

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Гексапод для транспортування в складних рельєфах території  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи КІУКІ-21-8  
Юдіна А.С.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Немченко В.П.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Чумаченко С.В.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління  
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
(код і повна назва)  
Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Комп'ютерна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Юдіній Анні Станіславівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Гексапод для транспортування в складних рельєфах території

затверджена наказом університету від 21 травня 2025 р. № 403 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

1. Мікроконтролер ArduinoMega,
2. Бездротовий геймпад,
3. Сервоприводи MG90,
4. Кінематична модель гексапода

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Аналіз та обґрунтування вибору компонентів системи

Розробка апаратної та програмної частини


Реалізація комунікації між мікроконтролером та мобільним додатком

Розробка функціональної схеми пристрою,

Тестування спроектованого пристрою

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) 14 сл.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
	Проф.. Немченко В.П.		16.06.25

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача теми проекту, узгодження і затвердження теми	06.05.2025 – 09.05.2025	Виконано
2	Аналіз та вибір методу вирішення поставленої задачі	10.05.2025 – 15.05.2025	Виконано
3	Ознайомлення з літературними джерелами аналіз та вибір методу вирішення поставленої задачі вибір системних засобів вирішення	16.05.2025 – 20.05.2025	Виконано
4	Проектування апаратної програмної частини	21.05.2025 – 25.05.2025	Виконано
5	Налагодження та тестування комп'ютерної системи	26.05.2025 – 28.05.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2025 – 01.06.2025	Виконано
7	Перевірка виконаного проекту керівником, допуск до захисту	02.06.2025 – 05.06.2025	Виконано
8	Захист проекту	12.06.2025 – 24.06.2025	Виконано

Дата видачі завдання 06 травня 2025 р.

Здобувач



(підпис)

Юдіна А.С.

Керівник роботи



Немченко В.П.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Склад кваліфікаційної роботи: 48 сторінки, 28 рисунків, 8 джерел за переліком посилань.

АВТОМАТИЗОВАНА МОБІЛЬНА СИСТЕМА, ARDUINO, MG90,  
КІНЕМАТИКА, МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, ГЕКСАПОД

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження доцільності використання гексапода для вирішення завдань в складних рельєфах території. У роботі розглянуто конструкції гексаподів, переваги і недоліки використання платформи, а також оглянуті альтернативні рішення на ринку. Розглянута кінематична схема руху платформи. Запропоновано конструкцію експериментального макету на ArduinoMega, сервоприводів MG90 та екшн камери. Реалізовано наступний функціонал: триподна, біподна і хвильова хода і керування за допомогою геймпада.

## ABSTRACT

Composition of the qualification work: contains 48 pages, 28 figures, and 8 reference sources.

AUTOMATED MOBILE SYSTEM, ARDUINO, MG90, KINEMATICS,  
MOBILE ROBOTIC PLATFORM, HEXAPOD

The purpose of the qualification work is to study the feasibility of using a hexapod to solve problems in complex terrain. The paper describes the design of hexapods, the advantages and disadvantages of using the platform, and reviews alternative solutions on the market. The kinematic scheme of platform movement is considered. The design of the experimental layout on Arduino Mega, MG90 servos and an action camera is proposed. The following functionality has been implemented: tripod, bipod and wave gait and control with a gamepad.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП .....	8
1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ГЕКСАПОДІВ .....	10
1.1 Історичний розвиток і класифікація гексоподів .....	10
1.2 Базова механічна структура .....	15
1.3 Сфери застосування .....	16
1.4 Аналіз рішень на ринку .....	18
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ .....	22
2.1 Загальні принципи побудови гексаподів .....	22
2.2 Конструкція ніг та виконавчі механізми .....	23
2.3 Електрична схема .....	26
2.4 Сенсори і датчики .....	30
2.5 Програмне забезпечення та алгоритми керування .....	33
2.6 Конструювання тестової моделі .....	36
3 ТЕСТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДИМОСТІ .....	40
3.1. Аналіз прохідності гексапода при перепаді висот .....	40
3.2. Пересування гексапода по різних типах ґрунтових поверхонь .....	42
3.3. Дослідження ефективності різних типів ходи .....	44
ВИСНОВКИ .....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	48
ДОДАТКИ .....	49

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

GPS(GlobalPositioningSystem) – це глобальна система позиціонування, яка дозволяє визначати точне місцезнаходження об'єкта на землі.

GPR (GroundPenetratingRadar) – це технологія, що використовує радіохвилі для вивчення підземних об'єктів та їхніх характеристик.

БПЛА – безпілотний літальний апарат.

IDE – IntegratedDevelopmentEnvironment (інтегроване середовище розробки).

ІЧдатчики – інфрачервоні датчики.

pH – ступінь кислотності або лужності.

PWM-сигнал(pulse-widthmodulation) – широтно-імпульсна модуляція.

## ВСТУП

Мобільні роботи стають все більш затребуваними в різних галузях діяльності, зокрема в сферах, де важливо забезпечити пересування по місцевості з ускладненим рельєфом, у зонах, що непридатні для людини, або в умовах автономного функціонування. Серед найбільш перспективних типів таких систем особливе місце займають багатонігі роботи, а саме гексаподи, що забезпечують високу стійкість, прохідність та можливість пересування в умовах складного середовища.

Об'єкт дослідження – є роботизована платформа гексапод.

Предмет дослідження – пошук оптимальних алгоритмів руху в умовах змінного рельєфу та різних типів ґрунту.

Мета роботи – розробити, реалізувати та дослідити працездатність гексапода в умовах складного рельєфу, дослідити вплив типу ходи на прохідність, стабільність та енергоефективність пересування платформи.

Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто:

- історичні та сучасні технічні рішення у сфері багатонігих роботів;
- базову механічну структуру гексапода та її переваги;
- типи ходи (триподна, хвильова, тетраподна, асиметрична) та їх вплив на стабільність і ефективність;
- програмне забезпечення та сенсорну систему, що забезпечує адаптивність платформи;
- результати експериментальних досліджень, проведених на побудованій тестовій моделі.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до реалізації та дослідження гексаподної мобільної платформи з урахуванням сучасних не біоінспірованих алгоритмів ходи, адаптованих до характеристик поверхні. Здійснено практичне порівняння ефективності класичних і альтернативних типів ходи в умовах різного рельєфу.

Результати даного дослідження можуть слугувати основою для подальшої розробки та впровадження платформ на базі гексапода довиконання задач на складних рельєфах території, здатного адаптуватися та бути використаним в аграрному секторі, пошуково-рятувальних операціях, освітніх програмах, екологічному моніторингу і інших сферах.

## 1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ГЕКСАПОДІВ

### 1.1. Історичний розвиток і класифікація гексаподів

Гексаподи, або шестиногі роботи, мають багату історію розвитку, що бере свій початок ще в XIX столітті. У 1800-х роках математик Огюстен Луї Коші досліджував жорсткість «артикульованого октаедра», який вважається предком сучасного гексапода. У 1949 році інженер В. Ерік Гоф з компанії Dunlop у Великій Британії створив паралельний механізм для випробування шин під різними навантаженнями. Цей механізм став основою для подальших розробок у сфері гексаподів. У 1965 році Д. Стюарт представив варіант цього механізму для використання у авіаційних тренажерах. Його розробка отримала назву «платформа Стюарта» («Гофа-Стюарта»), представлена на рисунку 1.1.

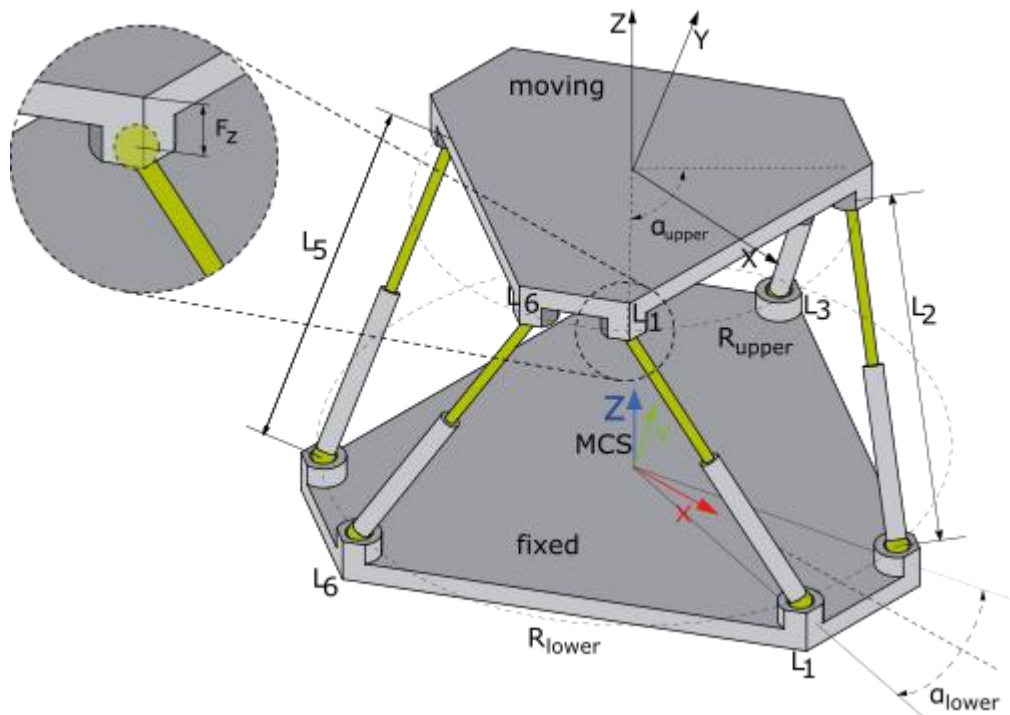


Рисунок 1.1 – Платформа Гофа-Стюарта

У 1976 році в Московському державному університеті був розроблений гексаподний робот "Маша", який мав трубчасте шасі та артикуляційні ноги з трьома ступенями свободи. У 1983 році в Університеті Карнегі-Меллона був створений "Six-LeggedHydraulicWalker" — перший гексапод, здатний переносити людину та пересуватися по складній місцевості, використовуючи різні типи ходи. Робот використовував бензиновий двигун для живлення своїх ніг і потребував водія для керування ним за допомогою педалей. Машина могла тримати три ноги на землі одночасно, що усувало потребу в системах балансування, хоча також обмежувало швидкість системи. Кожна нога могла рухатися вперед, назад і з боку в бік, дозволяючи їй пересуватися по нерівних поверхнях.[2]

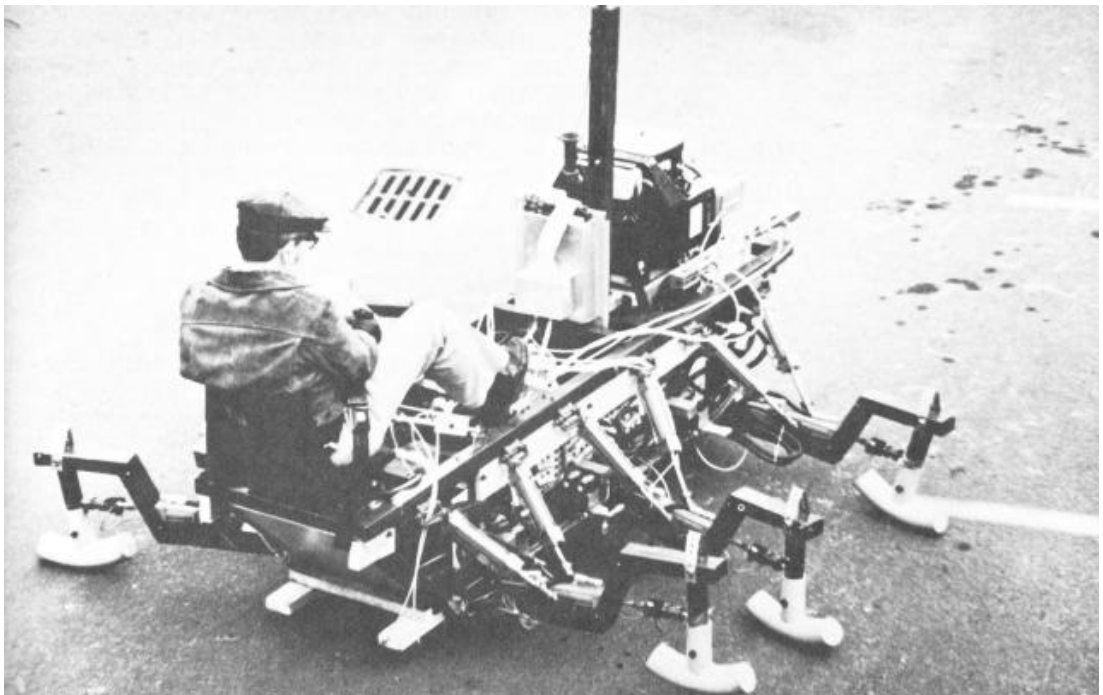


Рисунок 1.2 – Six-LeggedHydraulicWalker

У 1990-х роках Джонатан В. Міллс з Університету Індіани розробив "Stiquito"[1] — недорогий гексаподний робот, який використовував нітинол (сплав з пам'яттю форми) як "м'язи". Цей робот став популярним у навчальних закладах для ознайомлення студентів з основами робототехніки. Під дією тепла змінюється кристалічна структура дроту. Нітинол стискається при нагріванні та

повертається до початкового розміру та форми при охолодженні.

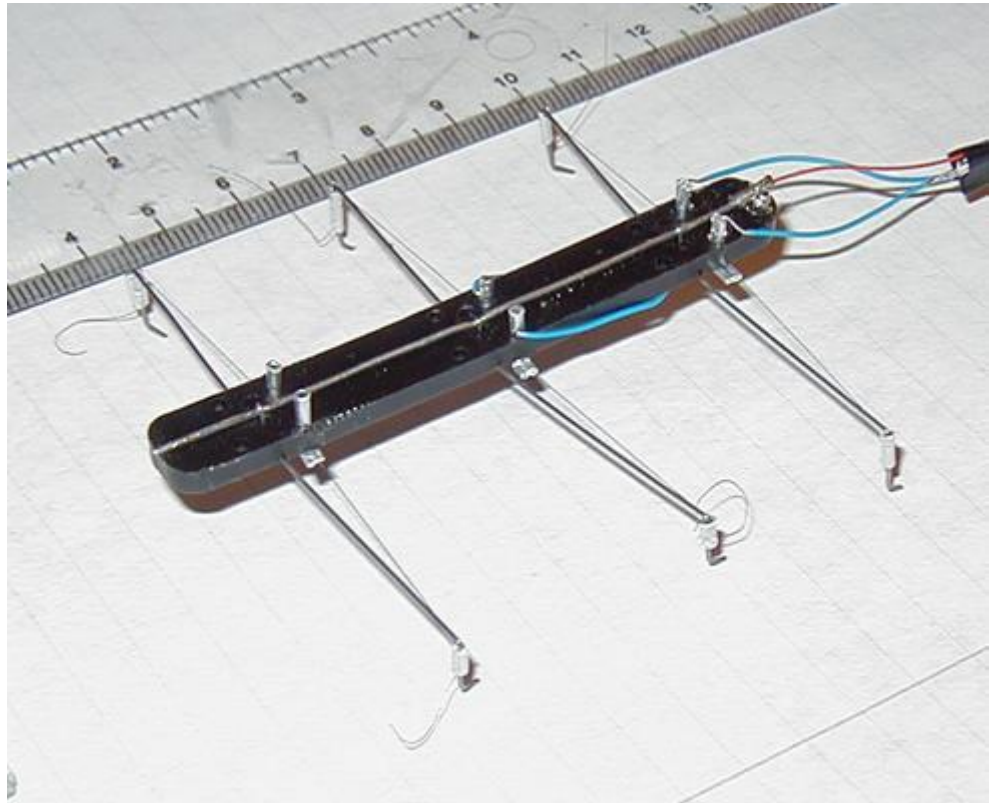


Рисунок 1.3 – Stiquito – найменший гексапод

У 1999–2001 роках консорціум університетів за підтримки DARPA розробив RHex — автономного гексаподного робота з гнучкими ногами та лише одним приводом на кожну ногу. RHex показав високу мобільність на різних типах місцевості та здатність долати складні перешкоди .

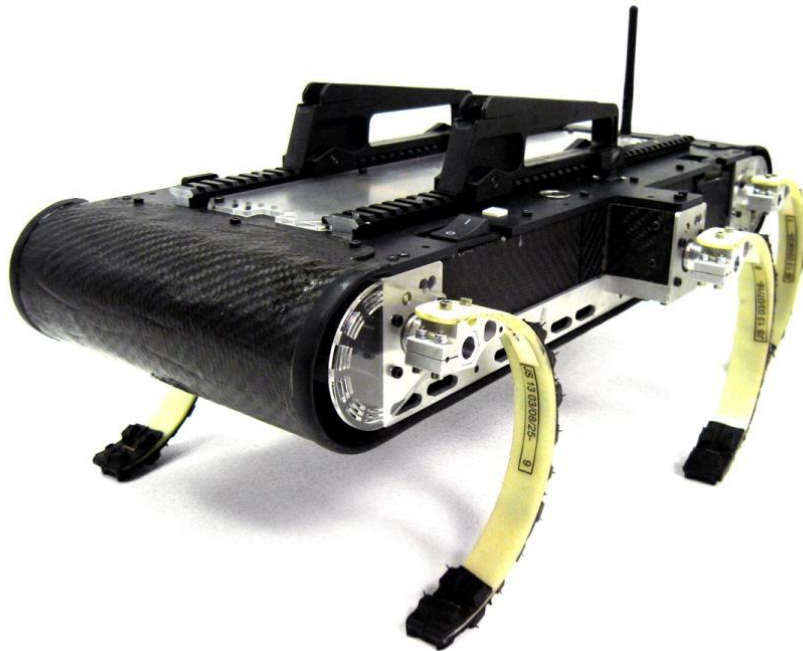


Рисунок 1.4—Гексапод з 6-ма приводами RHex

У 2000-х роках професор Роберт Фулл з Університету Каліфорнії в Берклі досліджував біомеханіку руху комах, таких як таргани та гекони, і застосовував ці знання для розробки гексаподів. Його дослідження показали, що шість ніг забезпечують високу стабільність і адаптивність при русі по нерівній місцевості .

У 2009 році професор Сангбе Кім з Массачусетського технологічного інституту розробив кілька біоінспірованих роботів, таких як Stickybot, Sprinylbot та iSprawl, які імітують рухи геконів, павуків та тарганів відповідно. Ці роботи демонструють ефективність біоміметичних підходів у робототехніці .



Рисунок 1.5 – Stickybot – імітація руху геконів

Людство вже десятиліттями послідовно досліджує й удосконалює концепцію гексаподів як технічних систем, що наслідують принципи живої природи. Від перших експериментальних платформ до сучасних високотехнологічних автономних роботів, гексаподи пройшли шлях глибокої, у якій інженерна думка, біомеханічне натхнення та алгоритмічна точність утворили цілісну наукову й прикладну парадигму. У наш час гексаподи — це не лише лабораторні прототипи чи навчальні моделі, а повноцінні учасники рятувальних операцій, розвідки складних територій, промислової автоматизації та дослідницьких місій. Їхнє різноманіття форм, принципів управління та призначення демонструє гнучкість і потенціал цієї архітектури у розв’язанні задач, які залишаються складними або навіть неможливими для колісної чи гусеничної техніки. І хоча багато викликів ще попереду — зокрема енергоефективність, автономність і здатність до самоорганізації — уже сьогодні гексаподи втілюють синтез технології, еволюційної логіки та практичного інженерного передбачення.

## 1.2. Базова механічна структура

Механічна структура гексапода є результатом багаторічних досліджень та інженерних розробок, спрямованих на створення стабільних, адаптивних та ефективних шестиногих роботів. Основні елементи конструкції включають корпус (тулуб), шість ніг, кожна з яких має кілька ступенів свободи, а також системи приводу та управління.

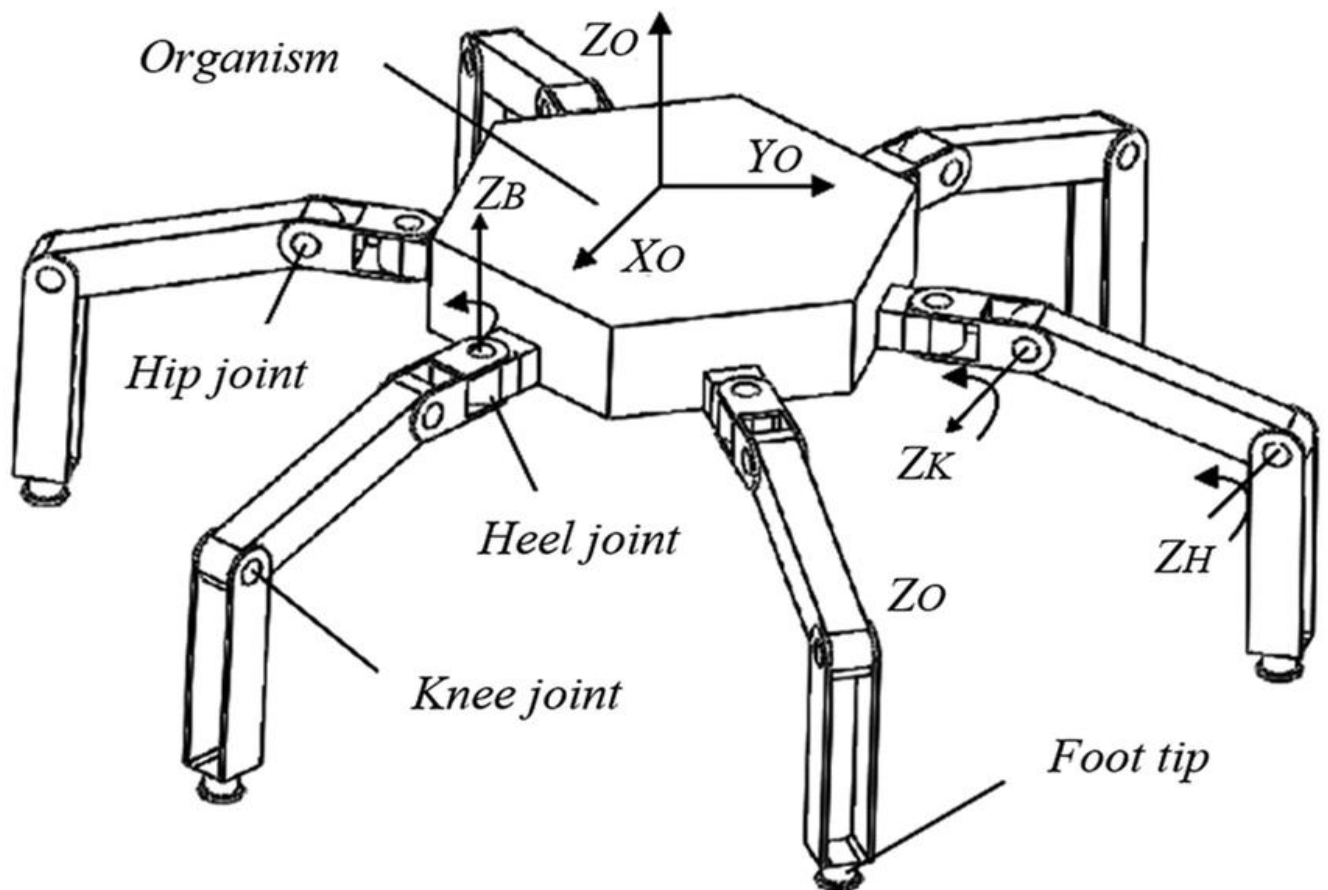


Рисунок 1.6 – Гексапод 3х ступенів свободи (heel-knee-foot)

Корпус (organism) гексапода зазвичай виконує роль несучої платформи, до якої кріпляться ноги та інші компоненти, такі як джерела живлення, обчислювальні модулі та сенсори. Матеріали для виготовлення корпусу варіюються від легких металів, таких як алюміній, до композитних матеріалів і пластиків, що забезпечують баланс між міцністю та вагою конструкції.

Кожна нога гексапода складається з кількох сегментів, з'єднаних шарнірами, які забезпечують необхідні ступені свободи для руху. Стандартна конфігурація передбачає три ступені свободи на кожен ногу: стегно(heel), коліно(knee), ступня(foot). Така структура дозволяє роботу здійснювати різноманітні типи ходи та адаптуватися до нерівностей поверхні.

Приводи, які забезпечують рух ніг, можуть бути електричними (сервомотори), пневматичними або гідравлічними, залежно від вимог до потужності, точності та швидкості руху. Електричні приводи є найбільш поширеними завдяки їх компактності, енергоефективності та простоті управління.

Додатково, деякі конструкції передбачають використання енергозберігаючих механізмів, таких як пружини, які накопичують енергію під час руху та вивільняють її для підвищення ефективності. Це дозволяє зменшити навантаження на приводи та покращити енергоефективність роботи гексапода .

Варто також зазначити, що модульність конструкції ніг дозволяє легко замінювати або модернізувати окремі компоненти, що спрощує обслуговування та адаптацію гексапода до різних завдань. Це особливо важливо для дослідницьких та освітніх платформ, де гнучкість та можливість швидкої модифікації є ключовими вимогами.

У підсумку, базова механічна структура гексапода є результатом поєднання інженерних рішень, спрямованих на забезпечення стабільності, адаптивності та ефективності руху. Постійний розвиток матеріалів, приводів та систем управління відкриває нові можливості для вдосконалення конструкції гексаподів та розширення сфер їх застосування.

### 1.3. Сфери застосування

Гексаподи — це шестиногі роботи, які завдяки своїй унікальній конструкції та високій маневреності знаходять широке застосування в різних галузях. Їх здатність адаптуватися до складних умов робить їх незамінними в багатьох сферах.

Гексаподи використовують у сільському господарстві для моніторингу стану рослин та ґрунту, а також для точного внесення добрив і пестицидів. Їх здатність пересуватися по нерівних поверхнях без пошкодження рослин робить їх ефективними помічниками в аграрному секторі.

У сфері безпеки та оборони гексаподи застосовуються для розвідки, рятувальних операцій та виявлення вибухонебезпечних предметів. Їх здатність пересуватися по складних територіях дозволяє виконувати завдання в умовах, небезпечних для людини. Наприклад, вони можуть використовуватися для обстеження будівель після землетрусів або в зоні бойових дій.



Рисунок 1.7 – Гексапод для пошуково-рятувальних операцій

Гексаподи служать навчальними платформами для студентів, які вивчають робототехніку, програмування та інженерію. Вони дозволяють на практиці ознайомитися з принципами роботи роботів та розвивати навички створення та управління складними системами.

Таким чином, гексаподи демонструють свою універсальність та

ефективність у різних сферах, від промисловості до освіти, підтверджуючи свою важливу роль у сучасному світі технологій.

#### 1.4. Аналіз рішень на ринку

Гексаподи, або шестиногі роботи, знаходять широке застосування в різних галузях завдяки своїй стабільності, маневреності та здатності адаптуватися до складних умов. Нижче представлено огляд деяких українських та міжнародних розробок у цій сфері.

Hexapod KULYA — інноваційний робот-конструктор від компанії UkraineRobotics. Цей гексапод має оригінальну конструкцію: у звичайному режимі він рухається як шестиногий робот, однак за потреби може трансформуватися у кулясту форму для швидкого перекочування по рівній поверхні. KULYA призначався для дослідницьких та демонстраційних цілей, з потенціалом до модульної адаптації під різні задачі, зокрема мобільний моніторинг, доставка вантажів у складні зони, а за певної модернізації — і розмінування[6].

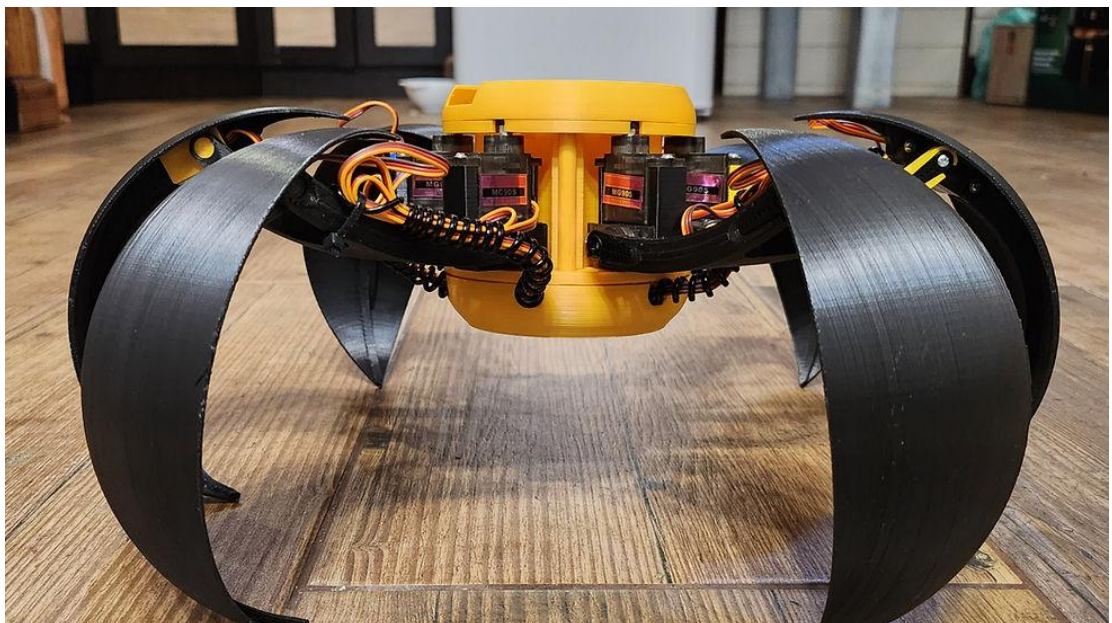


Рисунок 1.8 – KULYA Hexapod

Проект LAURON[8], розроблений у Німеччині, представляє серію гексаподів, здатних пересуватися по складному рельєфу. Розроблений для автоматичного моніторингу навколишнього середовища, зокрема у сільському господарстві, для контролю стану ґрунту, вологи та розповсюдження шкідників на важкодоступних ділянках. Завдяки біоінспірованій конструкції та сенсорам у ногах, LAURON може адаптуватися до різних умов місцевості, що робить його придатним для моніторингу в сільському господарстві, особливо в важкодоступних ділянках.

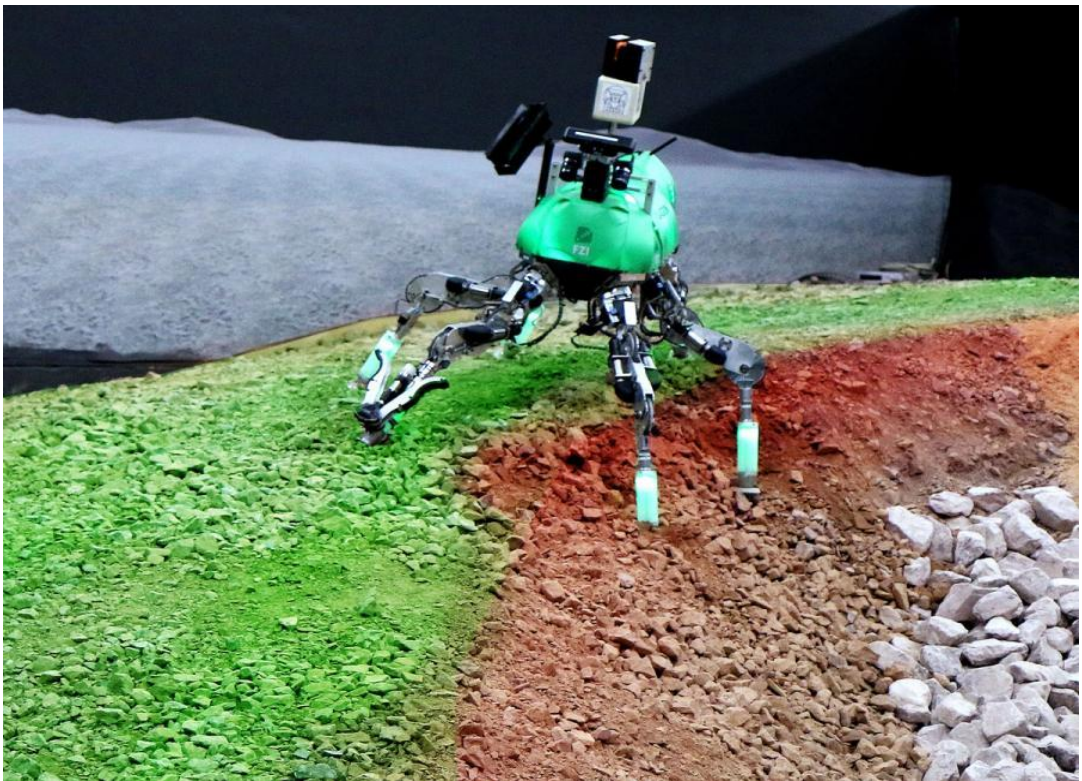


Рисунок 1.9 – Стабілізація LAURON

RHex — автономний гексаподний робот, розроблений за підтримки DARPA. Його конструкція з гнучкими ногами та одним приводом на кожен ногу забезпечує високу мобільність на різних типах місцевості, включаючи здатність підніматися по схилах до 45 градусів та долати сходи.

На ринку також з'являються нові розробники, які пропонують гексаподи для специфічних застосувань, такі як Buce — динамічний гексаподний робот, розроблений CSIRO. Використовуючи 3D-друковані деталі та лінійні приводи,

Bruce демонструє здатність пересуватися по складній місцевості зі швидкістю до 0,5 м/с, що робить його придатним для досліджень та рятувальних операцій.



Рисунок 1.10 –Гексапод-дослідник Bruce від CSIRO

Гексапод Weaver, розроблений CSIRO у співпраці з ETH Zürich, є автономним шестиногим роботом, призначеним для навігації по нерегулярній місцевості. Кожна з його шести ніг має п'ять ступенів свободи, що забезпечує загалом 30 ступенів свободи для всього робота. Це дозволяє Weaver адаптувати свою позу та орієнтацію ніг відповідно до складних умов рельєфу, таких як круті схили та нерівні поверхні. Для автономної навігації Weaver використовує стереозір та пропріоцептивні сенсори, що дозволяє йому оцінювати рельєф місцевості та адаптувати свої рухи без необхідності в попередньому картографуванні.

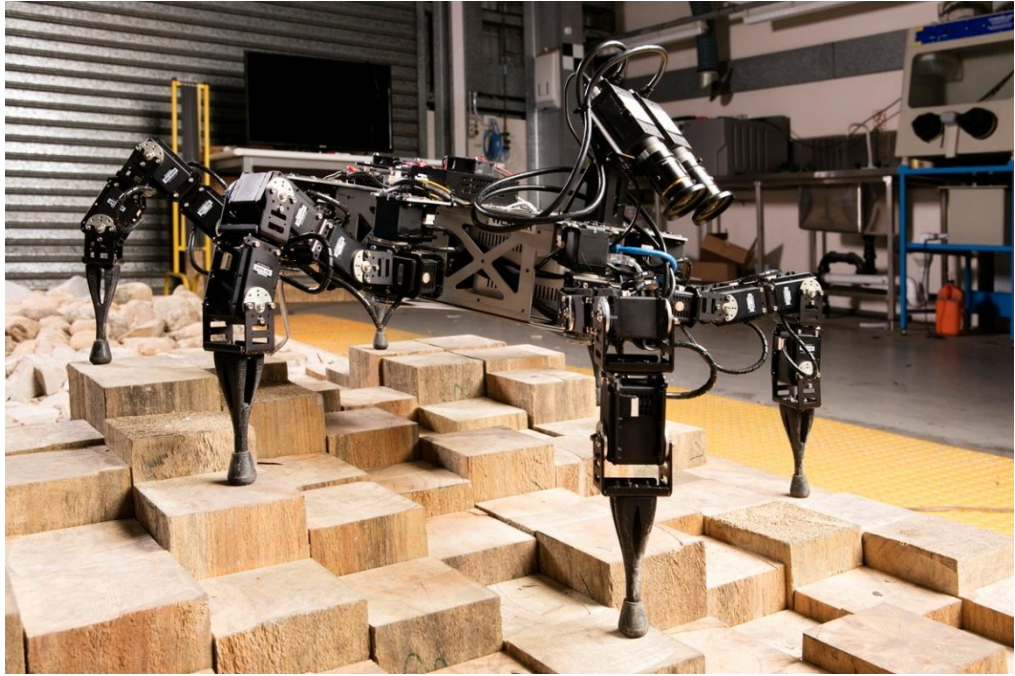


Рисунок 1.11 – Гексапод з п'ятьма ступенями свободи від CSIRO

Загалом, ринок гексаподів демонструє стабільне зростання, з очікуваним збільшенням обсягу. Основними драйверами цього зростання є підвищений попит на автоматизацію, розвиток технологій штучного інтелекту та потреба в точних і надійних рішеннях для складних завдань у різних галузях.

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

### 2.1 Загальні принципи побудови гексаподів

Гексаподи, або шестиногі роботи, є втіленням біонічного підходу до робототехніки, де інженери надихаються природними прикладами, такими як комахи. Ці роботи мають шість ніг, що забезпечує їм високу стабільність і маневреність, особливо на нерівних поверхнях.

Основна перевага гексаподів полягає в їхній здатності підтримувати стабільність навіть при втраті контакту з поверхнею однієї або двох ніг. Це досягається завдяки використанню різних типів ходи, таких як триподна хода, де три ноги завжди знаходяться в контакті з поверхнею, забезпечуючи стійкість під час руху. Такий підхід дозволяє гексаподам ефективно пересуватися по складних і непередбачуваних ландшафтах, де традиційні колісні або гусеничні транспортні засоби можуть зазнати труднощів.

Однак, незважаючи на численні переваги, гексаподи мають і недоліки. Одним з основних є складність їхньої конструкції та управління. Кожна нога гексапода зазвичай має кілька ступенів свободи, що вимагає складних алгоритмів управління для координації рухів усіх ніг. Це призводить до збільшення обчислювальних ресурсів, необхідних для ефективного функціонування роботи, а також ускладнює процес розробки, налагодження системи управління та ремонтпригодності.

Ще одним викликом є енергоспоживання гексаподів. Через складність механічної структури та необхідність одночасного управління кількома приводами, гексаподи споживають більше енергії порівняно з іншими типами робіт, такими як колісні або гусеничні. Це обмежує їх автономність і вимагає використання більш ємних джерел живлення або частішої підзарядки.

Гексаподи не розраховані на пересування у в'язких, м'яких ґрунтах.

По при цьому, гексаподи продовжують залишатися перспективним напрямком у

робототехніці. Їх здатність до адаптації, висока стабільність і маневреність роблять їх незамінними в багатьох сферах застосування, де інші типи роботів можуть бути менш ефективними. З розвитком технологій, зокрема в галузі енергозбереження та алгоритмів управління, очікується подальше вдосконалення гексаподів, що дозволить розширити їх застосування та підвищити ефективність у виконанні складних завдань.

## 2.2 Конструкція ніг та виконавчі механізми

Кожна нога зазвичай має три ступені свободи, що дозволяє роботу адаптуватися до різних умов середовища та виконувати складні рухи.

Основою для аналізу руху гексапода є кінематичні рівняння, які описують взаємозв'язок між положенням кінцівки та кутами її суглобів. Ці рівняння поділяються на прямі та зворотні кінематичні задачі.

Пряма кінематика полягає у визначенні положення кінцівки на основі відомих кутів суглобів. Це дозволяє передбачити, де саме знаходиться нога робота в просторі, що є важливим для планування руху та уникнення зіткнень.

Зворотна кінематика, навпаки, полягає у визначенні необхідних кутів суглобів для досягнення бажаного положення кінцівки. Це складніша задача, оскільки може мати кілька рішень або взагалі не мати їх, залежно від геометрії робота та обмежень його суглобів.

Для вирішення зворотної кінематичної задачі часто використовуються чисельні методи, такі як метод Ньютона-Рафсона або метод зворотної матриці Якобі. Ці методи дозволяють знайти наближені розв'язки, які є достатньо точними для практичного використання[7].

Наприклад для тестового гексапода були прораховані наступні кути (рис. 2.1):

Positive clockwise

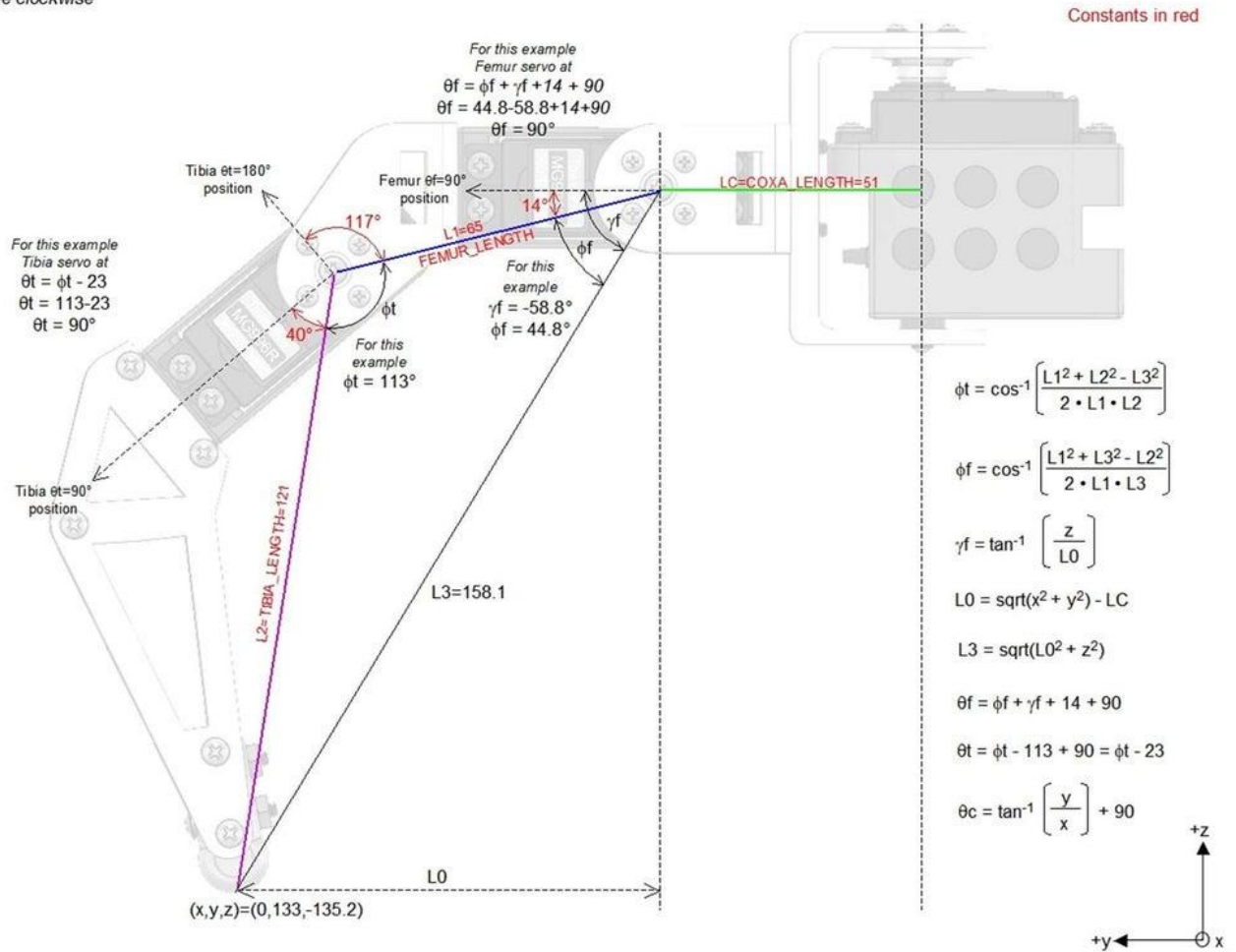


Рисунок 2.1 – Розрахунок координат переміщення ніг

Де  $(x,y,z)$  – координати кінцівки в глобальній системі;

$\phi_t, \phi_f$  – кути зміщення;

LC – довжина «стегна»

L1 – довжина до «коліна»

L2 – довжина до «ступні»

L0 і L3 – допоміжні довжини

Маємо рівняння для знаходження кут повороту:

- для сервопривода ступні

$$\phi_t = \cos^{-1} \left[ \frac{L1^2 + L2^2 - L3^2}{2 \cdot L1 \cdot L2} \right]$$

(2.1)

- для коліна

$$\phi_f = \cos^{-1} \left[ \frac{L1^2 + L3^2 - L2^2}{2 \cdot L1 \cdot L3} \right] \quad (2.2)$$

Розрахуємо максимальний підйом кінцівки у «коліні»:

$$\gamma_f = \tan^{-1} \left[ \frac{z}{L0} \right] \quad (2.3)$$

Розраховуємо розміщення сервоприводів, їх відстань один від одного:

$$\begin{aligned} L0 &= \sqrt{x^2 + y^2} - LC \\ L3 &= \sqrt{L0^2 + z^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Розраховуємо кут початкового нахилу:

- коліна

$$\theta_f = \phi_f + \gamma_f + 14 + 90 \quad (2.5)$$

- ступні

$$\theta_t = \phi_t - 113 + 90 = \phi_t - 23 \quad (2.6)$$

- стегна

$$\theta_c = \tan^{-1} \left[ \frac{y}{x} \right] + 90 \quad (2.7)$$

Знання кількох констант – довжини частин кінцівки, а також кутів зміщення між віссю сервоприводів та конструкцією – дозволяє розрахувати бажані кути сервоприводів для всіх можливих координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Кожна нога встановлена під різним кутом, а зміщення кожної ноги від центру тіла різні, тому обчислений кут тазостегнової кістки змінюється для кожної ноги.

Найрозповсюдженіші наступні патерни крокування: «тринога», «хвиля», «біпод» та «тетрапод».

Триподна хода: група з 3 ніг (перша і остання з однієї сторони і середня – з іншої) рухається вперед, а інші 3 ноги забезпечують опору. Цей рух емулює пересування шестилапихкомах(див. пункт 3.3).

Хвильовий рух: ліві і праві ноги рухаються вперед ззаду вперед, але права сторона зміщена на половину хвилі.

Тетрапод: права передня та ліва задня лапи рухаються вперед разом, потім права задня та ліва середня, і нарешті рухаються права середня та ліва передня лапи.

Під час ходьби робот використовує вхідні дані від джойстика дистанційного керування –  $x$  та  $y$  від правого джойстика та обертання від лівого джойстика – щоб вказати тілу, в якому напрямку рухатися. Механізми керування ходою обчислюють положення кінчиків окремих ніг, необхідні для виконання бажаного руху. Потім розрахунок ІК застосовується до координати кінчика стопи кожної ноги, щоб вказати окремим сервоприводам, куди рухатися для позиціонування ніг відповідно до запиту механізму керування ходою.

Також існують режими, запрограмовані на стояння на місці та переміщення або обертання тіла. Переміщення – це просто додавання зміщення  $x$ ,  $y$  або  $z$  до системи координат. Обертання тіла є складнішим, але виводиться, як показано на рисунку 2.1, де зміщення  $x$ ,  $y$  та  $z$  обчислюються за допомогою множення матриць[7].

Загалом, конструкція ніг та виконавчі механізми гексапода є результатом складного інженерного компромісу між точністю, силою, швидкістю та адаптивністю. Ретельне проектування та налаштування цих компонентів є ключовим для забезпечення ефективної та надійної роботи гексапода в різних умовах.

### 2.3 Електрична схема

У системі управління гексаподом ключовим елементом є мікроконтролер, який координує роботу всіх компонентів робота. У базовій моделі використовується плата типу Arduino (наприклад, Arduino Mega), яка виступає центральним вузлом керування. Вона відповідає за обробку сигналів, формування команд руху для сервоприводів і обмін даними з сенсорами.

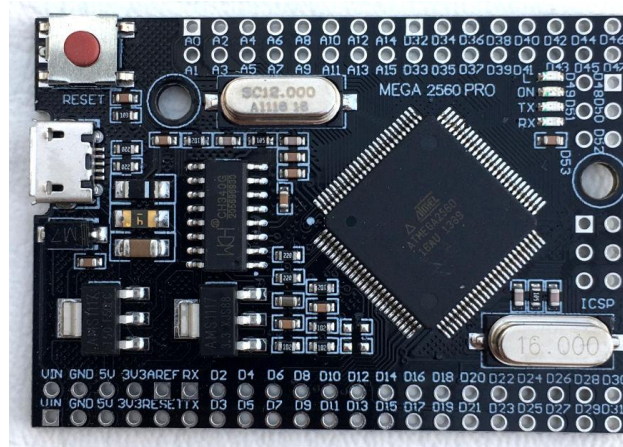


Рисунок 2.2 – Плата керування Mega 2560 Pro

До мікроконтролера підключаються 18 сервоприводів — по три на кожен з шести ніг. З огляду на те, що стандартні плати Arduino мають обмежену кількість виходів PWM (широтно-імпульсної модуляції), для керування великою кількістю приводів використовується окремий модуль розширення — контролер сервоприводів. Найпопулярнішим варіантом є модуль PCA9685, який забезпечує до 16 незалежних PWM-каналів і підключається до Arduino через інтерфейс I2C. При потребі використовується декілька таких модулів для повного охоплення всіх сервомоторів.

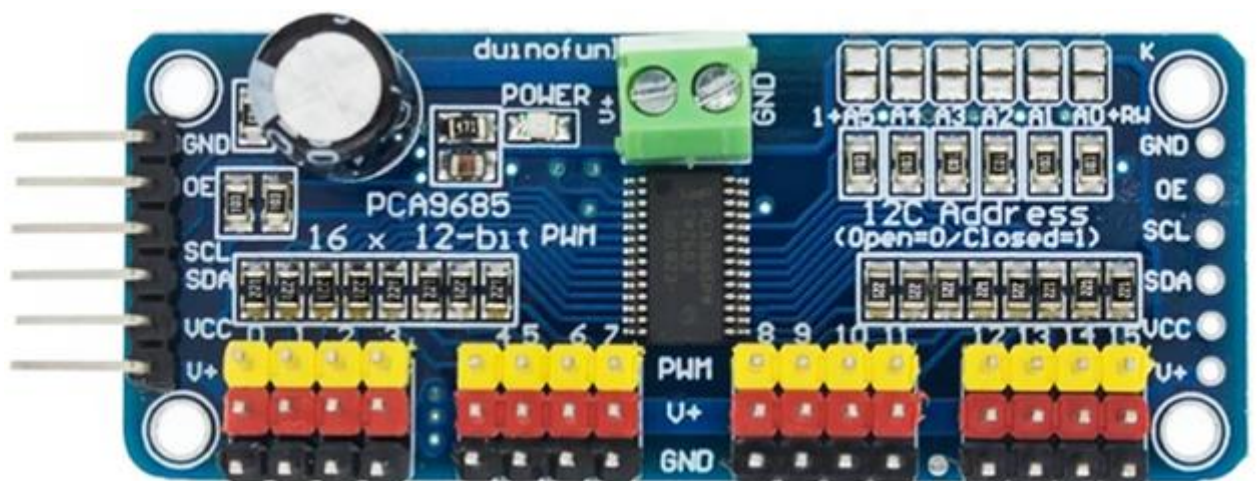


Рисунок 2.3 – Плата керування сервоприводами PCA9685

Також можлива реалізація коли кожен сервопривід підключений напряму до плати. Наприклад, якщо брати ArduinoMega 2560, вона має близько 15 доступних PWM-виходів, але бібліотека Servo.h дозволяє керувати сервоприводами і через звичайні цифрові піни, використовуючи таймери.

Сервоприводи для ніг будемо використовувати MG90, обрані через їхню компактність, відносно високу точність позиціонування, невелику вагу і доступну ціну.

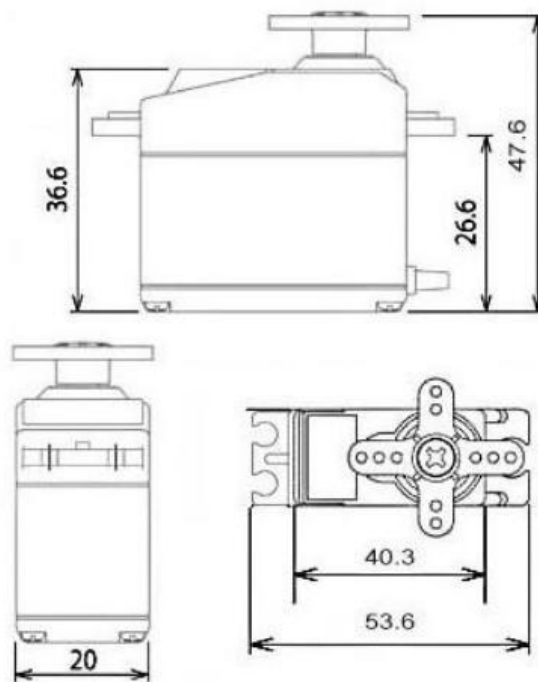


Рисунок 2.4 – Сервопривід MG90

Енергопостачання — ще один важливий компонент системи. Оскільки сервоприводи споживають значну кількість енергії, використовується окреме джерело живлення, найчастіше акумулятор Li-ion або Li-Po. Напруга регулюється модулем стабілізації(рис.2.6), щоб відповідати вимогам сервоприводів (5–6 В). Плата мікроконтролера підключена напряму до акумулятора, необхідні (7-9 В).

Для системи живлення ми використаємо літій-полімерний акумулятор

(точна необхідна для експлуатації ємність батареї має бути визначена в результаті експериментальних випробувань), який характеризується високою енергощільністю, низькою вагою та компактними розмірами.



Рисунок 2.5 – Літій-полімерний акумулятор

Для живлення сервоприводів і плати використано знижувальні перетворювачі напруги 5В 3А, які стабілізують напругу з акумулятора, забезпечуючи необхідний струм для коректної роботи компонентів. Це запобігає перешкодам і збоїв у роботі електроніки, що можуть виникати при нестабільному живленні.



Рисунок 2.6 – Знижувальні перетворювачі напруги 5В 3А

Всі елементи з'єднуються через макетну плату або паяються на монтажній платі відповідно до електричної схеми, де окремо відводяться шини живлення (GND, VCC) та канали сигналів керування. При цьому важливо ізолювати живлення сервомоторів від логічного кола мікроконтролера, щоб уникнути

перевантаження та нестабільності сигналу.

## 2.4 Сенсори і датчики

Крім виконавчих механізмів, у конструкцію також можуть бути інтегровані сенсори, вони обираються відповідно до потреб користувача, можуть бути змінними.

Для забезпечення автономної роботи, орієнтації в просторі та прийняття рішень під час руху гексапод має бути оснащений системою сенсорів, яка дозволяє збирати інформацію про навколишнє середовище. Сенсори, що інтегруються в конструкцію мобільного робота, виконують роль органів чуття — вони надають дані для аналізу місцевості, виявлення перешкод, контролю рівноваги та прийняття рішень в реальному часі. Залежно від цільового призначення, набір сенсорів може варіюватися, але найчастіше використовується комбінація навігаційних, візуальних, тактильних і сенсорів середовища.

Ультразвукові сенсори, використовуються для виявлення перешкод на шляху. Вони встановлюються в передній частині робота та дозволяють йому орієнтуватися в просторі.

Інерціальні модулі, наприклад, MPU6050, які містять гіроскоп і акселерометр. Вони використовуються для відстеження положення корпусу в просторі, корекції балансу та забезпечення стабільної ходи навіть на нахилених або нестабільних поверхнях.

ІЧ-сенсори або оптичні датчики — можуть використовуватися для базової навігації, виявлення країв платформи або стеження за лінією.

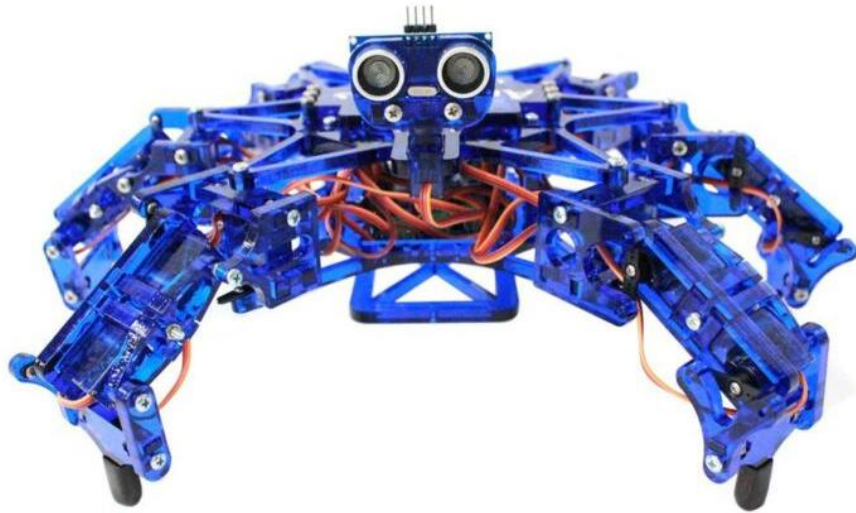


Рисунок 2.7 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 на Hexy від Adafruit

#### Функціональні сенсори.

Окрім навігаційних і стабілізаційних датчиків, гексаподи можуть бути обладнані сенсорною системою, яка дозволяє виконувати прикладні завдання — тобто не лише пересуватись, а й здійснювати вимірювання або моніторинг середовища, для якого робот був спроектований. Це особливо актуально у випадках, коли гексапод застосовується як мобільна платформа для дослідження, контролю, діагностики або збору даних.

Датчик вологості ґрунту (наприклад, YL-69 або CapacitiveSoilSensor) — використовується для аграрних задач або екологічного моніторингу. Дає змогу оцінити вологість на різних ділянках поля. У поєднанні з системою позиціонування гексапод може будувати карту вологості на визначеній території.

Температурно-вологісні модулі навколишнього повітря (DHT22, BME280) — дозволяють фіксувати поточні параметри мікроклімату. Їх використовують в агрономії, у моніторингових станціях або при екологічних дослідженнях у важкодоступній місцевості.

Газоаналізатори (MQ-серія: MQ-135, MQ-2, тощо) — вимірюють концентрацію шкідливих речовин у повітрі. Актуальні для гексаподів, які працюють у промислових зонах, шахтах, тунелях або на звалищах. Наприклад,

MQ-135 може визначати рівень CO<sub>2</sub>, аміаку, бензолу та інших токсичних газів.

Фотометричні або освітлені сенсори (BH1750, TSL2561) — використовуються для дослідження світлових умов у середовищі, де, наприклад, ростуть рослини. Застосовуються для оптимізації систем штучного освітлення або моніторингу природного освітлення.

Камери з функцією спектрального аналізу (MultispectralCamera, наприклад, Tetracam) — більш складне рішення для аналізу стану рослин за індексами типу NDVI. Такі модулі можуть використовуватись для виявлення зон з хворобами, нестачею води або надлишком добрив.

ІЧ-термодатчики (MLX90614, AMG8833) — дозволяють виявляти гарячі або холодні об'єкти на відстані. Корисно для пошуку живих істот у рятувальних операціях або аналізу теплових втрат у будівлях.

Хімічні сенсори для ґрунту або води (рН-метри, електропровідність, концентрація солей) — дають змогу гексаподу виступати як автономна мобільна лабораторія. Вимірювання здійснюється при фізичному контакті з поверхнею через занурювані зондові модулі.

Геофізичні сенсори — наприклад, датчики вібрацій або геомагнітного поля, які можна використовувати для виявлення активності в ґрунті (рух пластів, сейсмічна активність, наявність підземних порожнин).

Такі сенсори підключаються до основного мікроконтролера або окремого сенсорного блоку та можуть зберігати або передавати зібрані дані для подальшої обробки. У багатьох випадках гексапод виконує роль не просто платформи, що рухається, а роботизованого польового оператора, який здатен автономно збирати і передавати екологічну чи технічну інформацію із середовища, де присутність людини небажана або неможлива.

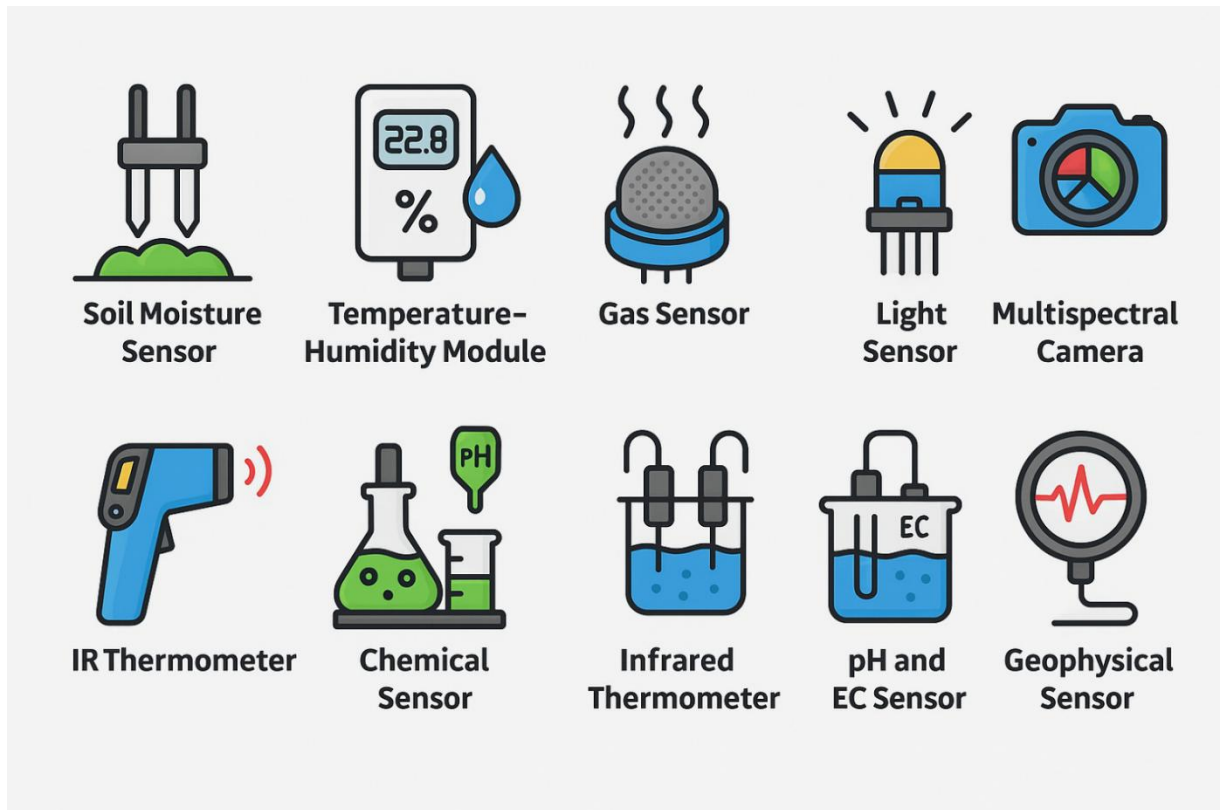


Рисунок 2.8 – Можливості розширення функціоналу платформи

Загалом, електронна схема гексапода формує комплексну, цілком логічну систему, у якій чітко розмежовані функції обробки сигналів, виконання рухів і зчитування навколишнього середовища. Така структура дозволяє як базове керування вручну, так і розширення до повністю автономної моделі.

## 2.5 Програмне забезпечення та алгоритми керування

Було використане базове, проте ефективне рішення для реалізації програмної логіки та управління рухами: мікроконтролер ArduinoMega у поєднанні зі стандартною бібліотекою Servo.h, яка дозволяє керувати серводвигунами без додаткових драйверів. Це дає змогу формувати базову модель системи керування, що реагує на прості команди і виконує рухи кінцівок у заздалегідь запрограмованій послідовності. Код прошивки наданий у Додатку А.

Кожна нога має три сервоприводи (стегно, коліно, таз), і кожен

сервопривід керується окремим PWM-сигналом з цифрового піну. Весь контроль руху реалізується через функції `servo.write(angle)`, які послідовно виставляють необхідні кути повороту кожного приводу. Програма має фіксовані блоки кодів для виконання базових рухів: підняти ногу, змістити її вперед, опустити, змінити опорні точки, тощо. Наприклад, реалізовані різні варіанти ходи: триподна, хвиля, чотиринога.

### Лістинг 1.1 – Програмування триподної ходи і підключення сервоприводів

```
#include <Servo.h>
...
constint COXA1_SERVO = 19;           //servoportdefinitions
constint FEMUR1_SERVO = 21;
constint TIBIA1_SERVO = 23;
...
inttripod_case[6] = {1,2,1,2,1,2}; //fortripodgaitwalking
...
Servo coxa1_servo;           //18 servos
Servo femur1_servo;
Servo tibial_servo;
...

//processmodes (mode 0 isdefault 'homeidle' do-nothingmode)
if(mode == 1)                //walkingmode
{
  if(gait == 0) tripod_gait();
  ...
}
...

// TripodGait
// Groupof 3 legsmoveforwardwhiletheother 3 legsprovidesupport
voidtripod_gait()
{
  //readcommandedvaluesfromcontroller
  commandedX = map(ps2x.Analog(PSS_RY), 0, 255, 127, -127);
  commandedY = map(ps2x.Analog(PSS_RX), 0, 255, -127, 127);
  commandedR = map(ps2x.Analog(PSS_LX), 0, 255, 127, -127);

  //ifcommandsmorethandeadbandthenprocess
  if((abs(commandedX) > 15) || (abs(commandedY) > 15) || (abs(commandedR) >
15) || (tick>0))
  {
    compute_strides();
    numTicks = round(duration / FRAME_TIME_MS / 2.0);
//totalticksdividedintothetwocases
    for(leg_num=0; leg_num<6; leg_num++)
    {
      compute_amplitudes();
      switch(tripod_case[leg_num])
      {
        case 1:                //movefootforward (raiseandlower)
          current_X[leg_num] = HOME_X[leg_num] - amplitudeX*cos(M_PI*tick/numTicks);
          current_Y[leg_num] = HOME_Y[leg_num] - amplitudeY*cos(M_PI*tick/numTicks);
```

```

    current_Z[leg_num] = HOME_Z[leg_num] +
abs(amplitudeZ)*sin(M_PI*tick/numTicks);
    if(tick>= numTicks-1) tripod_case[leg_num] = 2;
    break;

    case 2:                                //movefootback (ontheground)
current_X[leg_num] = HOME_X[leg_num] + amplitudeX*cos(M_PI*tick/numTicks);
current_Y[leg_num] = HOME_Y[leg_num] + amplitudeY*cos(M_PI*tick/numTicks);
current_Z[leg_num] = HOME_Z[leg_num];

    if(tick>= numTicks-1) tripod_case[leg_num] = 1;
    break;
    }
}

//incrementtick
if(tick< numTicks-1) tick++;
elsetick = 0;
}
}

```

Для обміну даними з користувачем або зовнішніми системами, плата керування оснащена Bluetooth-модулем або модулем Wi-Fi (ESP8266), що дозволяє реалізувати дистанційне керування через мобільний додаток або веб-інтерфейс.

ESP8266, він є оптимальним вибором для гексапода завдяки своїй низькій вартості, повній інтеграції Wi-Fi, різним режимам роботи, простоті використання з Arduino та підтримці протоколів TCP/IP. Він забезпечує необхідну функціональність для бездротового керування та передачі даних, при цьому залишаючись доступним та простим у використанні. До того ж підтримує надійний протокол передачі даних TCP/IP.

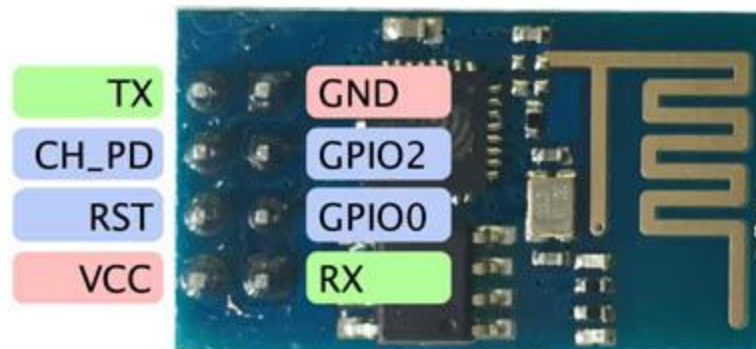


Рисунок 2.9 – Модуль Wi-Fi ESP8266

## 2.6 Конструювання тестової моделі

Для верифікації принципів роботи гексапода та перевірки обраних технічних рішень було реалізовано тестову модель, яка поєднує базову механічну платформу з функціональними можливостями дистанційного керування й часткової адаптації до середовища. Модель виконана за принципом простоти, модульності та доступності, що дозволяє швидко вносити зміни в конструкцію й програмне забезпечення в ході експериментів.

Механічна частина складається з платформи, виготовленої методом 3D-друку, до якої закріплено шість ніг, кожна з яких має по три ступені свободи: привід обертання в тазу, згинання в "стегні" та "коліні". Використано сервоприводи MG90S, що забезпечують достатній момент для переміщення моделі по горизонтальній поверхні. Модульність кріплення дозволяє замінювати окремі приводи чи сегменти ноги без демонтажу всієї платформи. Вага конструкції зменшена за рахунок використання PLA-пластику.

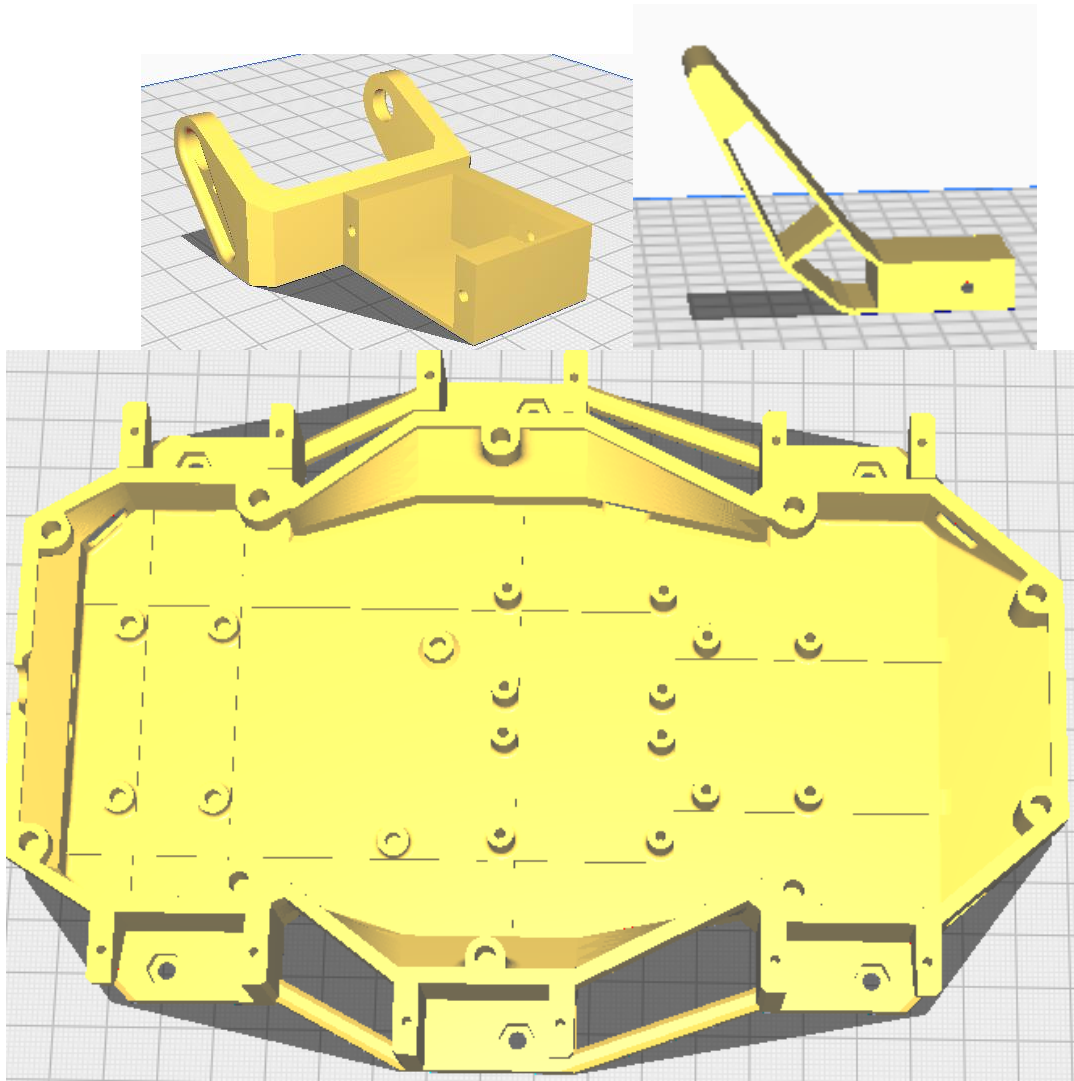


Рисунок 2.10–Надруковані елементи

Керування моделлю здійснюється з використанням мікроконтролера ArduinoMega ADK, який забезпечує необхідну кількість цифрових виходів для прямого підключення всіх 18 сервоприводів без додаткових модулів. У якості керування обрано бездротовий геймпад від PlayStation 2, сигнал з якого надходить на Arduino через спеціалізований RF-приймач. Протокол обміну реалізовано через SPI-подібний інтерфейс з використанням бібліотеки PS2X\_lib.

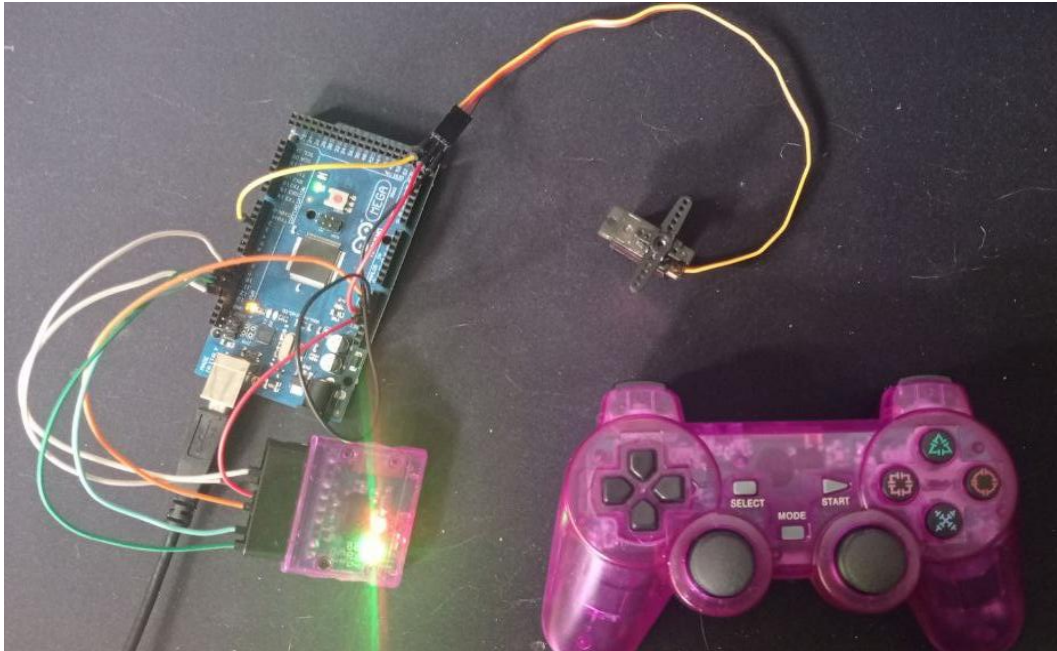


Рисунок 2.11 – Тестування геймпада

Сервоприводи живляться окремо від логіки керування, через DC-DC понижуючий перетворювач, який стабілізує напругу з літійового акумулятора до 5.5–6 В. Це дозволяє уникнути просадок напруги та потенційного перезавантаження мікроконтролера.

Для реалізації рухів у моделі закладено базовий алгоритм триподної ходи, що дозволяє забезпечити стабільне пересування з мінімальними коливаннями платформи. Керування здійснюється в ручному режимі: в наслідок натискання кнопок геймпада Arduino обчислює потрібні кути повороту сервоприводів за допомогою бібліотеки Servo.h.

Зібрана модель також обладнана базовими сенсорами для збору навколишньої інформації — в першу чергу це ультразвуковий сенсор HC-SR04 та

модуль IMU (MPU6050). Вони дозволяють у подальшому реалізувати адаптивні алгоритми стабілізації та уникнення перешкод, хоча наразі в поточному варіанті не інтегровані до основної системи керування.

Зовнішній вигляд, розташування компонентів та логіка взаємозв'язків між ними представлені на структурній схемі, поданій нижче (рис. 2.12). Вона наочно ілюструє архітектуру системи та логіку керування як з боку користувача, так і на рівні взаємодії пристроїв.

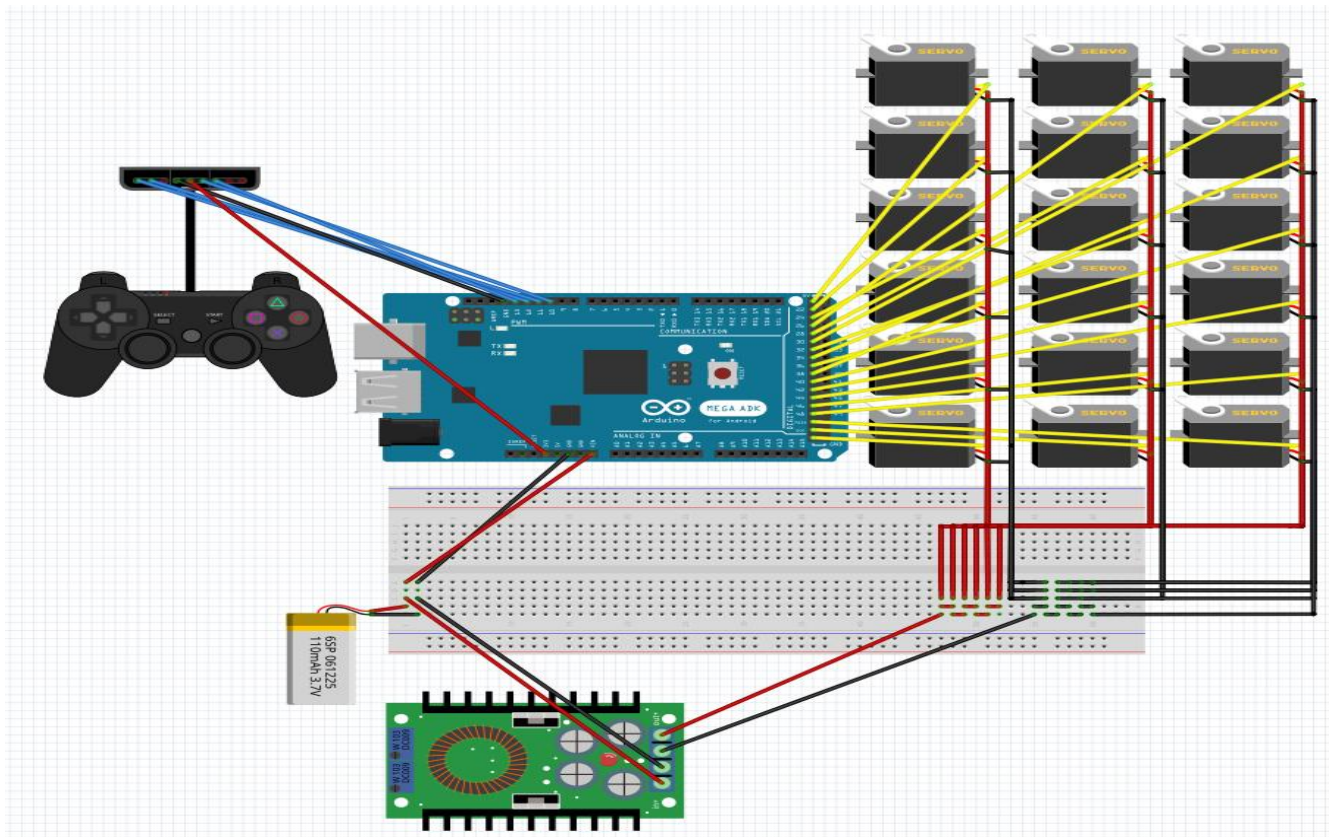


Рисунок 2.12 – Структурна схема тестової моделі

Таким чином, створена тестова модель повністю задовольняє вимоги до демонстрації основних принципів роботи гексапода: синхронного керування шістьма ногами, виконання команд у режимі реального часу, гнучкої модифікації механіки та можливості доповнення системи сенсорикою або елементами автономного керування.

## 3 ТЕСТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДИМОСТІ

### 3.1 Аналіз прохідності гексапода при перепаді висот

Одним із ключових факторів, що визначає ефективність роботи гексапода як мобільної платформи в умовах реального середовища, є його здатність зберігати стійкість і продовжувати рух при наявності нахилів та перепадів висоти. Такі умови типові для складного рельєфу — сходів, терас, кам'янистого або лісистого середовища.

Під час експериментального моделювання та польових випробувань тестової моделі гексапода було виявлено, що ключову роль у проходженні нахилених поверхонь відіграє правильна координація ніг, а також можливість модифікації параметрів ходи відповідно до кута нахилу.

У відповідності до результатів дослідження у модуляції, стабільність гексапода на похилих площинах забезпечується за рахунок реалізації адаптивної генерації ходи, або зробити самого робота динамічно стійким. Завдяки наявності шести кінцівок робот здатен зберігати стійкість навіть при відриві кількох ніг від опорної площини. У ході експериментів було визначено, що при використанні триподної ходи робот демонструє впевнений рух на поверхнях із кутом нахилу до 15–18 градусів без додаткових алгоритмів стабілізації.

При куті нахилу 20 градусів і вище(рис.3.1) у моделі спостерігається зміщення центру ваги, що може призводити до втрати рівноваги або ковзання — особливо при недостатньому терті між "стопами" і поверхнею. Для компенсації цього ефекту рекомендується використовувати алгоритми з компенсацією нахилу — наприклад, зміщення центру тіла назад при русі вгору схилом або зменшення висоти підйому ніг.

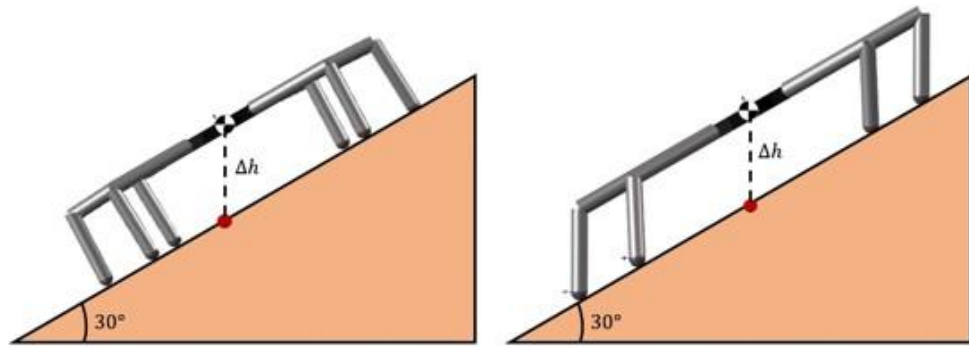


Рисунок 3.1 – Симуляція гексапода на похилій поверхні

Прохідність сходами, як показали польові випробування та симуляції, можлива лише при певному співвідношенні висоти сходинки до довжини ноги гексапода. У моделі, аналогічній тій, що використовується в тестовому макеті, оптимальна висота сходинки — не більше  $2/3$  від довжини стегнового та колінного сегментів у розгорнутому положенні. При більш високих сходах нога не здатна надійно перенести точку опори на наступний рівень, що призводить до зависання.

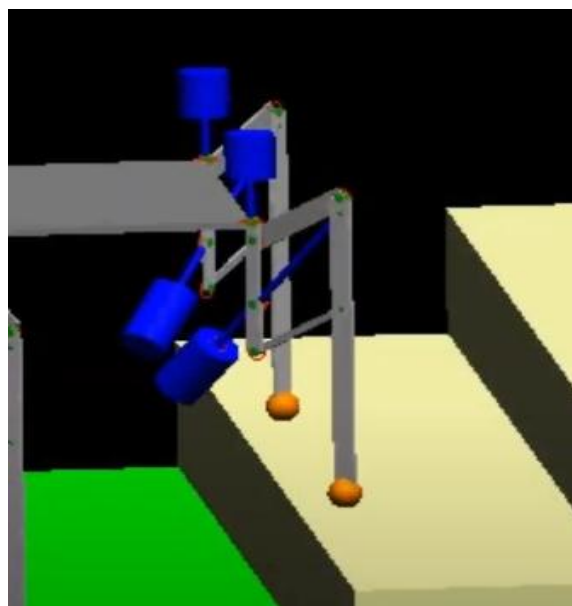


Рисунок 3.2 – Симуляція ходи по сходам

Для подолання сходинок гексаподом необхідно реалізовувати змінений алгоритм ходи, який передбачає:

- збільшений вертикальний підйом ніг;
- ротацію тіла назад, щоб зменшити переднє навантаження;
- покрокове “переповзання” з опорою трьома ногами.

Згідно з моделюванням, при дотриманні цих умов робот може успішно долати 3–4 стандартні сходинки заввишки до 5 см кожна. Проте, що важливо, необхідна точна синхронізація рухів і відсутність ковзання при опорі.

Таким чином, гексаподна платформа демонструє добру адаптацію до нахилених площин і складного рельєфу, але вимагає ретельного налаштування алгоритмів керування та врахування граничних механічних параметрів. Це робить її перспективною для застосування в напівструктурованих середовищах, зокрема в пошуково-рятувальних операціях, автономному картографуванні або аграрному моніторингу.

### 3.2 Пересування гексапода по різних типах ґрунтових поверхонь

Окрему увагу хочу звернути на здатність гексаподів долати різноманітні природні поверхні є ключовим фактором його універсальності. Особливої уваги потребують умови, коли робот пересувається не по рівному покриттю, а по типових для зовнішнього середовища поверхнях: щільному твердому ґрунті, пухкому піску, мокрій або слизькій землі. Під час експериментів із тестовою моделлю було вивчено вплив типу покриття на стабільність руху, енерговитрати та надійність ходи.

На твердому ґрунті (ущільнена земля, плитка, бетон) модель демонструє найбільшу стабільність. Опір тертя достатній для утримання платформи під час ходи, ковзання не виникає. Перешкод немає, тому траєкторія переносу ноги залишається стандартною — з мінімальним підйомом.

На пухких поверхнях (пісок, сипучий ґрунт, сухий листопад) спостерігається зниження ефективності опори. Ноги частково заглиблюються, що

зменшує точність кроку і призводить до енергетичних втрат. Також трапляються мікросповзання назад, особливо при русі вгору. У таких умовах ефективною виявилася повільніша хода з більш тривалим контактом ноги з поверхнею. Для компенсації осідання було збільшено висоту підйому ноги та ширину рознесу опорних точок. Також для вирішення цієї проблеми я пропоную використовувати з'ємні насадки на кінцівки, що збільшують їх площу контакту з поверхнею.

При пересуванні по вологій або слизькій землі (глина, мокра трава, лід) основна проблема — втрата тертя та сповзання при перенесенні ваги. Коли місцевість або добре відома заздалегідь (точна модель місцевості відома апріорі), або точно спостерігається бортовими датчиками, робот може використовувати алгоритми планування руху для навігації та підтримки стійкості. Однак, неочікувані збої ніг можуть виникнути через недоліки моделі місцевості або датчиків, або просто через динамічний характер місцевості (наприклад, пухкий ґрунт/каміння, сміття, пісок)[8].

У тестах було виявлено, що навіть при стабільній положенні трапляється бокове ковзання опорних ніг. Для часткового усунення цього ефекту застосовують:

- зменшення висоти корпусу (центру маси);
- зниження швидкості переносу ноги;
- використання гумових накладок на “стопи”

На рослинному покриві (трава, мох, коріння) рух залежить від жорсткості ніг і ваги платформи. Легкі гексаподи без достатнього тиску можуть “застрягнути” у траві, тоді як моделі зі збільшеною масою краще прорізають покрив і продовжували рух.

Отже, на сипучих поверхнях ефективність знижується, вимагається уповільнення та збільшення площі опори, на слизьких — головна задача зберегти стабільність і не допустити бокового сповзання.

Перехід між різними типами ґрунтів у режимі реального часу може бути автоматизований шляхом аналізу відхилень у русі корпусу (за даними IMU) або додаванням простих датчиків опору/навантаження на стопи. Таким чином, навіть

базовий гексапод має потенціал для пересування в умовах змінного природного середовища — за умови адаптації типу ходи та стабілізаційної поведінки.

### 3.3 Дослідження ефективності різних типів ходи

Порядок і ритм переміщення кінцівок гексапода має вирішальний вплив на його стабільність, швидкість пересування, енергоспоживання та здатність долати перешкоди. Протягом експериментальної фази проєкту було проведено порівняння кількох типових алгоритмів ходи на тестовій моделі, а також проаналізовано результати передових досліджень, зокрема роботу фахівців EPFL[9], що продемонстрували альтернативний до біологічного підхід.

Вище вже були згадані біоінспіровані типи ходи, такі як:

- триподна хода (tripodgait) — коли три ноги завжди в контакті з поверхнею, а інші три — в повітрі;
- хвильова хода (wavegait) — ноги рухаються по черзі, створюючи своєрідну “хвилю” опори;
- перехресна хода (ripplegait) — плавний варіант між хвильовою та триподною;
- біподна хода (bipodgait) – дві ноги забезпечують опору, а інші — перенос.

У дослідженні, проведеному командою лабораторії BioRob (EPFL), було встановлено, що біологічна триподна хода, яка широко використовується в комах не є найефективнішою. Навпаки, відхід від природної симетрії дозволяє досягти кращої ефективності в технічній реалізації і досягнути більшої швидкості[9].

У рамках власних досліджень на макеті гексапода було протестовано кілька схем переміщення.

Біподна хода забезпечила найвищу швидкість пересування на рівних поверхнях, але мала гіршу стійкість на слизькому та сипкому покритті.

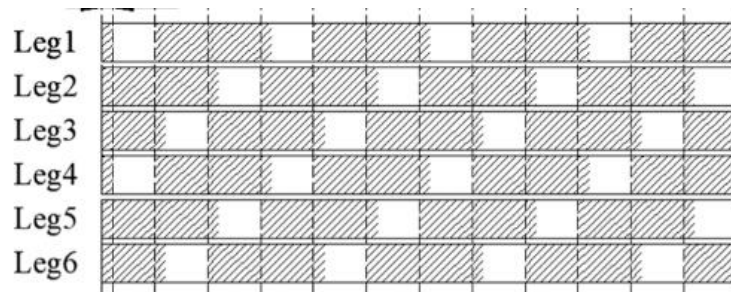


Рисунок 3.3 – Візуалізація біподної ходи

Найбільшу стабільність показала триподна хода, яку використовують комахи, отримують найбільше сцеплення з поверхнями. Ідеально підходить для пересування на похилих твердих поверхнях.

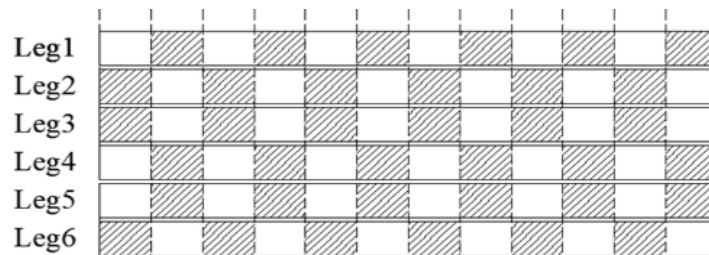


Рисунок 3.4 – Візуалізація триподної ходи

Хвильова хода показала кращу стабільність саме на слизькій поверхні, проте швидкість була нижчою, і енерговитрати зростали через більшу тривалість циклу.

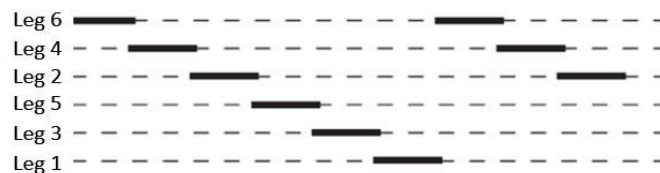


Рисунок 3.5 – Візуалізація хвильової ходи

Це узгоджується з висновками дослідження EPFL[9]: в технічних гексаподах не завжди варто копіювати природу, адже системи керування та фізика штучних конструкцій відрізняються від біологічних організмів.

У майбутньому для досягнення оптимальної ходи пропонується впровадити адаптивні системи, які:

- в режимі реального часу змінюють тип ходи в залежності від зворотного зв'язку із сенсорів;
- врахування навантаження, кут нахилу платформи, тертя та динаміку ніг;
- комбінування *machine learning* та класичних алгоритмів траєкторії.

Таким чином, експеримент підтверджує: найкраща хода для гексапода — та, що адаптована до його механіки та умов середовища, а не обов'язково природна.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було проведено комплексне дослідження особливостей конструкції, алгоритмів керування та практичного використання гексаподного робота як мобільної платформи для транспортування в складних рельєфах території. Детально розглянуто історичний розвиток конструкцій, механічну структуру шестиногих систем, типи ходи, сенсорну частину та програмне забезпечення, що відповідає за стабільне керування у змінних умовах середовища.

Була спроектована та реалізована тестова модель гексапода з 3ма ступенями свободи, побудована на базі ArduinoMega. Керування реалізовано за допомогою бездротового геймпада PS2. У моделі реалізовано базову триподну ходу з можливістю налаштування параметрів. Проведено серію експериментальних випробувань на різних типах поверхні: твердих, сипучих, слизьких, а також у ситуаціях з перепадами висоти. Проведені експерименти з різними типами ходи.

Отримані результати підтверджують високу адаптивність гексапода як мобільної платформи до складних умов рельєфу. У ході випробувань різних типів ходи встановлено, що ефективність залежить не лише від типу поверхні, а й від вибраної стратегії координації ніг. Зокрема, асиметричні ходи, запропоновані у сучасних дослідженнях, можуть мати вищу швидкість і стабільність, ніж класичні біоінспіровані триподні схеми.

Проведене дослідження також доводить доцільність застосування гексаподів для виконання задач на нерівному рельєфі. Практичне значення розробки полягає в можливості адаптації цієї платформи до екологічного та аграрного моніторингу та інспекції важкодоступних територій.

Результати роботи підтверджують доцільність застосування гексаподних платформ у завданнях пов'язаних зі складним рельєфом місцевості, а також закладають основу для подальших досліджень і вдосконалення мобільних автономних роботизованих систем.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mills J.W. Stiquito(tm): Advanced Experiments with a Simple and Inexpensive Robot. Los Alamitos, 1997. 332 p.
2. Sutherland I.E. Six-Legged Hydraulic Walker //Scientific American. 1983. Vol. 248(1). P. 32-41.
3. Beyatlı A. What Are Hexapod Robots Used For? // ACROME. 2024. 1 October. URL: [https://acrome.net/post/what-are-hexapod-robots-used-for?utm\\_source=chatgpt.com](https://acrome.net/post/what-are-hexapod-robots-used-for?utm_source=chatgpt.com) (дата звернення: 14.05.2025).
4. Monteferrario R. BUILD AN HEXAPOD: Mathematics, physics, electronics, 3D design, 3D printing and programming needed to build a six-legged robot. Independently published, 2024. – 192p – ISBN-13: 979-8320115221
5. KULYA Hexapod // UkraineRobotics. 2023. URL: <https://www.ukrainerobotics.com/product-page/hexapod-kulya> (дата звернення: 17.05.2025).
6. Markwtech Hexapod Robot // AUTODESK Instructables. 2021. March 30. URL: <https://www.instructables.com/Hexapod-Robot/>(дата звернення: 08.06.2025).
7. Navinda Kottege. Real-time slip detection and recovery for a hexapod robot. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=5lf2lYAihQ8&t=61s>(дата звернення: 10.06.2025).
8. Pessina L.A. Six-Legged Robots Faster Than Nature-Inspired Gait // EPFL. 2017. February 17. URL: <https://actu.epfl.ch/news/six-legged-robots-faster-than-nature-inspired-gait/>(дата звернення: 08.05.2025).