найбільш доцільною альтернативою для ринкової реалізації проєкту обрано стратегію «Освітній Kit & R&D База» (альтернатива 1). Ця стратегія є найбільш реалістичною з огляду на необхідні ресурси та стислі строки реалізації (3–6 місяців), оскільки вона спирається на вже реалізований функціонал (базові рухи) та отримання перших доходів через стабільний освітній сегмент. Це фінансовий фундамент, необхідний для нівелювання головної слабкої сторони проєкту — відсутності повноцінного алгоритму ходи. Обрана система збуту є гібридною (прямі продажі B2B та онлайн-ритейл B2C), що забезпечує як контроль якості, так і широту охоплення.

Наявність чіткої стратегії, позитивна економічна оцінка та виявлений попит підтверджують, що подальша імплементація проєкту є доцільною. Ключовим завданням наступного етапу є реінвестування прибутку (забезпеченого високою маржинальністю) у R&D-доопрацювання для переходу до альтернативи 2 («Нішевий Спеціаліст»), що передбачає впровадження повноцінного алгоритму ходи та активізацію Open-Source спільноти. Це дозволить посилити конкурентні позиції, розширити функціонал та забезпечити довгострокову стійкість стартапу.

ВИСНОВКИ

1. У межах кваліфікаційної роботи було успішно вирішено комплексне інженерне завдання зі створення прототипу багатофункціонального чотириноного робота. Проведений аналіз сучасних аналогів підтвердив стратегічну доцільність розробки доступної, відкритої R&D-бази для прототипування спеціалізованих місій. Конструктивно реалізовано надійний апаратний фундамент, що базується на адаптованій 3D-моделі та контролері Arduino Mega. Ключове інженерне рішення — ізоляція силового живлення сервоприводів від керуючої логіки — забезпечило стабільність системи під час високих пікових навантажень, що є критичним для забезпечення працездатності.

2. Було успішно розроблено власний програмний код та алгоритм координування кінцівок. Експериментальне дослідження підтвердило повну функціональність системи керування кінематикою на базовому рівні: успішно реалізовано синхронну роботу 12 сервоприводів, емпірично знайдено положення для статичного балансування та виконано функцію плавного циклічного присідання. Ці результати є прямим доказом виконання вимог дисертації щодо узгодженого руху кінцівок та забезпечення стійкості, підтверджуючи готовність платформи до подальших ітерацій R&D.

3. Аналіз експериментальних даних призвів до важливого наукового висновку: для переходу від статичного до динамічного керування необхідне інтегрування сенсора IMU та використання складних адаптивних алгоритмів (PID, LQR). Це обґрунтування чітко відображає обмеження бюджетної архітектури та формує точну дорожню карту для подальшого розвитку. Таким чином, навіть за відсутності повної динамічної ходи, дослідницька частина роботи є повністю виконаною, оскільки вона визначила технічні вимоги для подальшої модифікації системи під спеціалізоване корисне навантаження.

4. Проведений маркетинговий аудит підтвердив високу життєздатність проєкту та наявність незайнятої ніші на ринку. Обрано стратегію диференціації та Нішера, сфокусовану на нецінових перевагах, тобто технологічній відкритості та доступності

R&D. Товар позиціонується як універсальна платформа з найвищою навчальною цінністю у своєму ціновому діапазоні. Для виходу на ринок обрано реалістичну альтернативу 1 («Освітній Kit & R&D база»), що забезпечує швидке отримання доходу від освітнього сегменту.

5. Фінансова модель проєкту є стійкою та ефективною, демонструючи високу маржинальність (близько 60%) та низьку точку беззбитковості. Це підтверджує економічну доцільність проєкту. Прибуток від перших продажів буде реінвестований у R&D-доопрацювання (алгоритму ходи), що є критично важливим для переходу до альтернативи 2 («Нішевий спеціаліст»). Таким чином, розроблений прототип має високий потенціал для подальшого практичного розвитку, що повністю відповідає поставленій меті магістерської роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Jingzhou Liu Quadruped Dog, 2021, grabcad.com URL: <https://grabcad.com/library/quadruped-dog-1> (дата звернення: 02.09.2025)
- [2] Priyaranjan Biswal, Prases K. Mohanty, «Development of quadruped walking robots: A review» *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 12, Issue 2, 2021. Pp 2017-2031. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.005>.
- [3] Y. Fan, Z. Pei, C. Wang, M. Li, Z. Tang, Q. Liu. «A review of quadruped robots: Structure, control, and autonomous motion» *Adv. Intell. Syst.*, vol. 6, no. 6, p. 2300783, 2024. Pp. 1–26. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300783>
- [4] Li, Qimeng, Franco Cicirelli, Andrea Vinci, Antonio Guerrieri, Wen Qi, and Giancarlo Fortino. 2025. "Quadruped Robots: Bridging Mechanical Design, Control, and Applications" *Robotics* 14, no. 5: 57. <https://doi.org/10.3390/robotics14050057> [Quadruped Robots: Bridging Mechanical Design, Control, and Applications](https://doi.org/10.3390/robotics14050057)
- [5] Rodinò, Stefano, Elio Matteo Curcio, Antonio di Bella, Mattia Persampieri, Michele Funaro, and Giuseppe Carbone. 2020. "Design, Simulation, and Preliminary Validation of a Four-Legged Robot" *Machines* 8, no. 4: 82. <https://doi.org/10.3390/machines8040082>
- [6] Yamamoto, H., Kim, S., Ishii, Y. *et al.* Generalization of movements in quadruped robot locomotion by learning specialized motion data. *Robomech J* 7, 29 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00174-1>
- [7] Swapnil Saha Kotha, Nipa Akter, Sarafat Hussain Abhi, Sajal Kumar Das, Md. Robiul Islam, Md. Firoj Ali, Md. Hafiz Ahamed, Md. Manirul Islam, Subrata Kumar Sarker, Md. Faisal Rahman Badal, Prangon Das, Zinat Tasneem, Md. Mehedi Hasan, «Next generation legged robot locomotion: A review on control techniques», *Heliyon*, Volume 10, Issue 18, 2024, e37237, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37237>
- [8] Liu, Mingmin, Daokui Qu, Fang Xu, Fengshan Zou, Pei Di, and Chong Tang. 2019. "Quadrupedal Robots Whole-Body Motion Control Based on Centroidal Momentum Dynamics" *Applied Sciences* 9, no. 7: 1335. <https://doi.org/10.3390/app9071335>

- [9] Ouyang, Wenjuan, Haozhen Chi, Leifeng Lu, Chao Wang, and Qinyuan Ren. 2024. "Motion Control of a Hybrid Quadruped-Quadrotor Robot" *Actuators* 13, no. 6: 215. <https://doi.org/10.3390/act13060215>
- [10] Chen Tang, Ben Abbatematteo, Jiaheng Hu, Rohan Chandra, Roberto Martín-Martín, Peter Stone «Deep Reinforcement Learning for Robotics: A Survey of Real-World Successes», arXiv: 2408.03539, 2024, cs.RO, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03539>
- [11] Zhang, H.; He, L.; Wang, D. Deep reinforcement learning for real-world quadrupedal locomotion: a comprehensive review. *Intell. Robot.* 2022, 2, 275-97. <http://dx.doi.org/10.20517/ir.2022.20>
- [12] Christyan Cruz Ulloa, Jaime del Cerro, Antonio Barrientos, Mixed-reality for quadruped-robotic guidance in SAR tasks, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 10, Issue 4, August 2023, Pages 1479–1489, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad061>
- [13] Ning M, Ma Z, Chen H, et al. Design and analysis for a multifunctional rescue robot with four-bar wheel-legged structure. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(2). doi:[10.1177/1687814017747399](https://doi.org/10.1177/1687814017747399)
- [14] Fankhauser, Péter & Hutter, Marco. (2018). ANYmal: A Unique Quadruped Robot Conquering Harsh Environments. *Research Features*. 126. 54 - 57. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000262484>
- [15] Matsuzaki, K., Ueda, K., Mitsuya, Y., Suganuma, N., Uehara, T., & Nakamura, N. (2015, May). ICONE23-1232 QUADRUPED ROBOT FOR IMPROVING WORKABILITY AT HAZARDOUS ENVIRONMENT: DEVELOPMENT OF LOAD CARRIAGE FUNCTION. In *The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2015.23* (pp. _ICONE23-1). The Japan Society of Mechanical Engineers.
- [16] A. Romero, C. Delgado, L. Zanzi, R. Suárez and X. Costa-Pérez, "Cellular-enabled Collaborative Robots Planning and Operations for Search-and-Rescue Scenarios," *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Yokohama, Japan, 2024, pp. 5942-5948, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10611179>

[17] ATmega2560. 8-bit Microcontroller with 256K Bytes In-System Programmable Flash. AllDatasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/897466/ATMEL/MEGA2560.html> (Дата звернення: 28.10.2025).

[18] MG996R. Технічний опис сервоприводу. AllDatasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131873/ETC2/MG996R.html> (Дата звернення: 28.10.2025).

[19] Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

[20] Робогепард побив власний рекорд по швидкості бігу і крутіння на місці [Електронний ресурс] // Наука.уа. – 2022. – Режим доступу: <https://nauka.ua/news/robogepard-pobiv-vlasnij-rekord-po-shvidkosti-bigu-i-krutinnya-na-misci> (Дата звернення: 05.11.2025)

[21] The next step in robotic industrial inspection [Електронний ресурс] // ANYbotics. – 2024. – Режим доступу: <https://www.anybotics.com/news/the-next-step-in-robotic-industrial-inspection/> (Дата звернення: 06.11.2025).

[22] Business Model Canvas Template Excel [Електронний ресурс] // Cours-gratuit. – Режим доступу: <https://www.cours-gratuit.com/excel-templates/business-model-canvas-template-excel> (Дата звернення: 25.11.2025).

ДОДАТОК А.1. СКЛАДАЛЬНЕ КРЕСЛЕННЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ

Надається за запитом до авторів

Формат	зона	позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			МД.ПК-41мп.12.00.000 СК	<u>Складальне креслення</u>	1	
				<u>Деталі</u>		
		1		Верхня пластина корпусу	1	
		2		Верхня пластина корпусу	1	
		3		Нижня пластина корпусу	1	
A3		4	МД.ПК-41мп.12.01.000	Нижня пластина корпусу	1	
		5		Перегородка корпусу передня	1	
		6		Перегородка корпусу		
				для фіксування двигуна	2	
A3		7	МД.ПК-41мп.12.02.000	Перегородка корпусу середня	1	
		8		Перегородка корпусу		
				внутрішня	1	
		9		Фіксатор лівий тазового		
				горизонтального двигуна	2	
		10		Фіксатор правий тазового		
				горизонтального двигуна	2	
A3		11	МД.ПК-41мп.12.03.000	Фіксатор лівий		
				гомількового двигуна	2	
		12		Фіксатор правий		
				гомількового двигуна	2	
		13		Ліва перегородка	2	
		14		Права перегородка	2	
		15		З'єднувальний стрижень	4	
A4		16	МД.ПК-41мп.12.04.000	Стегнова частина ноги	4	
				МД.ПК-41мп.12.00.000 СК		
ЗМ.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата		
Розроб.		Сакута А. А.			Багатофункціональний чотириногий робот	
Перев.		Галаган Р. М.				
Н.контр						
Затв.						
					Літ.	Аркуш
						1
						2
					ПБФ	

[illegible]

ДОДАТОК А.2. ДЕТАЛЮВАННЯ

Надається за запитом до авторів

ДОДАТОК Б. БЛОК-СХЕМА

Рисунок Б.1. – Блок-схема коду (початок)
Надається за запитом до авторів

Рисунок Б.2. – Блок-схема коду (кінець)

Надається за запитом до авторів

ДОДАТОК В. КОД ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РУХУ РОБОТА

Надається за запитом до авторів

