

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Мобільний робот-гексапод
Назва теми

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

КвРАКІТ. 2023146.01.09.ПЗ
Шифр

Виконав здобувач 3 курсу, група АКІРС-23-1
Шифр


Підпис

Дмитро ДРОБОТ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Денис МАКАРИШКІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

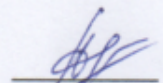
Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

09.06.2026р.
Дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет	<u>Інформаційних технологій</u>
Кафедра	<u>Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки</u>
Рівень вищої освіти	<u>перший (бакалаврський)</u>
Галузь знань	<u>17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації</u>
Спеціальність робототехніка	<u>174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та</u>
Освітня програма	<u>Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка</u>
	ЗАТВЕРДЖУЮ
	Завідувач кафедри АКИТтаР <u>Людмила КОРЕЦЬКА</u>
	<u>07 лютого 2026 р.</u>

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дроботу Дмитру Борисовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Мобільний робот-гексапод

Керівник роботи Макаришкін Денис Анатолійович, канд. техн. наук, доц

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від _____ 2026 р. № _____

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики


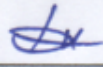
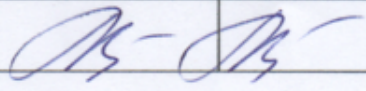
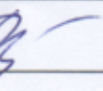
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ, ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ГЕКСАПОДА, ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Мобільний робот-гексапод».

Автор роботи: Дробот Дмитро Борисович

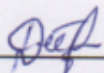
Керівник роботи: Макаришкін Денис Анатолійович

Пояснювальна записка: 67 с., 30 рис., 0 табл., 0 дод., 46 джерел.

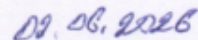
Графічна частина: 8 презентаційних слайдів.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ГЕКСАПОД, КІНЕМАТИКА, МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, МОДЕЛЮВАННЯ, СЕРВОПРИВОДИ, ARDUINO, PYTHON.

Мета роботи: розробити робота-гексапода на базі контролера Arduino, здатного здійснювати стабільне та кероване переміщення по різних типах поверхонь. Результати виконаної роботи підтверджують можливість створення функціонального мобільного робота-гексапода на базі доступних апаратних компонентів та відкритих програмних платформ. Розроблені технічні рішення забезпечують стабільну роботу системи, можливість подальшого розширення її функціоналу та створюють основу для реалізації більш складних алгоритмів автономної навігації, комп'ютерного зору, побудови карт навколишнього середовища та інтелектуального керування.



Підпис студента



Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ	8
1.1 Особливості та види мобільних роботів.....	8
1.2 Особливості конструкції роботів гексаподів	14
1.3 Висновки до першого розділу	16
2 ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ГЕКСАПОДА.....	18
2.1 Структурна організація робота гексапода.....	18
2.2 Дослідження кінематичних рівнянь гексапода	21
2.3 Вибір компонентів робототехнічної системи.....	28
2.4 Розробка електричної принципової схеми	34
2.5 Висновки до другого розділу	39
3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ.....	41
3.1 Загальна структура програмного забезпечення гексапода.....	41
3.2 Архітектура програмного забезпечення	43
3.3 Логічна схема взаємодії модулів програмного забезпечення	47
3.4 Реалізація бездротового зв'язку	52
3.5 Висновки до третього розділу	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Мобільний робот-гексапод Пояснювальна записка	Лім.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Дробот Д.Б.		02.06.23				
Перевір.		Макаришин Д.А.		02.06.23			4	67
Реценз.						ХНУ, АКІТРс-23-1		
Н. Контр.		Радельчук Г. І.		02.06.23				
Затверд.		Корецька Л.О.		02.06.23				

ВСТУП

Актуальність теми. Останні роки напрямок робототехніки стрімкого розвивається поділившись на два головних напрямки за біологічною аналогією – людиноподібні роботи (гуманоїдні) та твариноподібні (зооморфні), біологічна аналогія не враховує роботів маніпуляторів, дрони, колісні та гусеничні роботи, хоча можливо виділити схожість структур та принципів руху [1-3]. Особливої уваги та попиту набувають мобільні платформи, здатні ефективно функціонувати в складних та невизначених середовищах. Одним із перспективних напрямів розвитку є гусеничні роботизовані платформи та використання багатонігих роботів, зокрема гексаподів, які завдяки своїй конструкції забезпечують високу прохідність, стійкість і адаптивність до нерівних поверхонь. Гексаподні роботи знаходять широке застосування в наукових дослідженнях, розглядаються як заміна стандартних собакоподібних роботів у військовій та охоронній сфері, а також у промисловій сфері.[3-6]

Використання мікроконтролерних платформ або готових простих плат керування, таких як Arduino, дозволяє створювати відносно недорогі та гнучкі у налаштуванні системи, що сприяє популяризації подібних розробок у навчальному процесі та інженерній практиці.

Особливу увагу при розробці багатонігих роботів приділяють питанням координації рухів, стабілізації та оптимізації руху робота, що дозволяє розподілити вагу платформи на кілька приладів відповідальних за рух, що в свою чергу призводить до зменшення вимог навантаження на суглоби – рухомі компоненти та як результат їх здешевлення.

Розробка ефективних алгоритмів керування дозволяє забезпечити плавність пересування, енергоефективність та здатність адаптуватися до змін умов середовища. Це є важливим аспектом при створенні автономних роботизованих систем.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

Таким чином, розробка робота гексапода на базі контролера Arduino є актуальним завданням, що сприяє розвитку мобільної робототехніки, дозволяє виконати умови бакалаврського проекту - набути первинного досвіду комплексного розв'язання задач розроблення нових і модернізації та експлуатації існуючих систем автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій з застосуванням сучасних програмно-технічних засобів та інформаційних технологій, виконуючи теоретичні дослідження об'єкта автоматизації, та вдосконаленню методів керування багатонагими системами для розширенню можливостей їх практичного застосування.

Метою роботи є розробка робота-гексапода на базі контролера Arduino, здатного здійснювати стабільне та кероване переміщення по різних типах поверхонь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій гексаподних роботів та систем їх керування;
- розробити структурну схему робота-гексапода;
- здійснити вибір апаратних компонентів, зокрема мікроконтролера, сервоприводів та допоміжних модулів;
- створити електричну принципову схему пристрою;
- розробити програмне забезпечення для керування рухами робота та реалізації алгоритмів ходи;
- дослідити характеристики руху та стабільність роботи гексапода.

Предметом дослідження є апаратно-програмний комплекс керування роботом гексаподом, що забезпечує координацію рухів його кінцівок та адаптацію до умов середовища з можливістю автоматичного керування параметрів швидкості та зворотнім зв'язком з користувачем для моніторингу критичних похибок та умов.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Розроблена система може бути застосована в освітньому процесі для підготовки фахівців у робототехніці та автоматизації, для майбутніх модифікацій, також для потенційного використання машинного навчання яке в свою чергу покращить результати керування та логіку руху, а також присутність моделі робота гексапода дозволить більш наглядно продемонструвати потенціал гексаподних роботизованих платформ для виконання різних задач та виконувати тестування потенційного застосування робота у різних галузях та як платформи для виконання переміщення інших систем автоматизації замінюючи стандартні гусеничні системи.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ

1.1 Особливості та види мобільних роботів

Робототехніка як науково-технічна галузь завжди активно розвивала напрямок створення мобільних систем, які здатні ефективно функціонувати в складних і слабо структурованих середовищах, як результат багаторічних досліджень на комерційному ринку можна виділити три головних напрямки прибуткового та доцільного застосування мобільних робототехнічних систем:

- роботи собаки розроблені за принципом прототипів Boston Dynamics;
- гусеничні/колісні роботизовані платформи;
- людиноподібні роботи.

Роботи собаки як на рисунок 1.1, найчастіше застосовуються для наукових досліджень але уже є прецеденти використання правоохоронними структурами замість звичайних собак при патрулюванні вулиць та військовими при розвідці, патрулюванні та охороні об'єктів [7,8].



Рисунок 1.1 – Приклад робота собаки

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головною перевагою подібних систем є їх простий дизайн який дозволяє просте транспортування вимкненого робота та обізнаність людей через використання подібних систем в фільмах та медіа, що в свою чергу не викликає страху та сильного занепокоєння в місцевого населення на відміну від інших типів які виглядають більш мілітаристично та схожі на промислову техніку.

Додатковим плюсом для застосування подібних роботів є використання чотирьох ніг, що дає роботу собаці переваги в балансуванні та русі по складних маршрутах, більшість роботів собак здатні балансувати на двох ногах і в певних випадках та моделюванні на одній.

Гусеничні-колісні роботизовані платформи (наземні роботизовані комплекси) найчастіше застосовуються рятувальниками, військовими та саперами. Головною перевагою подібних систем є їх простота та модульність, майже завжди використовують за основу рухому платформу з використанням кількох коліс або гусениць на які встановлюють необхідне обладнання, подібні системи легко модифікуються та масштабуються під необхідні завдання, як зображено на рисунку 1.2, залишаючись простими в своїй будові та надійними через малу кількість компонентів.

Враховуючи переваги існуючих гусеничних-колісних роботизованих платформ слід також враховувати їх недоліки, головним з яких є обмеження які створює принцип роботи системи руху, та її вага, як прикладу робот для знешкодження вибухівки який використовують збройні сили сполучених штатів (рисунок 1.3) має вагу до 50 кілограмів та розміри 1x1 метр, більш складні версії мають вагу до 500 кілограмів та більші габарити, що унеможлиблює їх роботу в малих приміщеннях та місцях з пошкодженою чи нестабільною підлогою яка може не витримати вагу робота.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

необхідність та безпеку використання роботизованої платформи для обережного складання усіх вибухонебезпечних предметів у спеціальну захисну ємність для подальшого знешкодження. Нажаль через обмеження платформ які використовують гусениці для пересування працівникам ДСНС довелося виносити робота руками на дах будинку та переносити через усі сходи на даху, що ставило їх життя в небезпеку через можливість детонації боєприпасів розкиданих на даху, рисунок 1.4, що в свою чергу ще раз демонструє недолік системи розробленої інженерами сполучених штатів для роботи на вулицях чи дорогах з легким доступом до вибухового предмету.



Рисунок 1.4 – Рятувальники ДСНС переносять багатофункціонального робота через перешкоду на даху

Останні роки значного розвитку отримали гуманоїдні – людиноподібні роботи для повсякденного використання або для виступів, як показали нові Китайські роботи від компанії Unitree Robotics на Весняному гала-шоу, рисунок 1.5. Схожість за будовою на людина надає цьому типу роботів багато переваг

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

але і недоліків, найбільшим з яких є їх ціна, у певних випадках заміна пошкодженої кінцівки подібного робота обійдеться користувачу в ціну кількох простих колісних або собакоподібних роботів. Роботи собаки, колісні роботи та інші типи з кількома кінцівками здатні пересуватися та виконувати поставлене завдання при пошкодженні кінцівки, доки робот буде мати достатню підйомну силу чи здатність балансувати, таким чином навіть при ушкодженні половини рухомих компонентів система буде дієздатною.



Рисунок 1.5 – Виступ роботів компанії Unitree Robotics на Весняному гала-шоу в Китаї

Гуманоїдні роботи отримують значну частину фінансування у галузі робототехніки в першу чергу через симпатію людей пов'язану з поєднанням когнітивних, соціальних і функціональних чинників:

- згідно з принципами антропоморфізму, люди природно схильні приписувати об'єктам людські риси, що полегшує сприйняття та взаємодію, що не раз було підтверджено при використанні та розробці моделей з штучним інтелектом та різних голосових помічників;

						<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
							12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

- подібність до людської будови забезпечує інтуїтивно зрозумілу комунікацію: жести, міміка на екрані та рухи сприймаються без навчання;
- людиноподібна форма є функціонально доцільною для роботи у середовищі, створеному для людини, зокрема при використанні інструментів або пересуванні у будівлях.

Водночас важливу роль відіграє емоційний аспект, такі роботи викликають ефект соціальної присутності, що підвищує довіру та зацікавлення, особливо в навчальних і демонстраційних застосуваннях.

Роботи гексаподи (рисунок 1.6), в певній документації називаються багатоногими платформами з шістьма кінцівками та відносяться до біоморфних роботів через схожість на комах в конструкції та принципі руху [9-11].



Рисунок 1.6 – Роботи гексаподи

Найбільшою перевагою є їх простота та дешевизна, робот здатен пересуватися стабільно використовуючи чотири кінцівки та навіть три при достатній кількості датчиків для відстеження кутів нахилу та навантаження, також використовуючи він здатен тягнути себе по землі дві кінцівки що звільняє при необхідності чотири кінцівки для виконання інших дій, таких як

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

захоплення об'єктів чи просте зниження висоти робота для проходження вузькими трубами чи завалами.

1.2 Особливості конструкції роботів гексаподів

Конструктивно гексапод являє собою робота, що складається з корпусу та шести кінематичних ланцюгів - ніг, кожна з ніг може мати від двох до шести ступенів свободи або суглобів. Корпус виконує роль несучої платформи, на якій розміщуються електронні компоненти, джерела живлення та обчислювальні модулі. Він має бути достатньо жорстким для забезпечення механічної стабільності, але водночас легким, щоб зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність руху, в певних випадках на корпус монтують додаткову платформу яка повинна виконувати унікальні завдання [13].

Ноги виконують одночасно декілька функцій:

- забезпечення руху;
- підтримання рівноваги;
- розподіл навантаження.

Завдяки шести точкам опори, роботи гексаподи здані залишатися в статично стабільному положенні навіть коли лише три ноги контактують із поверхнею, деякі дослідження з використанням штучного інтелекту вважають що при достатній силі ніг та розумінні контролеру точне положення кожного елемента робота дозволить балансувати на двох кінцівкам протягом певного часу. Стандартне використання трьох ніг для руху створює трикутник контакту, у межах якого центр маси системи забезпечує рівновагу [14].

Важливою особливістю гексаподу є модульність конструкції ніг, що спрощує процес проектування, обслуговування та ремонту. У разі виходу з ладу окремого модуля його можна замінити без необхідності повного розбирання системи в розробленому прикладі буде використовуватися група сервоприводів які можна легко замінити від'єднавши їх від точки з'єднання ланки або зняти

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

усю кінцівку разом для повної заміни. Крім того, модульний підхід дозволяє масштабувати конструкцію або адаптувати її під конкретні задачі, таким чином ми можемо замінити повністю ноги робота не вносячи змін та використовуючи старий корпус з електронікою, або замінили лише частину кінцівок якщо для них передбачаються додаткові завдання [15].

Найчастіше в гексаподах для руху використовують сервоприводи або крокові двигуни. У малих та середніх роботах на базі Arduino, зазвичай застосовуються сервоприводи, які забезпечують допустиму похибку та точність позиціонування кутів повороту суглобів, але через їх простоту більшість цих сервоприводів не здатні повідомляти контролеру про позицію сервоприводу при вимкненому стані [16].

Кількість приводів визначається кількістю ступенів свободи і може починатися від двох на кінцівку, дванадцяти на пристрої і доходити до шести на кінцівку, тридцяти шести на усю систему.

Особливу роль відіграє система керування, яка координує рух усіх кінцівок. Вона включає мікроконтролер, Arduino або ESP32 чи інші контролери розраховані під конкретне завдання, що обробляє сигнали від сенсорів і формує керуючі впливи на приводи [17].

При моделюванні конструкції критично важливо передбачати ефективно розміщення електронних компонентів і кабельної системи, щоб уникнути механічних пошкоджень під час руху або розбалансування ваги системи.

Інтеграція сенсорів у конструкцію є важливою для реалізації автономного функціонування але слід враховувати можливість заміни та здешевлення складних сенсорів та елементів більше простими елементами без позиціонування. Сенсорна підсистема може включати датчики відстані, гіроскопи, акселерометри та інші елементи, що забезпечують орієнтацію робота в просторі та адаптацію до зовнішнього середовища, для якісно працюючого розумного робота здатного пересуватися самостійно в різних складних середовищах наявність датчиків критично важлива, але для тестової моделі

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

вистачить камери та кількох акселерометрів для визначення вектору сили тяжіння і як результат нахилу платформи – корпусу [18].

1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено дослідження предметної області мобільної робототехніки та здійснено огляд сучасних літературних джерел і практичних прикладів застосування роботизованих систем.

У результаті аналізу виділено основні типи поділу мобільних роботів, серед яких найбільш поширеними є колісні та гусеничні платформи, чотириногі (собакоподібні) та людиноподібні роботи. Кожен із зазначених типів має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність їх використання в конкретних умовах експлуатації.

Колісні та гусеничні роботизовані системи характеризуються простотою конструкції, надійністю та високою вантажопідйомністю, однак їх ефективність обмежується складністю подолання перешкод, значною масою та залежністю від якості опорної поверхні.

Чотириногі роботи демонструють кращу здатність адаптуватися до нерівного рельєфу та підвищену стабільність, проте мають складнішу конструкцію та вищу вартість.

Людиноподібні роботи, незважаючи на їх функціональну універсальність, залишаються дорогими та технічно складними у реалізації і обслуговуванні моделями для виставок.

У межах аналізу особливу увагу було приділено роботам гексаподам як перспективному типу мобільних роботів. Встановлено, що їх головними перевагами є висока стійкість, можливість збереження працездатності при частковому пошкодженні, адаптивність до складних умов середовища завдяки використанню кількох точок опору та відносна простота реалізації у порівнянні з більш складними системами.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

Завдяки шести точкам опору стоячого робота та здатності змінювати алгоритм руху в залежності від складності маршруту гексаподи здатні реалізовувати стабільні алгоритми руху, що робить їх ефективними для використання в умовах обмеженого простору або нестабільної поверхні.

Аналіз конструктивних особливостей показав, що гексаподні роботи є складними системами, які поєднують механічну частину, приводи, систему керування та сенсорну підсистему. Важливими аспектами їх проектування є модульність конструкції, правильний розподіл маси, вибір приводів і забезпечення узгодженої роботи всіх елементів системи.

Окрему роль відіграє інтеграція сенсорів, зокрема акселерометрів і гіроскопів, що дозволяють визначати орієнтацію робота в просторі та підвищують рівень автономності.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує доцільність вибору гексаподної платформи для подальшої розробки та дослідження. Поєднання конструктивної гнучкості, відносної дешевизни та чудових характеристик робить такі системи перспективними для реалізації мобільних.

Отримані результати слугують теоретичною основою для подальшого проектування, розробки та дослідження роботизованої системи у наступних розділах роботи.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						17
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ГЕКСАПОДА

2.1 Структурна організація робота гексапода

Проектування мехатронної системи гексапода є одним із ключових етапів створення наземного роботизованого комплексу. Для виконання цієї задачі критично сформувавши загальну структуру робота, визначити принципи взаємодії між усіма компонентами системи, та обрати необхідні елементи які здатні взаємодіяти між собою з мінімальною затримкою. Від правильності побудови структурної організації залежить стабільність руху робота, точність виконання команд та можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи, що особливо важливо оскільки кожна роботизована система повинна бути модульною для спрощення ремонту та подальшої інтеграції нових модулів.

Як було визначено в першому розділі, робот-гексапод належить до класу багатоногих мобільних роботів. Основною особливістю таких систем є використання шести кінцівок для переміщення поверхнею і особливо нерівною місцевістю, долати невеликі перешкоди та зберігати стійкість навіть у випадку втрати кількох кінцівок [19].

У загальному випадку мехатронна система гексапода складається як і система звичайного собакоподібного робота з таких основних підсистем:

- механічна система;
- система приводів;
- система сенсорів;
- система керування;
- система живлення;
- система бездротового зв'язку;
- програмне забезпечення.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічна система формує несучу конструкцію робота та забезпечує фізичне розміщення всіх компонентів [20]. До складу механічної системи можна віднести:

- корпус;
- кінцівки;
- кріплення сервоприводів;
- шарнірні вузли;
- елементи опори.

Для більш швидкої розробки структури робота гексаподу найкращим варіантом буде використання готових моделей або додатків для розробки чи програмування мехатронних систем. Найпростішим для використання та головне безкоштовним варіантом є використання додатку CoreliaSim який підтримує як моделювання так і програмування мехатронних систем за допомогою Python, хоча використовуючи додаткові бібліотеки та API можна налагодити роботу програми на мові C/C++ [21].

Приклад створеного робота гексаподу зображено на рисунку 2.1, також CoreliaSim дозволяє візуально виділити положення та напрямки обертання суглобів у розробленій системі, як зображено на рисунку 2.2.

Як видно з рисунків 2.1 та 2.2 кожна кінцівка робота гексаподу приєднана до головного корпусу і складається з трьох сервоприводів, що в свою чергу забезпечує високу мобільність, тобто кожна кінцівка гексапода містить декілька ступенів свободи. У розробленій системі використовується найпопулярніша конструкція з трьома сервоприводами на одну ногу:

- соха (далі в тексті суглоб 0 або сервопривід $j_1 q_0$) поворот ноги відносно корпусу;
- femur (далі в тексті суглоб 1 або сервопривід $j_2 q_1$) підйом ноги;
- tibia (далі в тексті суглоб 2 або сервопривід $j_3 q_2$) згинання нижньої частини ноги.

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Таким чином, для шести кінцівок загальна кількість сервоприводів становить вісімнадцять, по шість кожного типу [22-23].

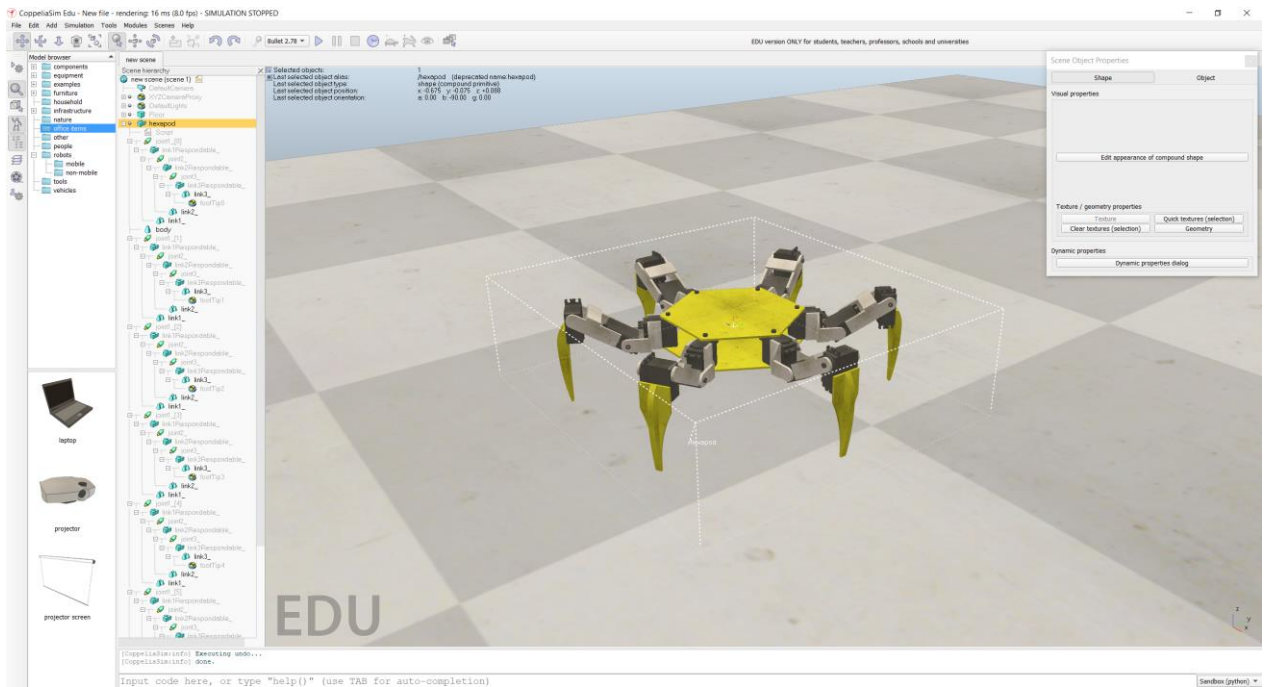


Рисунок 2.1 – Робот гексапод в середовищі CoreliaSim

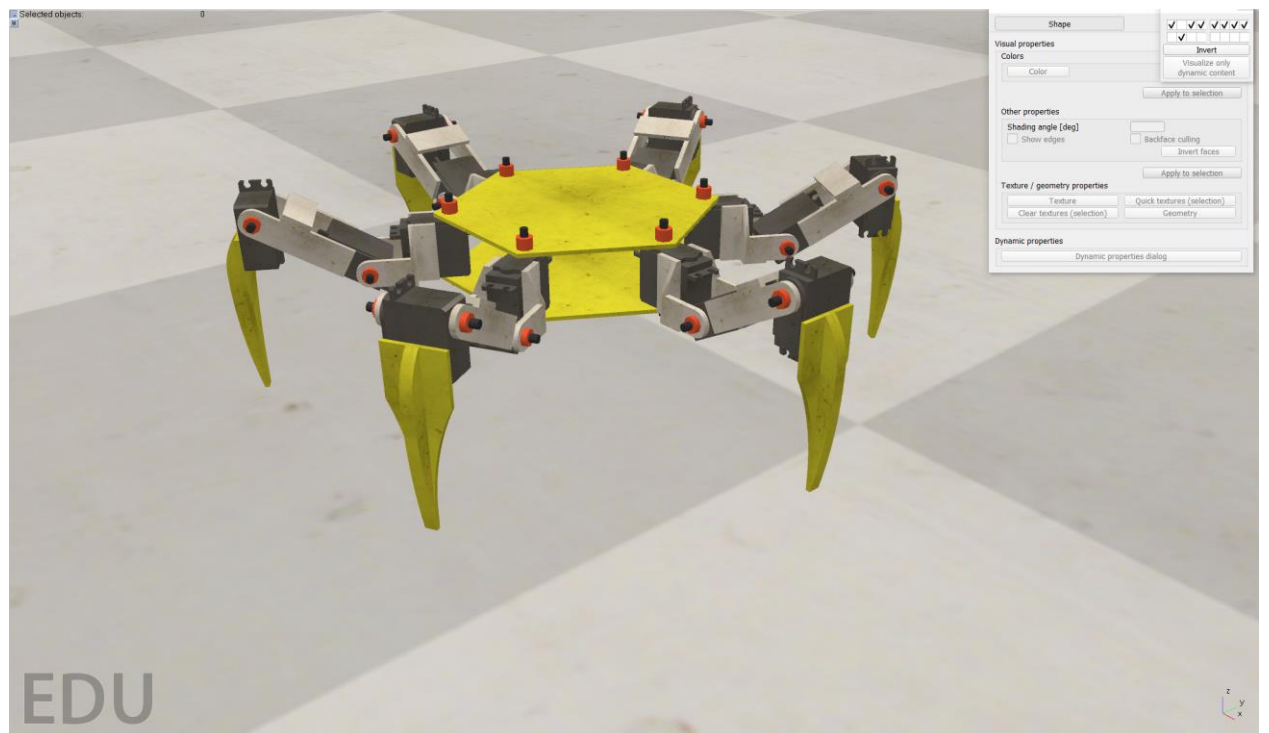


Рисунок 2.2 – Робот гексапод з виділеними суглобами в середовищі CoreliaSim

2.2 Дослідження кінематичних рівнянь гексапода

Для стабільної роботи робота гексаподу з можливістю реагувати на навколишнє середовище надзвичайно важливо використовувати рівняння кінематики для прорахування позиції кожної кінцівки. Теоретично можливо використовувати зарання прописані положення кожної кінцівки виконавши записи критичних положень, відпочинок, рух на пизицію вперед який складається з підймання та руху в нову точку, який буде працювати циклом зміни положення сервоприводу q_0 на певний кут аби направити ногу вперед, та двох сервоприводів для підймання вверх та спуску, але подібний підхід буде ненадійним при русі по не рівній поверхні або роботі з дешевими та неточними сервоприводами які нарощують помилки під час роботи, що нажаль стається дуже часто з китайськими сервоприводами, які будуть використовуватися в роботі гексаподі.

Саме кінематична модель визначає спосіб обчислення координат ніг та кутів повороту сервоприводів, необхідних для реалізації руху робота, найпростішим підходом буде використання рівняння кінематики для визначення позиції двухланкової кінцівки [24].

Кінематика роботизованих систем вивчає геометричні параметри руху без урахування сил, які спричиняють цей рух, тому визначення допустимих навантажень буде виконано при підборі елементів в наступних підрозділах. Для гексапода основною задачею є визначення положення кінцівок відносно корпусу та обчислення необхідних кутів повороту сервоприводів.

На рисунку 2.3 позначено положення суглобів та прямих якими вони керують, та більш детальний варіант розробленого мінімалістичного гексаподу наведено на рисунку 2.4.

На рисунку 2.4 відображено систему координат, вісь j_1 розташована внизу та обертається навколо осі Z , сервопривід j_2 обертається навколо осі X , а j_3 обертається у просторі відносно другого суглоба [25].

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

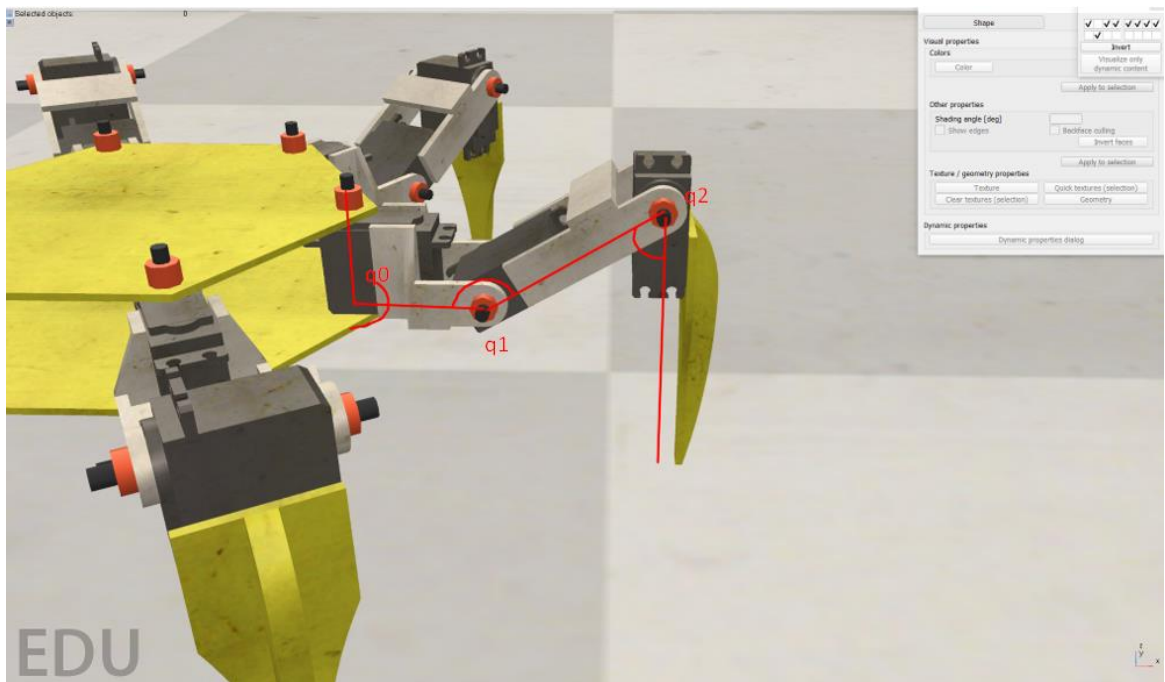


Рисунок 2.3 – Робот гексапод з виділеними суглобами та прямими в середовищі CopeliaSim

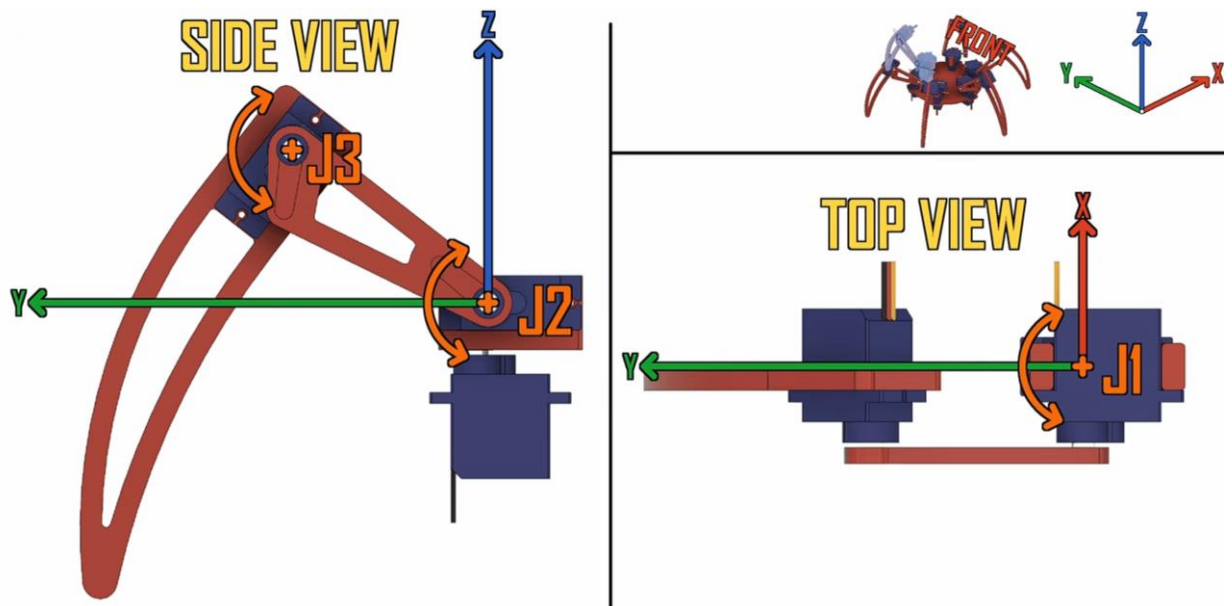


Рисунок 2.4 – Кінцівка гексаподу з виділеними суглобами та системами координат

Спочатку слід розглянути двовимірне розв'язання задачі зворотної кінематики для j_2 та j_3 при початковому положенні ноги, як показано на

					Арк.
					22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ

рисунку 2.5. Основною метою цього рівняння є керування положенням кінцевої точки ноги робота, тобто точки контакту ноги з поверхнею [26].

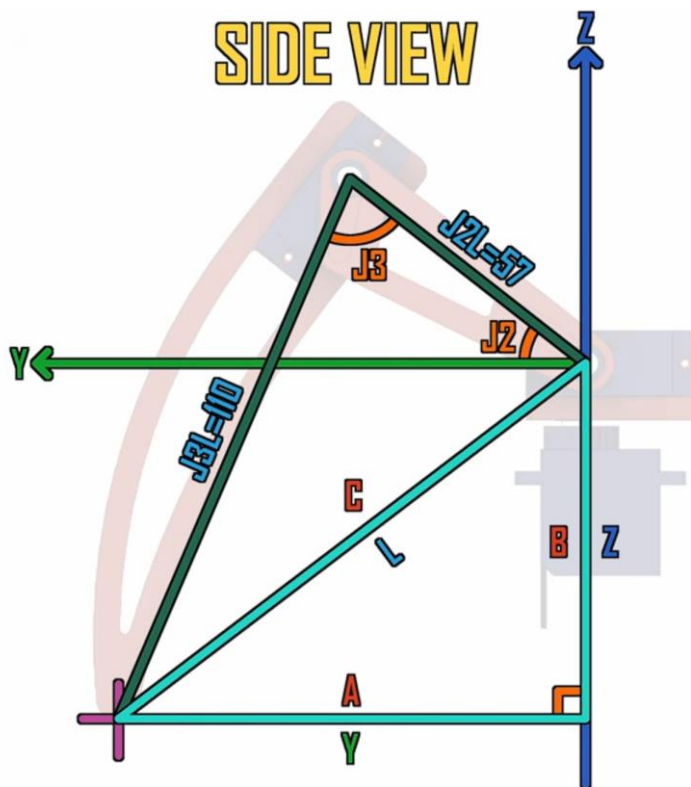


Рисунок 2.5 – Боковий вигляд кінцівки гексаподу з виділеними прямими для кінематичного рівняння

Для цього будується трикутник між центрами j_2 , j_3 та точкою, у якій необхідно розташувати кінець ноги. Інші сторони трикутника вже відомі, оскільки вони задаються координатами бажаного положення ноги по осях Y та Z . При цьому вісь Y перпендикулярна осі Z .

Для розв'язання кінематичного рівняння необхідно визначити:

- кут j_2 відносно осі Y ;
- кут j_3 відносно j_2 .

З розробленого креслення відомо, що довжина сегмента j_2 становить 57 мм, це значення позначається як j_2L . Довжина сегмента j_3 становить 110 мм, це значення позначається як j_3L .

Також необхідно обчислити довжину третьої сторони трикутника, яку позначено як L .

У процесі розрахунку кінематики ноги гексапода використовується система геометричних та тригонометричних рівнянь, які дозволяють визначити кути повороту сервоприводів для досягнення заданого положення кінцівки у просторі. Довжина L дорівнює довжині C та визначається за допомогою теореми Піфагора формула 1.

$$C^2 = A^2 + B^2 = L^2 = Y^2 + Z^2 \quad (1)$$

де

Y - горизонтальне зміщення ноги;

Z - вертикальне зміщення ноги;

L - відстань до кінцевої точки ноги.

Після цього визначається довжина сторони L :

$$L = \sqrt{Y^2 + Z^2}$$

Наступним етапом є обчислення кута сервопривода $j3$, використовується теорема косинусів, формула 2 [27].

$$j3 = \arccos\left(\frac{j2L^2 + j3L^2 - L^2}{2*j2L*j3L}\right) \quad (2)$$

де

$j2L$ - довжина верхнього сегмента ноги;

$j3L$ - довжина нижнього сегмента ноги;

L - відстань до кінцевої точки ноги;

$j3$ - кут третього сервопривода.

Далі визначається допоміжний кут B за формулою 3 [28].

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B = \arccos\left(\frac{L^2 + j2L^2 - j3L^2}{2 * L + j2L}\right) \quad (3)$$

Кут B використовується для визначення положення другого сервопривода відносно лінії L.

Для визначення нахилу ноги відносно осі Y використовується тангенс кута A:

$$\tan(A) = Z/Y$$

Після цього обчислюється сам кут A:

$$A = \arctan\left(\frac{Z}{Y}\right)$$

Кут A характеризує нахил прямої L відносно горизонтальної осі. Остаточний кут другого сервопривода визначається як різниця між кутами B та A:

$$j2 = B - A$$

Таким чином, кут j2 визначає необхідний поворот другого сегмента ноги для досягнення заданого положення кінцівки. У сукупності наведені рівняння формують систему зворотної кінематики ноги гексапода та дозволяють обчислювати кути повороту сервоприводів для точного позиціонування ноги.

Для роботи було виконано моделювання системи робота гексаподу в застосунку Fusion360, рисунок 2.6, побудована модель враховує роз'єми для сервоприводів та для болтів аби їх закріпити, також модель поділена на чотири частини, основа до якої кріпиться сервопривід 0, соха(кокса) рисунок 2.7 відповідає за поворот ноги відносно корпусу, кріпиться до сервоприводу 0,

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до якого кріпиться сервопривід 1, femur (фемур) рисунок 2.8 кріпиться до сервоприводу 1, до якого кріпиться сервопривід 2 та tibia рисунок 2.9 кріпиться до сервоприводу 2.

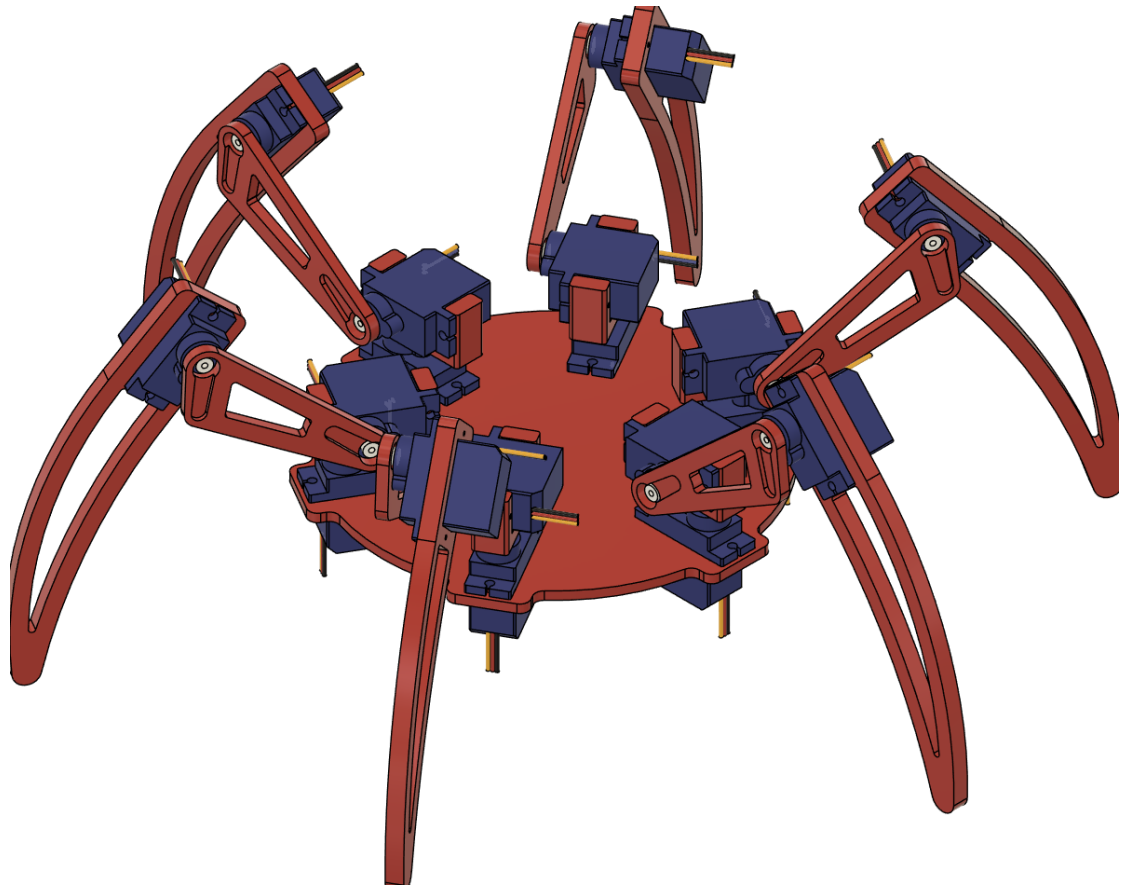


Рисунок 2.6 – Робот гексапод розроблений в застосуноку Fusion360

Таким чином користувач друкує одну основу, до якої будуть кріпитися кінцівки, її розташування на друкуючій поверхні не ї важливим, та по шість елементів які додані та з яких будуть складатися кінцівки, при їх друці важливо не змінювати їх розташування через навантаження яке буде діяти при русі, дозволяючи мінімізувати вагу файлу та швидко вносити зміни в загальну модель без необхідності модифікувати усю систему [29-33].

У загальному вага кінцівок складе 120 грамів пластику PETG, а основа в залежності від змін буде важити від 40 до 20 грамів, якщо додати отвори в не критичних точках.

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Через що вага сохи складає лише два грами, але при друці доводиться витратити додаткові два грами на підтримки які викинуться після завершення друку, що створить додаткові дванадцять грамів відходів, не враховуючи втрат на калібрування потоку.

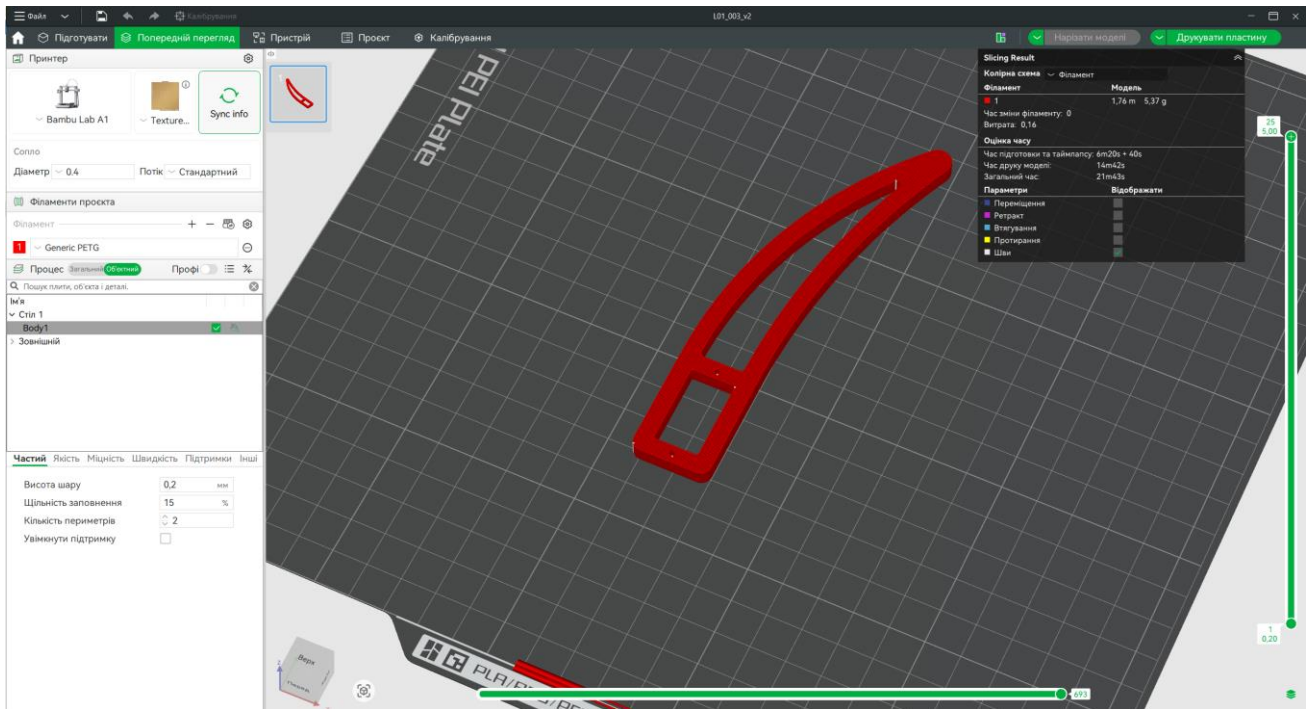


Рисунок 2.9 – Розроблена тibia в застосунок для друку BambuLab

2.3 Вибір компонентів робототехнічної системи

Вибір компонентів є одним із найскладніших етапів проектування робототехнічної системи. Саме від характеристик електронних та механічних елементів залежить стабільність роботи гексапода, його швидкодія, точність руху та надійність функціонування.

Під час вибору компонентів враховувались такі критерії:

- продуктивність;
- сумісність;
- енергоспоживання;
- доступність;

- вартість;
- простота інтеграції.

Через велику кількість сервоприводів є два варіанти розробки, використання драйверів для зняття вимоги на кількість вільних пінів для контролю сервоприводів з контролера або використання мікроконтролера з більшою кількістю пінів. Для проекту було обрано використовувати Arduino Mega 2560, рисунок 2.10. Однією з головних причин вибору Arduino Mega є велика кількість цифрових входів-виходів, плата містить 54 цифрові порти, з яких 15 можуть працювати у режимі PWM, для гексапода це особливо важливо, оскільки робот має шість кінцівок, а кожна нога містить три сервоприводи.

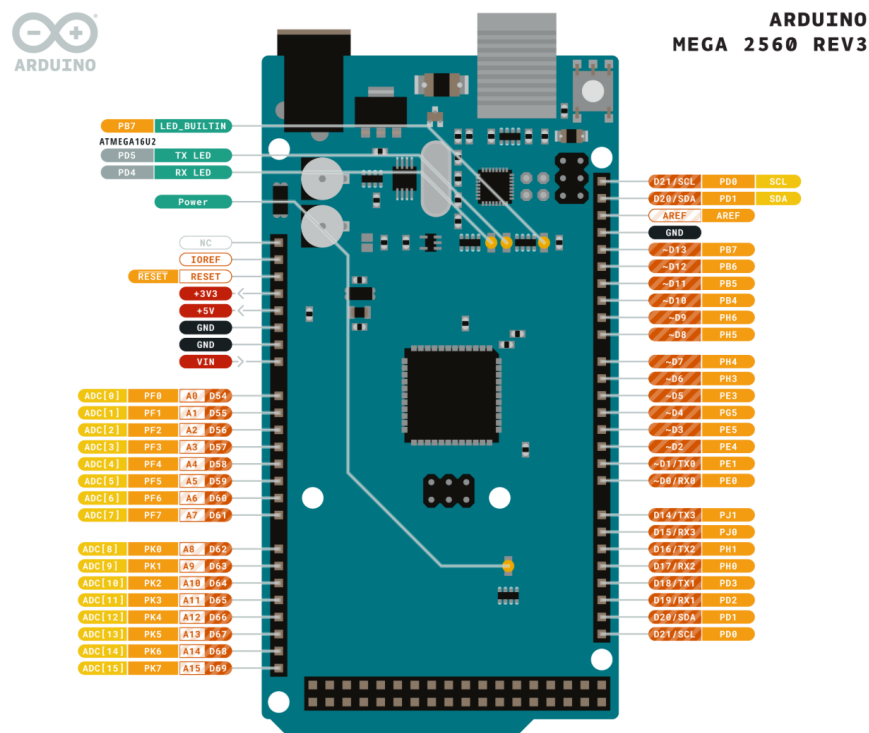


Рисунок 2.10 – Arduino Mega 2560

Таким чином, для керування гексаподом необхідно щонайменше 18 каналів керування сервоприводами, не враховуючи додаткові датчики та контроль живленням з Wi-Fi модулем. Використання стандартного для простих

мехатронних проєктів Arduino Uno у такому випадку є недостатнім через обмежену кількість портів та пам'яті.

При цьому один UART може використовуватись для програмування та відлагодження через Serial Monitor, а інші - для обміну даними між модулями.

Для роботизованого гексапода також важливим є обсяг оперативної пам'яті. Під час роботи система одночасно виконує:

- обчислення кінематики;
- генерацію траєкторій руху;
- обробку даних MPU6050;
- керування сервоприводами;
- передачу телеметрії.

Arduino Mega має 8 КБ SRAM, що у чотири рази більше, ніж Arduino Uno, це дозволяє зберігати великі масиви координат, таблиці траєкторій та параметри руху, крім цього, Arduino Mega працює на базі мікроконтролера ATmega2560, який має достатню продуктивність для реалізації алгоритмів зворотної кінематики.

Для реалізації поставлених задач необхідна значна кількість ресурсів мікроконтролера. Важливою перевагою Arduino Mega є також широка підтримка бібліотек та сумісність із більшістю модулів Arduino, для даного проєкту це дозволяє використовувати:

- MPU6050;
- PCA9685;
- ESP8266;
- сервоприводи;
- OLED-дисплеї;
- динаміки;
- датчики відстані.

										Арк.
										30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Ще одним фактором вибору є простота програмування. Arduino Mega підтримується середовищем Arduino IDE, що значно спрощує розробку та тестування програмного забезпечення.

У якості сервоприводу було обрано SG90 – рисунок 2.11 через його дешевизну та простоту, також потенційно їх можна модифікувати аби вони повертали зворотнім сигналом положення сервоприводу, нажаль без цієї модифікації робот не зможе знати точно в якій позиції перебуває кінцівка, але теоретично контролер буде передавати сервоприводу позицію в яку він повинен перейти і як результат сервопривід може бути лише в позиції яку йому передає контролер [34].



Рисунок 2.11 – Сервопривід SG90

Якщо з'явиться можливість бажано замінити сервоприводи на MG996R, рисунок 2.12, оскільки його кут повороту 360 градусів (замість 180 у SG90) а зусилля на валу: 9,4 кг/см (замість 2 кг/см у SG90), таким чином можна збільшити вагу яку здатна переносити система, тобто в 4.7 разів більша допустима вага. Теоретично система яка використовує сервоприводи SG90 здатна спокійно рухатися з навантаженням в 200 грамів, а при використанні потужніших MG996R допустима вага буде складати 940 грамів.

За наявності для керування великою кількістю сервоприводів у гексаподі можна використовувати спеціалізований PWM-контролер PCA9685, рисунок

									Арк.
									31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Для визначення положення робота у просторі, вимірювання нахилу та стабілізації руху гексапода використовується модуль MPU6050 у якому використовується тривісний акселерометр та тривісний гіроскоп, рисунок 2.14, модуль передає дані мікроконтролеру через інтерфейс I2C та дозволяє реалізувати балансування і контроль положення корпусу [36,37].

Для бездротового зв'язку використовується Wi-Fi модуль із вбудованим мікроконтролером ESP8266, рисунок 2.15. Модуль дозволяє створювати Wi-Fi мережу, запускати web-сервер, передавати телеметрію та забезпечувати дистанційне керування роботом через браузер або мобільний пристрій.

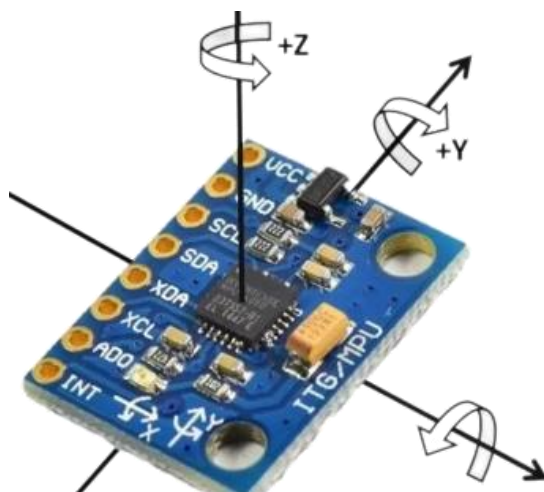


Рисунок 2.14 – Модуль MPU6050

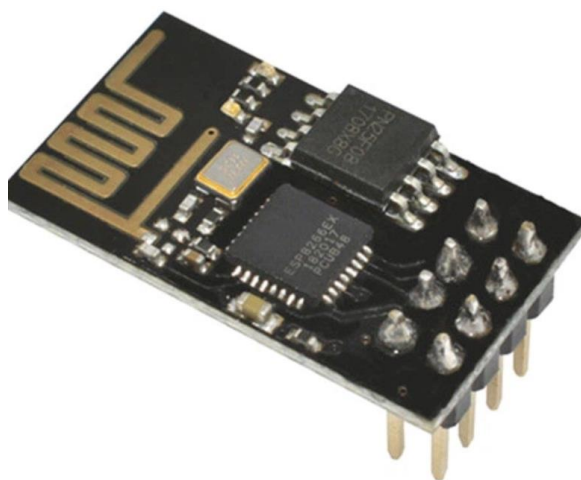


Рисунок 2.15 – Модуль ESP8266

Без використання зовнішнього PWM-контролера Arduino Mega повинна самостійно генерувати всі PWM-сигнали, що створює значне навантаження на мікроконтролер та може призводити до нестабільності роботи системи.

2.4 Розробка електричної принципової схеми

На рисунку 2.16 наведено електричну принципову схему підключення сервоприводів до мікроконтролера Arduino Uno за допомогою модуля керування сервоприводами PCA9685. Дана схема використовується для керування великою кількістю сервоприводів, оскільки при підключенні сервоприводів напругу до мікроконтролеру Arduino Uno навантаження на пінні перевищить допустиме для стабільної роботи, в наслідок чого можуть виникнути пошкодження контролеру або пінів, що є актуальним для багатонагних робототехнічних систем які не використовують драйвери, зокрема роботів-гексаподів як показано в даній роботі [38-41].

Основним елементом системи керування є плата Arduino Uno, яка виконує обчислення та формує команди керування для сервоприводів, оскільки мікроконтролер має обмежену кількість апаратних PWM-виходів та потужність яку вони здатні видати, для керування декількома сервоприводами одночасно використовується спеціалізований модуль PCA9685, таким чином можна уникнути використання шістнадцяти пінів для контролю сервоприводами.

Зв'язок між Arduino Uno та модулем PCA9685 здійснюється за допомогою інтерфейсу I2C, для цього контакт SDA мікроконтролера підключається до контакту SDA модуля, а контакт SCL - до відповідного контакту SCL. Також між пристроями з'єднуються лінії живлення VCC та загальний провід GND.

Модуль PCA9685 забезпечує формування до 16 незалежних PWM-сигналів, що дозволяє керувати великою кількістю сервоприводів без значного навантаження на мікроконтролер, але два сервоприводи доведеться під'єднати до плати Arduino. У схемі до виходів модуля підключено вісім сервоприводів

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						34
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Використання живлення безпосередньо від плати Arduino може призвести до нестабільної роботи мікроконтролера, просідання напруги або його перезавантаження.

Особливу увагу необхідно приділяти об'єднанню загальних проводів усіх елементів системи, загальний провід джерела живлення модуля PCA9685 та плати Arduino UNO повинен бути з'єднаний між собою, це забезпечує коректну передачу керуючих сигналів між пристроями та стабільну роботу всієї системи керування без ускладнень схеми.

Запропонована схема дозволяє реалізувати централізоване керування великою кількістю сервоприводів та може використовуватися як основа для побудови системи керування роботом-гексаподом. Використання модуля PCA9685 спрощує програмну реалізацію керування кінцівками робота, зменшує навантаження на мікроконтролер та забезпечує можливість подальшого розширення системи шляхом підключення додаткових сервоприводів.

Альтернативним варіантом керування сервоприводами є використання спеціалізованого контролера Pololu Maestro, схему такого підключення наведено на рисунку 2.17. На відміну від попереднього рішення, де формування PWM-сигналів здійснювалося модулем PCA9685 через інтерфейс I2C, у даній схемі керування сервоприводами виконується за допомогою контролера Pololu Maestro 24, який призначений для роботи з великою кількістю сервоприводів та забезпечує їх незалежне керування, його можна порівняти з модифікованими версіями Arduino призначеними для роботи з великою кількістю сервоприводів, але подібні системи все рівно мають велику кількість обмежень накладених мікроконтролером Arduino.

Основним керуючим елементом системи залишається мікроконтролер Arduino Mega, який виконує обробку даних від сенсорів, формування команд керування та обмін інформацією з периферійними пристроями, передача команд на контролер Pololu Maestro здійснюється через послідовний інтерфейс UART за допомогою ліній TX та RX, такий спосіб зв'язку дозволяє передавати

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36

Вихід подільника підключається до аналогового входу Arduino Mega, що дозволяє вимірювати напругу акумулятора та контролювати рівень його розряду програмними засобами.

Для реалізації бездротового керування та передачі телеметричної інформації використовується модуль Bluetooth HC-05, зв'язок між Arduino Mega та модулем HC-05 також здійснюється через послідовний інтерфейс UART, оскільки логічний рівень сигналів Bluetooth-модуля становить 3,3 В, а стандартний для обраного мікроконтролера є 5В, для захисту його входу застосовано додатковий подільник напруги на резисторах 1 кОм та 2 кОм, який знижує рівень сигналу з виходу мікроконтролера до допустимого значення [42].

Безпосереднє підключення сервоприводів виконується до виходів контролера Pololu Maestro, кожен сервопривід отримує сигнальний імпульс від окремого каналу контролера, що дозволяє незалежно керувати великою кількістю ступенів свободи робота. Для гексапода з 18 сервоприводами використання Pololu Maestro є доцільним, оскільки один контролер може забезпечувати одночасне керування всіма приводами та виконувати плавну синхронізацію їх рухів [43].

Перевагою даного підходу є зменшення навантаження на мікроконтролер, висока точність формування PWM-сигналів та можливість керування великою кількістю сервоприводів через один спеціалізований модуль. Крім того, контролер Pololu Maestro підтримує апаратну інтерполяцію рухів, що дозволяє реалізовувати плавне переміщення кінцівок робота без додаткових обчислень з боку Arduino.

Найбільшим недоліком використання Pololu Maestro є його ціна яка в двадцять разів перевищує ціну стандартного PCA9685, але надає стабільність та більше функцій для розвантаження мікроконтролеру.

Таким чином, використання контролера Pololu Maestro у поєднанні з Arduino Mega забезпечує більш гнучке та масштабоване рішення для керування

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

сервоприводами робота гексаподу порівняно з традиційними схемами, що базуються виключно на мікроконтролері або PWM-розширювачах.

2.5 Висновки до другого розділу

У даному розділі виконано проєктування мехатронної системи робота-гексапода та визначено основні принципи її побудови. Розроблено структурну організацію роботизованої системи, яка включає механічну підсистему, систему приводів, сенсорну підсистему, систему керування, живлення, бездротового зв'язку та програмного забезпечення. Для дослідження конструкції та взаємодії окремих елементів використано середовище моделювання CoppeliaSim, що дозволило сформувати загальну архітектуру робота та визначити розташування його кінематичних ланок.

У процесі дослідження кінематичної структури гексапода виконано аналіз будови кінцівки з трьома ступенями свободи та розроблено математичну модель зворотної кінематики. Отримані рівняння дозволяють визначати кути повороту сервоприводів на основі заданих координат кінцевої точки ноги, що є необхідною умовою для реалізації алгоритмів керування рухом та забезпечення стабільного пересування робота по поверхні. Використання кінематичної моделі дозволяє підвищити точність позиціонування кінцівок та забезпечити адаптацію до нерівностей опорної поверхні.

Для подальшої реалізації конструкції виконано тривимірне моделювання елементів гексапода у середовищі Fusion 360. Розроблено корпус та складові частини кінцівок, які враховують особливості монтажу сервоприводів і забезпечують можливість виготовлення деталей методом 3D-друку. Модульна структура конструкції спрощує складання, обслуговування та модернізацію роботизованої системи.

На основі аналізу технічних характеристик виконано вибір основних компонентів системи. Як центральний контролер обрано Arduino Mega 2560, що забезпечує достатню кількість входів-виходів, обсяг пам'яті та

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		39

продуктивність для реалізації алгоритмів керування гексаподом. Для реалізації приводів обрано сервоприводи SG90 як економічно доцільне рішення для прототипу, а також розглянуто можливість використання більш потужних сервоприводів MG996R у випадку необхідності збільшення вантажопідйомності робота. Для контролю просторового положення системи обрано модуль MPU6050, а для реалізації бездротового зв'язку - модуль ESP8266, хоча певні кастомні моделі можуть мати вбудований модуль зв'язку.

Окрему увагу приділено розробці електричної принципової схеми системи. Розглянуто два варіанти керування сервоприводами: із використанням PWM-контролера PCA9685 та спеціалізованого контролера Pololu Maestro. Проведений аналіз показав, що обидва рішення дозволяють реалізувати керування великою кількістю сервоприводів, проте Pololu Maestro забезпечує вищу функціональність і точність керування, тоді як PCA9685 характеризується значно меншою вартістю та простотою інтеграції. Також визначено вимоги до системи живлення та проведено оцінку необхідного струму сервоприводів під час роботи.

Таким чином, у результаті виконання другого розділу сформовано повну мехатронну структуру робота-гексапода, розроблено його кінематичну модель, виконано підбір апаратних компонентів та створено електричну принципову схему. Отримані результати створюють необхідну технічну основу для подальшої реалізації алгоритмів керування, програмування руху та практичного виготовлення роботизованої системи.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Загальна структура програмного забезпечення гексапода

Другим за важливістю кроком при розробці робота гексапода є розробка програмного забезпечення, у випадку розроблюваного проекту, код буде виконуватися на базі Arduino. За вимогою до робота, поставленою в першому розділі, повинно виконуватися узгодження роботи електронних компонентів, обробку сигналу від користувача, стабілізацію руху (виконуючи розглянути в другому розділі формули кінематики) та взаємодію між окремими підсистемами робота [44].

У сучасних робототехнічних системах є стандартні вимоги які повинна виконувати програмна частина для безпечної та стабільної роботи, розроблена програма повинна аналізувати сигнали від сервоприводів та гіроскопів, та на їх основі формувати керуючі команди для забезпечення адаптації системи до змін зовнішнього середовища, а також стандартні функції для віддаленого керування та передачі інформації користувачу, та інші функції зображені на рисунку 3.1. Для гексапода особливо важливо забезпечити швидку роботу програми, оскільки шестиногий робот має значну кількість ступенів свободи і потребує синхронізованого керування трьома сервоприводами на одну кінцівку, яких в нашому випадку буде шість, отже вісімнадцять сервоприводів для одного гексапода, які повинні працювати синхронно.

Головною перевагою програмування гексапода є можливість синхронізувати дві кінцівки під час руху, відповідно до логіки керування розглянутій в розділі два, таким чином під час роботи гексаподу по прямій лінії на рівній поверхні ми можемо поділити кінцівки на три групи:

- зафіксовані кінцівки які не використовуються для руху (три кінцівки);
- дві рухомі кінцівки з сторони 1;
- одна рухома кінцівка з сторони 2.

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

У результаті руху буде виконуватися почергова зміна позиції кінцівок та заміни сторони 2 на сторону 1, але при русі по рівній горизонтальній поверхні можна виконати поділ кінцівок гексаподу на `idle`, `move_side_one_leg`, `move_side_two_legs`.

Функція	Опис
 Генерація алгоритмів ходи	Створення кроків для руху
 Обробка команд дистанційного керування	Прийняття інструкцій від оператора
 Керування сервоприводами	Контроль рухів суглобів
 Стабілізація положення корпусу	Підтримання рівноваги робота
 Передача телеметричних даних	Надсилання інформації про стан
 Передача відеопотоку	Надсилання зображення з камери
 Обробка сенсорної інформації	Аналіз даних від датчиків
 Реалізація автономних режимів роботи	Самостійне виконання завдань

Рисунок 3.1 - Основні функції програмного забезпечення гексапода

Для розробки програмного забезпечення буде використовуватися середовище Arduino IDE, та стандартна для нього мова програмування C/C++, яка має усі необхідні бібліотеки для забезпечення інтеграції елементів.

Можлива реалізація керування через MicroPython для прошивки Arduino не створюючи додаткових затримок, або використання Python для зв'язку з сервером або звичайним комп'ютером на якому буде виконуватися керування, ці варіанти більш прості та дозволять швидше написати програму керування, але вони створять затримки через необхідність контролера зв'язатися з комп'ютером отримати від нього відповіді, потім виконати команду над сервоприводами, а також використання нестандартних для мікроконтролеру мов програмування збільшать шанс помилок при роботі з регістрами мікроконтролера. Хоча використання Python дозволить уникнути обмежень до розміру коду, воно понесе за собою багато негативних ефектів які можуть критично зашкодити роботі готової системи [45].

3.2 Архітектура програмного забезпечення

Архітектура програмного забезпечення гексапода визначає структуру взаємодії між окремими програмними модулями, алгоритмами керування та апаратними компонентами системи. Від якості та правильності складання архітектури залежить стабільність роботи робота гексаподу, швидкодія системи, яка є критичною для систем робототехніки, можливість масштабування та подальшої модернізації програмного забезпечення враховуючи модульність зібраного пристрою [46].

Загальна архітектура програмної системи гексаподу зображена на рисунку 3.2. Центральним елементом системи є головний контролер, у розробленій системі - це Arduino Mega, саме цей модуль координує роботу всіх програмних компонентів та забезпечує обмін даними між ними та користувачем, враховуючи можливість виконання заданих режимів роботи та систем захисту від помилок.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						43
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

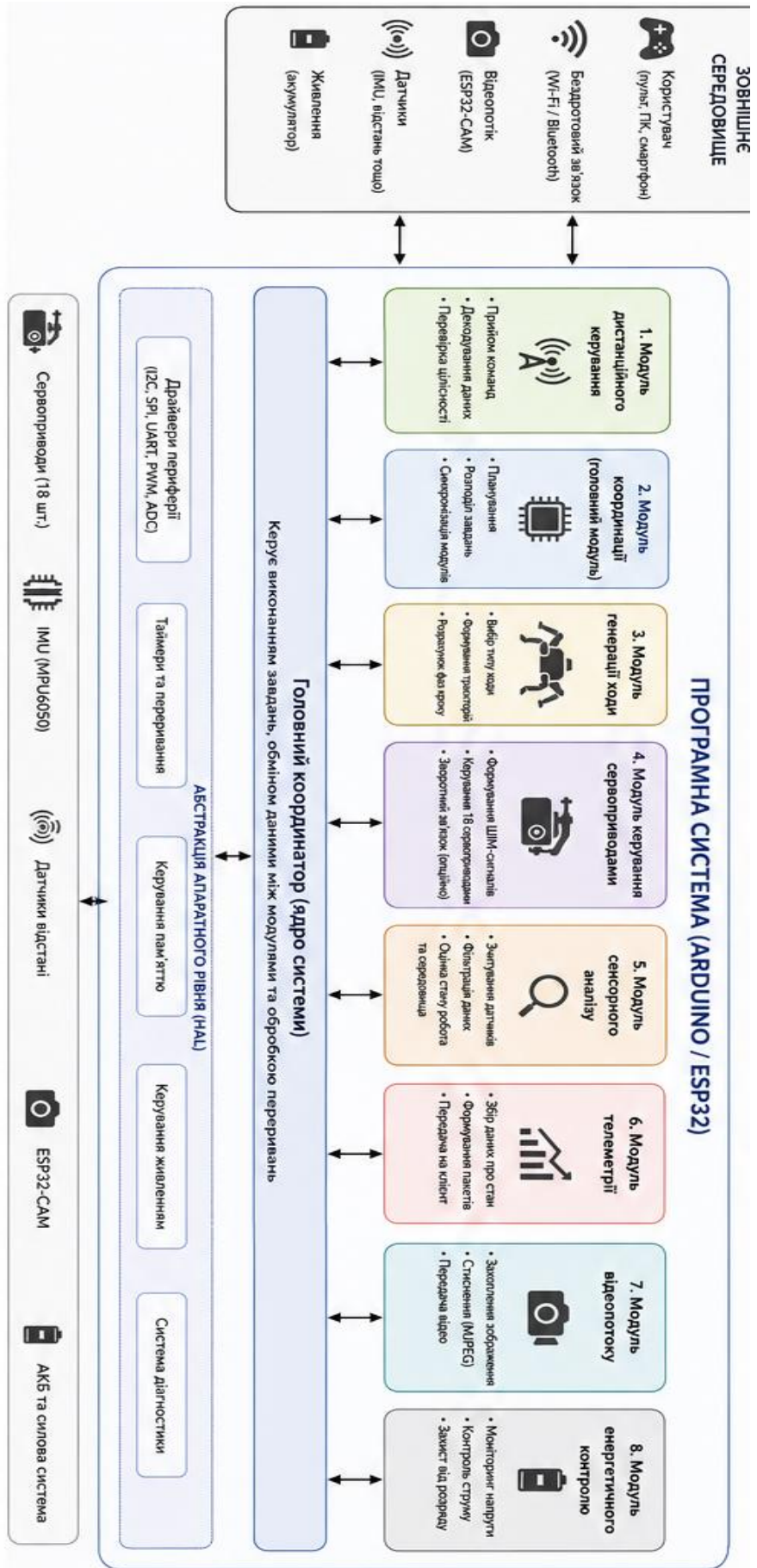


Рисунок 3.2 – Загальна архітектура програмної системи гексаподу

Архітектура програмного забезпечення побудована таким чином, щоб кожен функціональний модуль працював незалежно, але взаємодівав із іншими модулями через спільні інтерфейси передачі даних. Такий модульний підхід забезпечує гнучкість системи дозволяючи легко додавати нові функції без суттєвої зміни основного програмного коду, що в свою чергу ідеально підходить для розглянутого завдання з можливістю імплементації додаткових елементів, таких як руки маніпулятори чи контейнери для переносу небезпечних об'єктів з підтримкою певних умов.

Як зображено на рисунку 3.2, система буде мати сім умовних програмних модулів, які можна буде змінити або до яких можна буде інтегрувати інші.

Модуль дистанційного керування - забезпечує дистанційне керування роботом через Wi-Fi або Bluetooth, у розглянутій системі буде використовуватися Wi-Fi модуль та налаштовано використання API. Через цей модуль оператор здатен задавати напрямок руху, швидкість, режим роботи та отримувати телеметричні дані.

Модуль координації відповідає за запуск та вибір команд керування сервоприводами, він отримує дані від модуля генерації ходи та перетворює координати руху ніг у конкретні кути повороту сервоприводів виконуючи стандартні кінематичні розрахунки.

Модуль генерації ходи реалізує алгоритми пересування гексапода. Саме цей модуль визначає послідовність руху ніг, тип ходи, швидкість переміщення та параметри траєкторії. Для забезпечення стабільного руху використовуються стандартні алгоритми для систем з шістьма кінцівками - tripod gait(тринога хода) та wave gait(хвилеподібна хода).

Для передачі відео використовується модуль відеопотоку, побудований на базі ESP32-CAM. Використання обраного модуля дозволяє забезпечувати передачу відеопотоку через Wi-Fi у режимі реального часу. Його використання дозволяє зменшити навантаження на основний контролер.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						45
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Важливою складовою архітектури є модуль контролю батареї/живлення, який контролює параметри живлення системи. Він виконує моніторинг напруги акумулятора, струму споживання та температури елементів. Подібний модуль необхідний, оскільки при використанні розрядженої батареї її вольтаж може упасти нижче точки пошкодження або небезпечної для використання, як результат це скоротить термін життя акумуляторів і створить додаткові витрати, для такого випадку розроблений модуль буде автоматично переводити систему роботи у безпечний режим, вимикаючи його або максимально знижуючи навантаження шляхом відключення певних модулів.

Модуль телеметрії відповідає за збір даних роботи в один файл та передачу інформації користувачу для подальшого опрацювання або збереження. До телеметрії належать:

- рівень заряду акумулятора;
- швидкість руху робота гексапода;
- режим роботи;
- положення корпусу;
- положення нульових сервоприводів;
- наявність помилок;
- стан зв'язку.

Для забезпечення стабільної роботи системи архітектура програмного забезпечення робота гексаподу повинна підтримувати роботу в реальному часі, отже всі критично важливі задачі повинні виконуватись із мінімальними затримками. Особливо критично це для керування сервоприводами та стабілізації положення робота, оскільки затримка може призвести до перекидання робота гексаподу що в свою чергу до пошкодження кінцівок або сервоприводів чи кабелів.

Програмне забезпечення з обраною архітектурою для гексапода є модульною системою, яка забезпечує взаємодію між усіма компонентами робота з мінімальними затримками та потенційними можливостями

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		46

відімкнення функціоналу, а також дозволяє реалізувати керування рухом, дистанційний зв'язок, обробку даних сенсорів і автономну роботу наземного роботизованого комплексу.

3.3 Логічна схема взаємодії модулів програмного забезпечення

Логічна схема взаємодії модулів програмного забезпечення робота гексаподу визначає порядок обміну даними між окремими компонентами програмного забезпечення та описує принцип координації роботи системи в цілому зображена на рисунку 3.3. Якісна організація взаємодії між модулями дозволяє забезпечити стабільне функціонування робота, швидке реагування на команди користувача та ефективну обробку даних у режимі реального часу, що особливо важливо у розглянутій системі.

За розробленою схемою у програмному забезпеченні гексапода кожен модуль виконує окрему функцію для легкої заміни та масштабування, однак усі модулі працюють як єдина система та взаємодіють хоча б з одним іншим модулем. Передача інформації між ними здійснюється через внутрішні програмні інтерфейси та змінні стану.

Основними модулями логічної структури програмного забезпечення робота гексаподу на базі контролера Arduino є:

- модуль дистанційного керування;
- модуль координації;
- модуль генерації ходи;
- модуль сенсорного аналізу;
- модуль керування сервоприводами;
- модуль телеметрії;
- модуль відеопотоку;

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Центральним елементом системи є модуль координації, який виконує роль головного керуючого ядра. Саме він забезпечує синхронізацію роботи інших програмних компонентів та приймає рішення щодо подальших дій.

Робота системи керування роботу гексаподу починається з отримання команд від користувача через бездротовий канал зв'язку, оскільки це налаштована система при огляді логіки та порядку зв'язку буде ігноруватися приєднання та налаштування модуля зв'язку, оскільки він повинен бути налаштований програмно до запуску системи для перевірки та не вплине на цикл роботи. Після отримання команди передаються до модуля координації, який аналізує отримані дані та визначає необхідний режим роботи. Наступним кроком модуль генерації ходи формує траєкторії руху ніг робота відповідно до обраного режиму пересування. Обчислені координати передаються до модуля керування сервоприводами, який генерує ШІМ-сигнали для сервоприводів.

Модуль сенсорного аналізу здійснює постійне опитування датчиків, і отримані дані використовуються для виконання усіх дій пов'язаних з положенням в просторі, стабілізації, локації інших об'єктів в просторі та побудови мапи приміщення.

Під час руху робота модулі взаємодіють між собою постійним циклом зображеним на рисунку 3.4. На першому кроці система отримує команди через бездротову мережу, Wi-Fi, система перевіряє наявність нових даних у каналі зв'язку. Система побудована на безупинному пінгуванні зажатої кнопки, якщо користувач натиснув кнопку руху вперед, система керування буде отримувати сигнал вперед до моменту віджимання кнопки користувачем, таким чином можна буде уникнути потенційного зависання мережі, оскільки щойно користувач від'єднається чи перемкнеться гексапод втратить команду. Якщо користувач надсилає команду, мікроконтролер приймає її та зберігає для подальшої обробки, очікуючи на нову команду та очищуючи бібліотеку команд якщо нова не буде поступати одну десятю секунди.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

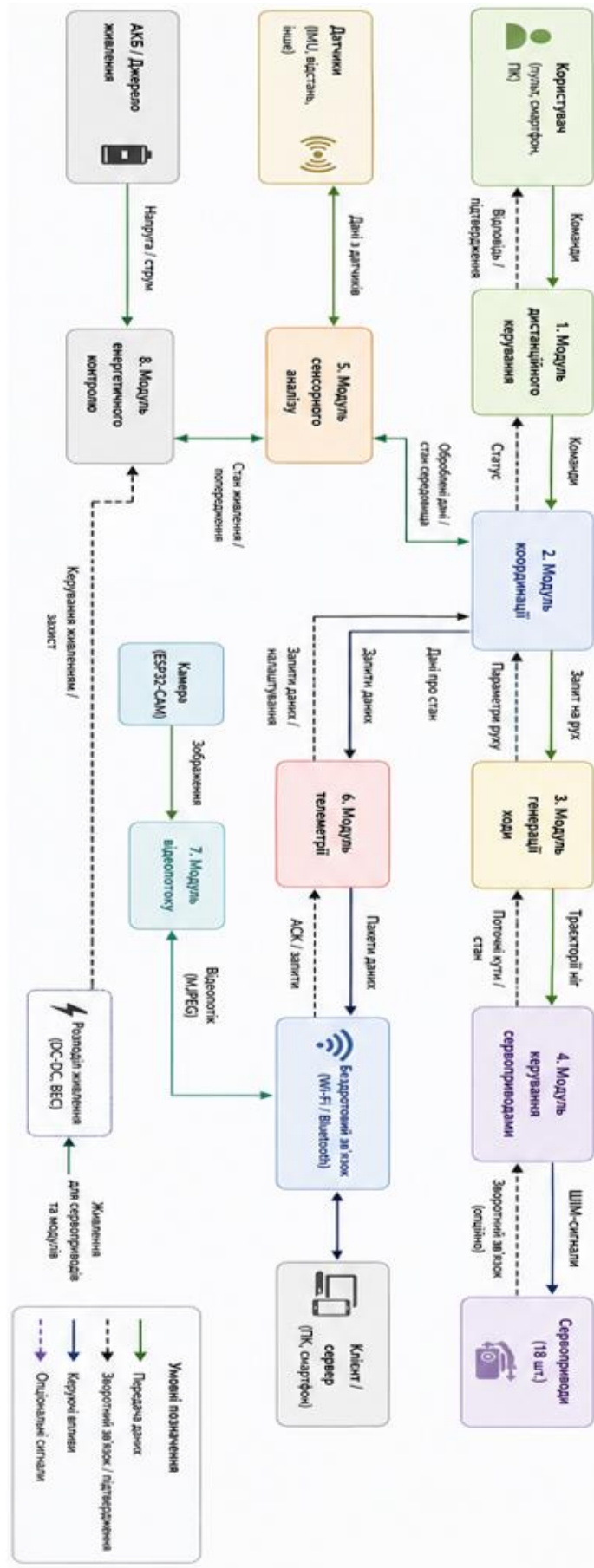


Рисунок 3.3 – Логічна схема взаємодії модулів робота гексаподу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Прикладом команд стандартний для команд керування: рух вперед; рух назад; поворот вліво; поворот вправо; рух вліво; рух вправо; регулювання швидкості; вибір режиму руху; зупинка.



Рисунок 3.4 - Загальна схема циклу руху гексаподу

Після прийому команди користувача система переходить до опитування датчиків, аналізу інформації з датчиків та наступним кроком проводить аналіз усіх отриманих даних, як з датчиків так і від користувача та збережених програмою. На цьому кроці система повинна визначити:

- поточне положення корпусу;
- швидкість руху;

- наявність перешкод;
- рівень нахилу;
- стабільність положення;
- стан кінцівок;
- режим роботи.

Отримані дані порівнюються з допустимими значеннями, що є критичним для усіх робототехнічних систем, оскільки розроблена система має елементи з механічними обмеженнями, для прикладу програма повинна зреагувати якщо сервоприводи які здатні рухатися від нуля до 180 градусів раптом надішлють значення більші за їх межу, або якщо нульові сервоприводи які відповідають за рух по осі x вийдуть за обмеження яке створює корпус, тобто від нуля до сорока градусів, це буде свідчити про таке саме пошкодження або помилкові данні. У випадку якщо система виявляє критичне відхилення, можуть виконуватись коригувальні дії або в більшості випадків буде виконано відключення непрацюючої кінцівки, виставивши її в положення “Помилка”, як зображено на рисунку 3.5, нульовий сервопривід вирівнюється на середнє положення – двадцять градусів, перший сервопривід переходить в положення 180 а другий сервопривід в положення 180 для перенесення ваги потенційно пошкодженої кінцівки на корпус. Також розглядається можливість використати вмонтованих в захисну планку магнітів при друці ноги робота гексаподу для стабільної фіксації ноги в положенні “Поломка” до корпусу.

При активації режиму втрати кінцівки гексапод повинен перерахувати логіку руху враховуючи втрату кінцівки та намагатися перебалансувати себе переносячи більшу частину навантаження на три робочі кінцівки іншої сторони корпусу для уникнення перенавантаження двох робочих кінцівок, оскільки при втраті ще однієї кінцівки безпечний рух буде неможливим і роботу доведеться перейти в режим повзання.

Після обчислення кутів система формує координати для сигналу який подається на сервоприводи, використовуючи PWM-сигнали та будовані

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		51

таймери. Критично важливо здійснювати керування трьома кінцівками одночасно, оскільки затримка однієї ноги може призвести до втрати балансу чи перевантаження інших сервоприводів, для максимально точного та плавного переміщення буде використовуватися інтерполяція положення.

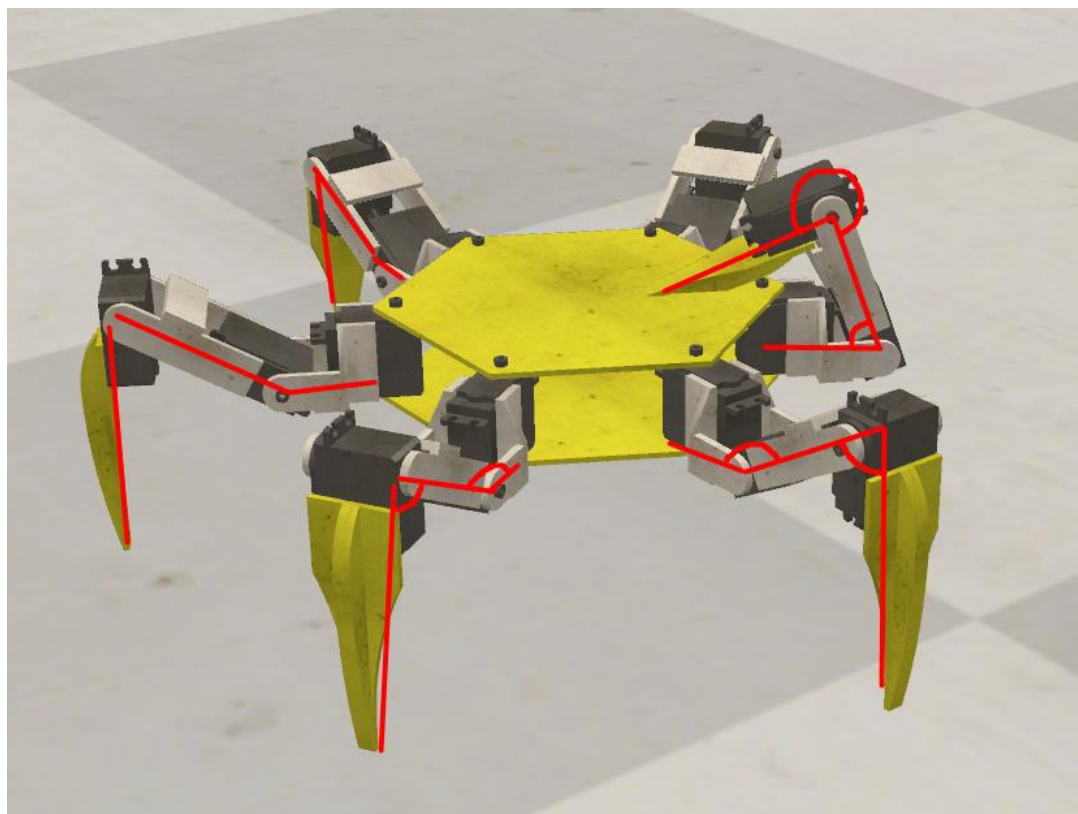


Рисунок 3.5 – Положення “Помилка” для п’ятої ноги

3.4 Реалізація бездротового зв’язку

Оскільки основним контролером гексапода у проєкті є Arduino Mega, реалізація бездротового зв’язку буде складнішою та необхідно враховувати особливості даної плати. На відміну від ESP32, Arduino Mega не має вбудованого Wi-Fi модуля, тому для реалізації дистанційного керування необхідно використовувати зовнішній модуль зв’язку.

Для системи керування гексаподом найбільш доцільним рішенням є використання Wi-Fi модуля ESP8266 як було пояснено в другому розділі.

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Arduino Mega виступає основним контролером, а ESP8266 працює як мережевий модуль, загальна схема взаємодії зображена на рисунку 3.6. Після підключення ESP8266 до Arduino бажано використовувати апаратний Serial1, оскільки плата має декілька UART-портів і бувають випадки некоректної роботи та помилок в ситуаціях коли перший порт залишався вільним а для з'єднання використовували наступні.

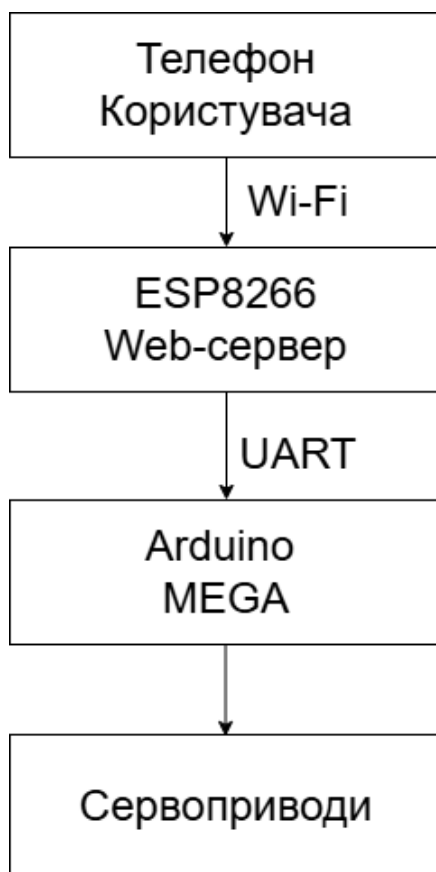


Рисунок 3.6 – Загальна схема взаємодії

Для початку передачі даних потрібно виконати ініціалізацію UART у програматорі:

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
```

```
Serial1.begin(115200);  
}
```

ESP8266 створює власну Wi-Fi мережу, до якої підключається користувач, для цього можна використовувати стандартні бібліотеки.

```
#include <ESP8266WiFi.h>  
const char* ssid = "HEXAPOD_ROBOT";  
const char* password = "123568121";  
  
void initWiFi()  
{  
  WiFi.mode(WIFI_AP);  
  WiFi.softAP(ssid, password);  
  Serial.println(  
    WiFi.softAPIP()  
  );  
}
```

Після запуску створиться Wi-Fi точка HEXAPOD_ROBOT з паролем 123568121 при підключенні до якої користувач під'єднається до локальної мережі.

Наступним кроком буде налагодження веб серверу, завдяки ESP8266 можна виконати запуск HTTP-серверу, який очікує команди від користувача. Використовуючи відкриту документацію для модуля ESP8266 можна знайти готові приклади для підймання серверу.

Для виконання завдання поставленого в плані роботи не обов'язково сильно змінювати стандартні параметри та змінювати протоколи безпеки, тому можливо запусити сервер використовуючи два рядки.

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

```
#include <ESP8266WebServer.h>
```

```
ESP8266WebServer server(80);
```

Створений сервер буде працювати на стандартному HTTP-порті 80.

Для спрощення керування використовується web-інтерфейс, який створюється на HTML та відкривається через браузер при під'єднанні до порту 80.

Web-інтерфейс реалізований у вигляді простого сайту зображеного на рисунку 3.7, який складається з основного файлу Index.html та style.css. Який отримує змінні з контролеру та отримує змінні від користувача передаючи команди натискаючи на кнопки.

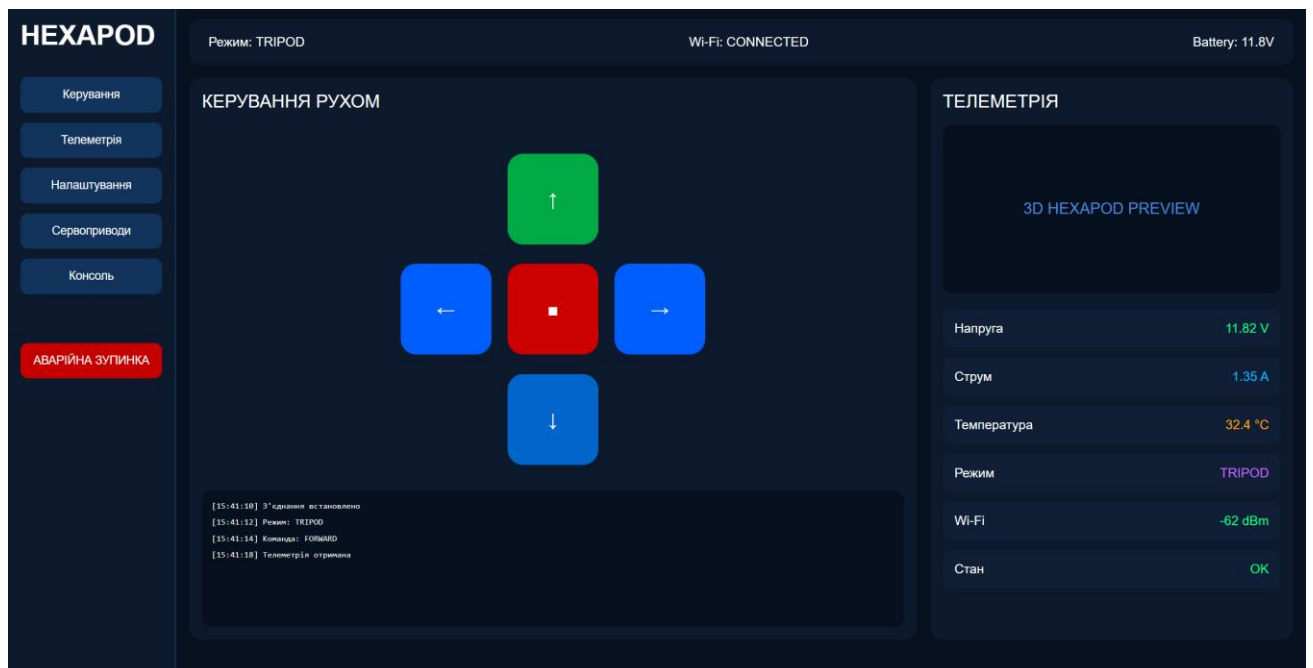


Рисунок 3.7 – Index.html сайт HEXAPOD

На сайті присутні необхідні команди для мінімальної роботоздатності системи з можливістю замінити та легко переробити дизайн через простоту застосунок, головні команди – ділянки сайту:

– рух який представляється кнопками з стрілочками: вперед вліво вправо назад та центральна червона відповідальна за повну зупинку;

- кнопка аварійної зупинки;
- кнопки з довідкою розташовані зліва вище кнопки аварійної зупинки;
- справа в зоні “3d-Нexarod preview” буде відображатися зображення з камери з можливістю перемкнутися на 3д модель гексаподу за необхідності;
- в полі телеметрія відображаються основні параметри, такі як напруга, струм, температура, режим роботи, швидкість Wi-Fi та стан системи;
- в центрі знизу розташована консоль яка видає інформацію про роботу та стан програми.

Arduino Mega постійно перевіряє UART-порт на наявність нових даних, спрощений цикл опитування гіроскопу наведено далі.

```
#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>
MPU6050 mpu;
float pitch = 0;
void setup()
{
  Serial.begin(115200)
  Serial1.begin(115200);
  Wire.begin();
  mpu.initialize();
}
void loop()
{
  int16_t ax, ay, az;
  mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
  pitch = atan2(ax, az) * 57.3;
  Serial1.print("PITCH:");
```

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						56
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

```
Serial1.println(pitch);
```

```
delay(100);
```

```
}
```

Система Arduino Mega ініціалізує інтерфейс I2C для зв'язку з модулем MPU6050 та запускає послідовний UART-порт Serial1 (у випадку підключення через Serial1) для передачі даних до ESP8266. Наступним кроком у циклі програми виконується постійне зчитування даних акселерометра, оскільки він безупинно надсилає інформацію якщо його заживити.

Гіроскоп MPU6050 містить акселерометр та гіроскоп. У наведеному спрощеному прикладі коду використовується акселерометр приєднаний до Arduino Mega, який вимірює прискорення по трьох осях X, Y та Z. Після отримання значень мікроконтролер обчислює кут нахилу корпусу відносно горизонтальної площини (залежно від встановлення модулю) для визначення чи гексапод не перевертається.

Для визначення кута використовується функція arctangent, після обчислення кута Arduino Mega видає текстовий рядок PITCH(нахил або схил) та вставляє значення отримане при обрахунку параметрів гіроскопу.

Після визначення кута - значення нахилу передається через UART на ESP8266 який у якості проміжного мережевого модуля створить сайт який було завантажено на контролер на стадії розробки, захостить сайт для локальної мережі та перешле на нього значення нахилу.

Одночасно ESP8266 постійно перевіряє UART-порт на наявність нових даних від Arduino Mega. Якщо надходить рядок із параметром PITCH який не відповідає попередньому значенню, модуль виділяє числове значення кута, зберігає його у змінній яка відобразиться на сайті.

Таким чином система реалізує повний цикл передачі даних:

- MPU6050 вимірює положення робота;

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Arduino Mega обчислює кут нахилу;
- дані передаються через UART;
- ESP8266 приймає інформацію;
- Web-сервер відображає значення у браузері.

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було розглянуто програмну реалізацію роботизованого гексапода на базі Arduino Mega 2560 та виконано аналіз основних принципів побудови програмного забезпечення роботи технічної системи.

Під час розробки програмної частини було визначено основні вимоги до системи керування, серед яких особливу увагу приділено швидкодії, стабільності роботи, можливості роботи в режимі реального часу та модульності програмного забезпечення. Враховуючи значну кількість ступенів свободи гексапода та необхідність одночасного керування вісімнадцятьма сервоприводами, було обґрунтовано використання мови програмування C/C++ у середовищі Arduino IDE як найбільш ефективне рішення для реалізації системи керування роботом гексаподом.

У ході роботи була сформована архітектура програмного забезпечення, яка базується на модульному принципі побудови системи. Запропонована структура дозволяє розділити програму на незалежні компоненти, що забезпечує зручність масштабування, модернізації та подальшого налагодження системи. Було виділено основні модулі програмного забезпечення, серед яких модулі дистанційного керування, координації руху, генерації ходи, сенсорного аналізу, керування сервоприводами, телеметрії, відеопотоку та контролю живлення.

Також детально розглянуто логічну схему взаємодії між програмними модулями. Проведений аналіз показав, що стандартна структура роботи

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		58

системи дозволяє забезпечити безперервне опитування сенсорів, аналіз стану робота, генерацію траєкторій руху та передачу команд на сервоприводи із мінімальними затримками. Особливу увагу приділено механізмам контролю помилок та захисту системи від аварійних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням або пошкодженням кінцівок робота гексапода.

Окремо було реалізовано систему бездротового зв'язку на базі ESP8266, яка забезпечує дистанційне керування гексаподом через Wi-Fi. Запропонований підхід дозволяє організувати web-інтерфейс керування без необхідності використання спеціалізованого програмного забезпечення на стороні користувача, а просто під'єднуючись до локальної мережі через Wi-Fi. Було розглянуто принцип передачі даних між Arduino Mega та ESP8266 через UART-інтерфейс, а також приклад передачі телеметричних даних (показників акселерометра) та параметрів гіроскопа на web-сторінку у режимі реального часу.

У результаті проведеної роботи сформовано повну структуру програмної системи гексапода, яка забезпечує стабільне керування рухом, взаємодію між модулями, дистанційний зв'язок, обробку сенсорної інформації та можливість подальшого розширення функціоналу гексаподу.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було розроблено мехатронну систему мобільного робота-гексапода та програмні засоби для його керування. Проведене дослідження охопило всі основні етапи створення роботизованої системи - від аналізу існуючих рішень і вибору конструкції до проектування апаратної частини, розробки програмного забезпечення та реалізації засобів дистанційного керування.

На основі аналізу сучасних мобільних роботів обґрунтовано вибір гексаподної платформи як найбільш доцільного рішення для роботи в умовах складного рельєфу та обмеженого простору. Встановлено, що використання шести кінцівок забезпечує високу стійкість, можливість адаптації до нерівних поверхонь та збереження працездатності навіть у випадку часткової відмови окремих елементів конструкції.

У ході роботи було розроблено конструкцію робота-гексапода та виконано моделювання його механічної частини. Проведено аналіз кінематичної структури кінцівок, розроблено математичну модель зворотної кінематики та визначено принципи формування рухів робота. Виконано підбір основних апаратних компонентів системи, зокрема мікроконтролера, сервоприводів, сенсорів, модулів зв'язку та елементів живлення. Також розроблено електричну принципову схему системи керування та розглянуто декілька варіантів реалізації підсистеми керування сервоприводами.

Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення робота. Сформовано модульну архітектуру системи керування, яка забезпечує незалежну роботу окремих програмних компонентів та спрощує подальшу модернізацію системи. Реалізовано логіку керування рухом гексапода, взаємодію між програмними модулями, механізми збору телеметричної інформації та засоби контролю технічного стану системи.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Для забезпечення дистанційного керування реалізовано бездротовий зв'язок із використанням модуля ESP8266. Запропоноване рішення дозволяє здійснювати керування роботом через локальну мережу Wi-Fi за допомогою веб-інтерфейсу без необхідності використання спеціалізованого програмного забезпечення на стороні оператора. Крім того, реалізовано передачу телеметричних даних у режимі реального часу, що дозволяє контролювати основні параметри роботи роботизованої системи.

Результати виконаної роботи підтверджують можливість створення функціонального мобільного робота-гексапода на базі доступних апаратних компонентів та відкритих програмних платформ. Розроблені технічні рішення забезпечують стабільну роботу системи, можливість подальшого розширення її функціоналу та створюють основу для реалізації більш складних алгоритмів автономної навігації, комп'ютерного зору, побудови карт навколишнього середовища та інтелектуального керування.

Практична цінність роботи полягає у створенні комплексного проекту мобільного роботизованого комплексу, який може бути використаний як основа для подальших наукових досліджень, навчальних проектів або розробки спеціалізованих робототехнічних систем для моніторингу, інспекції та виконання завдань у важкодоступних або потенційно небезпечних умовах експлуатації.

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>61</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Corke P. Robotics, Vision and Control. Cham : Springer International Publishing, 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-06469-2> (дата звернення: 05.06.2026).
2. Mueller A. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control [Bookshelf]. *IEEE Control Systems*. 2019. Т. 39, № 6. С. 100–102. URL: <https://doi.org/10.1109/mcs.2019.2937265> (дата звернення: 05.06.2026).
3. Robot Analysis And Control Asada Slotine. *Apache2 Ubuntu Default Page: It works*. URL: <https://reviewbooku.com/review/robot-analysis-and-control-asada-slotine-4951969> (дата звернення: 04.06.2026).
4. Yeuseyenka I., Melnikau I., Yemelyanov I. Detection and Selection of Moving Objects in Video Images Based on Impulse and Recurrent Neural Networks. *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2022. Т. 10, № 02. С. 127–141. URL: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2022.102008> (дата звернення: 05.06.2026).
5. Electronics cookbook : practical electronic recipes with Arduino and Raspberry Pi. O'Reilly, 2017.
6. Robot Operating System (ROS) / ред. А. Koubaa. Cham : Springer International Publishing, 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75472-3> (дата звернення: 05.06.2026).
7. The Design and Building of a Hexapod Robot with Biomimetic Legs / Hwang та ін. *Applied Sciences*. 2019. Т. 9, № 14. С. 2792. URL: <https://doi.org/10.3390/app9142792> (дата звернення: 05.06.2026).
8. Ariawan K. U., Santyadiputra G. S., Sutaya I. W. Design of Hexapod Robot Movement Based on Arduino Mega 2560. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Т. 1165. С. 012011. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1165/1/012011> (дата звернення: 05.06.2026).

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Distributed Learning of Decentralized Control Policies for Articulated Mobile Robots / G. Sartoretti та ін. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019. Т. 35, № 5. С. 1109–1122. URL: <https://doi.org/10.1109/tro.2019.2922493> (дата звернення: 05.06.2026).
10. Neuropod: A real-time neuromorphic spiking CPG applied to robotics / D. Gutierrez-Galan та ін. *Neurocomputing*. 2020. Т. 381. С. 10–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.11.007> (дата звернення: 05.06.2026).
11. Al-Shammari N. K. Dynamic simulation and design of a simple hexapod robot. *Indian Journal of Science and Technology*. 2020. Т. 13, № 36. С. 3801–3819. URL: <https://doi.org/10.17485/ijst/v13i36.175> (дата звернення: 05.06.2026).
12. Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, 2020. 1136 с.
13. Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion / J. Ma та ін. *Micromachines*. 2022. Т. 13, № 9. С. 1404. URL: <https://doi.org/10.3390/mi13091404> (дата звернення: 05.06.2026).
14. Design, Analysis and Experiments of Bionic Hexapod Robot with Multilayer C-shape Legs for Unstructured Terrain / X. Zhu та ін. *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, м. Changsha, China, 4–8 лип. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/wcica.2018.8630361> (дата звернення: 05.06.2026).
15. Autonomous Navigation System of Indoor Mobile Robots Using 2D Lidar / J. Sun та ін. *Mathematics*. 2023. Т. 11, № 6. С. 1455. URL: <https://doi.org/10.3390/math11061455> (дата звернення: 05.06.2026).
16. Robot Target Localization and Visual Navigation Based on Neural Network / H. Guo та ін. *Journal of Sensors*. 2022. Т. 2022. С. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/6761879> (дата звернення: 05.06.2026).
17. Cruz F. R., Walton C., Frye M. T. Implementing an Autonomous Navigation Stack in ROS2: Simulation on the Bumperbot Platform. *IFAC-*

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.12.373> (дата звернення: 05.06.2026).

18. Spatiotemporal Attention Enhances Lidar-Based Robot Navigation in Dynamic Environments / J. de Heuvel та ін. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2024. С. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3373988> (дата звернення: 05.06.2026).

19. Serdel Q. Semantic-assisted Autonomous Ground Robot Navigation in Unstructured Environments : Electronic Thesis or Dissertation. 2024. URL: <http://www.theses.fr/2024UPAST139> (дата звернення: 05.06.2026).

20. Autonomous Navigation Robot using Slam and Path Planning Based on a Single RP-LIDAR / A. U. Shamsudin та ін. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2024. Т. 53, № 2. С. 161–169. URL: <https://doi.org/10.37934/araset.53.2.161169> (дата звернення: 05.06.2026).

21. Next generation legged robot locomotion: A review on control techniques / S. S. Kotha та ін. *Heliyon*. 2024. Т. 10, № 18. С. e37237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37237> (дата звернення: 05.06.2026).

22. Direct Communication Between Brains: A Systematic PRISMA Review of Brain-To-Brain Interface / C. S. Nam та ін. *Frontiers in Neurorobotics*. 2021. Т. 15. URL: <https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.656943> (дата звернення: 05.06.2026).

23. Hexapod robot for enhancing emergency response in disaster scenarios / V. R та ін. *Discover Applied Sciences*. 2026. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-026-08418-2> (дата звернення: 05.06.2026).

24. Freeman A., Bauer R. Factorial designed experiment to select reinforcement learning observations for a hexapod robot trajectory following task. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2026. Т. 23, № 2. URL: <https://doi.org/10.1177/17298806261431893> (дата звернення: 05.06.2026).

25. World Models for Autonomous Navigation of Terrestrial Robots from LIDAR Observations / R. Steinmetz та ін. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*:

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Applications in Engineering and Technology.* 2025.
URL: <https://doi.org/10.1177/18758967251399741> (дата звернення: 05.06.2026).
26. Autonomous Navigation System of Indoor Mobile Robots Using 2D Lidar / J. Sun та ін. *Mathematics.* 2023. Т. 11, № 6. С. 1455.
URL: <https://doi.org/10.3390/math11061455> (дата звернення: 05.06.2026).
27. Gyenes Z., Bölöni L., Szádeczky-Kardoss E. G. Can Genetic Algorithms Be Used for Real-Time Obstacle Avoidance for LiDAR-Equipped Mobile Robots?. *Sensors.* 2023. Т. 23, № 6. С. 3039.
URL: <https://doi.org/10.3390/s23063039> (дата звернення: 05.06.2026).
28. Improved path planning algorithm for mobile robots / L. Sun та ін. *Soft Computing.* 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08674-z> (дата звернення: 05.06.2026).
29. Sarah H. A., Dheyaa J. K. Developing a real time navigation for mobile robots at unknown environments. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science.* 2020. Т. 20, № 1. С. 500–509.
URL: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v20.i1.pp500-509> (дата звернення: 05.06.2026).
30. Chatterjee A., Rakshit A., Singh N. N. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) in Mobile Robots. *Vision Based Autonomous Robot Navigation.* Berlin, Heidelberg, 2013. С. 167–206. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33965-3_7 (дата звернення: 05.06.2026).
31. Indoor mobile robot localization applying IMU/stereo camera/LiDAR and graph-based optimization / L. Zhang та ін. *IEEE Sensors Journal.* 2024. С. 1.
URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3400269> (дата звернення: 05.06.2026).
32. Valliappan K. C., R V. Autonomous Indoor Navigation for Mobile Robots. *Regular issue.* 2021. Т. 10, № 7. С. 122–126.
URL: <https://doi.org/10.35940/ijitee.g9038.0510721> (дата звернення: 05.06.2026).
33. Subramanian R. Additional Sensors and Sensor Fusion. *Build Autonomous Mobile Robot from Scratch using ROS.* Berkeley, CA, 2023. С. 457–

										Арк.
										65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ					

496. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9645-5_9 (дата звернення: 05.06.2026).

34. CONTROL SYSTEM FOR GROUND MOBILE ROBOTS / N. V. Azarnov та ін. *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025. № 3. URL: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2025-3-8> (дата звернення: 05.06.2026).

35. Zhu K., Zhang T. Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review. *Tsinghua Science and Technology.* 2021. Т. 26, № 5. С. 674–691. URL: <https://doi.org/10.26599/tst.2021.9010012> (дата звернення: 05.06.2026).

36. Jadhav R. Tracking Locomotion using Reinforcement Learning. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.* 2022. Т. 10, № 7. С. 1777–1783. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.45509> (дата звернення: 05.06.2026).

37. Zhang J. Terrain-Adaptive Gait Planning Method for Hexapod Bionic Robots. *Applied and Computational Engineering.* 2025. Т. 127, № 1. С. 141–147. URL: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20263> (дата звернення: 05.06.2026).

38. Footholds optimization for legged robots walking on complex terrain / Y. Yin та ін. *Frontiers of Mechanical Engineering.* 2023. Т. 18, № 2. URL: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0742-y> (дата звернення: 05.06.2026).

39. Trends in the Control of Hexapod Robots: A Survey / J. Coelho та ін. *Robotics.* 2021. Т. 10, № 3. С. 100. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics10030100> (дата звернення: 05.06.2026).

40. Guan M., Wen C. Autonomous exploration using UWB and LiDAR. *Journal of Automation and Intelligence.* 2023. Т. 2, № 1. С. 51–60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jai.2022.100006> (дата звернення: 05.06.2026).

41. Intelligent Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robots in Uncertain Environment / L. Guan та ін. *Journal of Robotics.* 2022. Т. 2022. С. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/8954060> (дата звернення: 05.06.2026).

					КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

42. Real-time nonparametric reactive navigation of mobile robots in dynamic environments / S. Choi та ін. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Т. 91. С. 11–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.003> (дата звернення: 05.06.2026).

43. Simulation of an Autonomous Radiation Detection Robot in Gazebo and Webots using SLAM and A-Star Algorithm / Chanthini Baskar та ін. *Defence Science Journal*. 2025. Т. 75, № 6. С. 751–757. URL: <https://doi.org/10.14429/dsj.19596> (дата звернення: 05.06.2026).

44. Kashyap A. K., Konathalapalli K. Autonomous navigation of ROS2 based Turtlebot3 in static and dynamic environments using intelligent approach. *International Journal of Information Technology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s41870-025-02500-5> (дата звернення: 05.06.2026).

45. Kim M.-G., Kim H.-B., Park H.-W. A*-Based Path Planning for Legged Robots. *Robot Intelligence Technology and Applications 7*. Cham, 2023. С. 86–98. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-26889-2_9 (дата звернення: 05.06.2026).

46. Multi-sensor fusion-based inter-row autonomous following navigation for collaborative harvesting robots / X. Ni та ін. *Smart Agricultural Technology*. 2026. Т. 14. С. 102139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102139> (дата звернення: 05.06.2026).

					<i>КвРАКІТР. 2023146.01.09.ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Дробот Дмитро Борисович

Тема: Мобільний робот-гексапод

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки - 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка мобільного робота гексапода

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: у першому розділі виконано дослідження предметної області та огляд джерел; у другому розділі виконано проектування мехатронної системи гексапода; у третьому розділі представлено програмну реалізацію.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи, використано сучасні методи проектування мехатронних систем і розробки програмного забезпечення для робототехнічних комплексів.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється аналізу надійності системи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

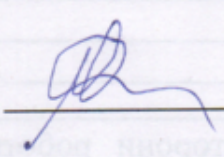
7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре 79(С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Яшина Оксана Миколаївна, доцент, кафедри інженерії програмного забезпечення

“17” червня 2026 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувача вищої освіти
Дробота Дмитра Борисовича
факультет ІТ, курс ІІІ, група АКІТРс-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.06.2026

дата


підпис

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 6.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 14%

ID: 274213 Title: БКР Мобільний робот-гексапод Added in a DB: 2026-06-08 Authors: Дмитро ДРОБОТ Heads: Денис МАКАРИШКІН Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	70797	475	4337 (6%)	55 (12%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes
274210	Title: БКР Система навігації мобільного робота у замкненому середовищі Added in a DB: 2026-06-08 Authors: Василь АНДРІЙШИН Heads: Артур СЛИВА Consultants: Opponents:	4029 (6.0%)	52 (11.0%)

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Дмитро ДРОБОТ

Співавтор:

Назва: БКР Дробот

Експерт: Денис МАКАРИШКІН

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 0.5%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 330

Заміна букв: 22

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-09 12:25:05.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

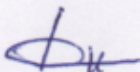
Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-09



Доцент Микола Федула

Дата

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи: «Мобільний робот-гексапод»

Автор: Дробот Дмитро Борисович

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

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

Науковий керівник: Макаришкін Денис Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т. ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є академічним плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноновживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках, у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.


Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0,5% і адресується до 6 джерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.


Дата 08.06.2026


Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи







Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Денис МАКАРИШКІН