

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

**Факультет робототехніки та приладобудування**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

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

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**на тему: «Робот-гексапод з комп'ютерним зором»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-21,  
Корнієнко Олександр Миколайович

\_\_\_\_\_

Керівник:

Ст. викл., доктор філософії (Ph.D.), доцент,  
Момот Андрій Сергійович

\_\_\_\_\_

Рецензент:

Проф., д.т.н., доцент кафедри ІВТ,  
Барилко Сергій Віталійович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2026 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення              | Найменування                                  | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                         | Завдання на дипломний проєкт                  | 2                |          |
| 2     | A4     | ДП ПМ-21.05.1760.000 ПЗ | Пояснювальна записка                          | 96               |          |
| 3     | A1     | ДП ПМ-21.05.1760.000 Е1 | Схема електрична структурна                   | 1                |          |
| 4     | A1     | ДП ПМ-21.05.1760.000 Е2 | Схема електрична функціональна                | 1                |          |
| 5     | A1     | ДП ПМ-21.05.1760.000 Е3 | Схема електрична принципова                   | 1                |          |
| 6     | A4     | ДП ПМ-21.05.1760.001 Е3 | Специфікація до схеми електричної принципової | 2                |          |
| 7     | A1'    |                         | Плакат конструкції прототипу                  | 1                |          |
| 8     | A1     |                         | Плакат технічних особливостей прототипу       | 1                |          |
| 9     | A4     |                         | Код програмного забезпечення                  | 8                |          |

|           |                |       |      |                                 |                                                        |        |
|-----------|----------------|-------|------|---------------------------------|--------------------------------------------------------|--------|
|           |                |       |      | ДП ПМ-21.05.1760.000 ПЗ         |                                                        |        |
|           | ПІБ            | Підп. | Дата | Відомість<br>дипломного проєкту | Лист                                                   | Листів |
| Розробн.  | Корнієнко О.М. |       |      |                                 | 1                                                      | 1      |
| Керівн.   | Момот А.С.     |       |      |                                 |                                                        |        |
| Консульт. |                |       |      |                                 |                                                        |        |
| Н/контр.  |                |       |      |                                 |                                                        |        |
| Зав.каф.  |                |       |      |                                 |                                                        |        |
|           |                |       |      |                                 | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>Каф. АСНК<br>Гр. ПМ-21 |        |

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Робот-гексапод з комп'ютерним зором»**

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет робототехніки та приладобудування**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Корнієнко Олександр Миколайович**

1. Тема проєкту «Робот-гексапод з комп'ютерним зором», керівник проєкту Момот Андрій Сергійович, доктор філософії (Ph.D.), доцент, затверджені наказом по університету від « 26 » травня 2026 р. № 1905
2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2026
3. Вихідні дані до проєкту : крокуючий робот, що має 6 ніг, інтеграція комп'ютерного зору для надання точки зору оператору, дистанційне керування через WiFi канал зв'язку, має автономне джерело живлення.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ, розділ 1 аналітичний огляд, кінематика системи руху, розробка електричної підсистеми, розробка та виготовлення конструкції, розробка програмного забезпечення, висновки, список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична структурна А1, схема електрична функціональна А1, схема електрична принципова А1, плакат конструкції прототипу А1, плакат технічних особливостей прототипу А1, код програмного забезпечення А4, презентація А4.

6. Дата видачі завдання 19.04.2026

---

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Пошук літератури та її аналіз             | 22.04.2026                      | Виконано |
| 2     | Складання технічного завдання             | 23.04.2026                      | Виконано |
| 3     | Опис кінематики робота                    | 25.04.2026                      | Виконано |
| 5     | Опис конструктивних параметрів            | 29.04.2026                      | Виконано |
| 6     | Підбір устаткування                       | 30.04.2026                      | Виконано |
| 7     | Створення електричної схеми               | 04.05.2026                      | Виконано |
| 8     | Створення 3Д-моделі                       | 05.05.2026                      | Виконано |
| 9     | Друк деталей конструкції                  | 08.05.2026                      | Виконано |
| 10    | Складання прототипу робота                | 09.05.2026                      | Виконано |
| 11    | Написання коду керування                  | 13.05.2026                      | Виконано |
| 12    | Тестування робота                         | 15.05.2026                      | Виконано |

Студент

Олександр КОРНІЄНКО

Керівник

Андрій МОМОТ

## АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто процес розробки крокуючої платформи робота-гексапода. Було проведення ґрунтовне дослідження щодо стану індустрії та можливі перспективи у застосуванні. Також було розглянуто можливості інтеграції комп'ютерного зору у систему та можливості, які може він надати оператору або алгоритму управління.

Особливість реалізації прототипу, було використання двох мікроконтролерів STM23F103C8T6, у якості центру контролю керування рухом та опрацювання команд та ESP32 у якості відеопроцесора та центру який підтримує канал зв'язку з оператором.

У ході розробки було проведено математичне моделювання, що має вигляд рівнянь прямої та оберненої кінематики, що є потрібними для реалізації алгоритмів руху. Також було проведено моделювання конструкції та її виготовлення за допомогою 3Д-принтера. Паралельно з цим було проведено підбір двигунів та електричних компонентів, що є потрібними для отримання потрібної інформації для моделювання оточення та проведення керування за допомогою протоколів передачі даних та широтно-імпульсної модуляції сигналу.

Результат роботи демонструє перспективність у практичному використанні у сферах розвідки, рятувальних робіт та можливостей до роботи екстремальних середовищах, що є недоступними для людського тіла у звичайних умовах.

## ABSTRACT

In the work, the process of development of a walking platform of a hexapod robot is considered. A thorough research regarding the state of the industry and possible prospects in application was conducted. Also, the possibilities of integration of computer vision into the system and the possibilities which it can provide to an operator or a control algorithm were considered.

A feature of the implementation of the prototype was the use of two microcontrollers STM32F103C8T6, as a center of control of motion management and processing of commands, and ESP32, as a video processor and a center which supports a communication channel with the operator. In the course of development, mathematical modeling was conducted, having the form of equations of forward and inverse kinematics, which are necessary for the implementation of motion algorithms. Also, modeling of the construction and its manufacturing by means of a 3D printer were conducted. In parallel with this, a selection of motors and electrical components was conducted, which are necessary for obtaining the required information for modeling the environment and conducting control by means of data transmission protocols and pulse-width modulation of the signal.

The result of the work demonstrates promising results in practical use in the fields of reconnaissance, rescue works, and possibilities for work in extreme environments that are inaccessible to the human body in normal conditions.

## ЗМІСТ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....                                                                 | 11 |
| ВСТУП .....                                                                             | 12 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД .....                                                       | 13 |
| 1.1. Особливості крокуючих роботів як класу мобільних робототехнічних систем .....      | 13 |
| 1.2. Області застосування крокуючих роботів .....                                       | 16 |
| 1.3. Типові конструктивні схеми крокуючих роботів .....                                 | 19 |
| 1.3.1. Двоногі, чотириногі та багатонігі роботи.....                                    | 19 |
| 1.3.2. Особливості гексаподної конструкції.....                                         | 20 |
| 1.4. Відомі приклади реалізації крокуючих роботів і їх функціональних можливостей ..... | 21 |
| 1.4.1. Atlas HD.....                                                                    | 21 |
| 1.4.2. Unitree Go1 .....                                                                | 21 |
| 1.4.3. Weaver .....                                                                     | 22 |
| 1.5. Особливості використання комп'ютерного зору в мобільних крокуючих роботах .....    | 23 |
| 1.6. Відомі обмеження та складнощі проектування крокуючих роботів .....                 | 27 |
| 1.7. Формулювання задач дипломного проекту.....                                         | 28 |
| Висновки до розділу 1 .....                                                             | 30 |
| РОЗДІЛ 2. КІНЕМАТИКА СИСТЕМИ РУХУ .....                                                 | 31 |
| 2.1. Типові кінематичні схеми ніг крокуючих роботів .....                               | 31 |
| 2.1.1. Послідовна кінематична структура.....                                            | 31 |
| 2.1.2. Паралельна кінематична структура.....                                            | 32 |
| 2.2. Кінематична структура робота-гексапода.....                                        | 33 |
| 2.2.1. Загальна схема розташування ніг .....                                            | 35 |

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3. Геометрична модель однієї ноги робота.....                                             | 35        |
| 2.4. Пряма кінематика однієї ноги.....                                                      | 37        |
| 2.5. Зворотна кінематика однієї ноги .....                                                  | 39        |
| 2.6. Кінематична модель робота в цілому .....                                               | 40        |
| 2.7. Методи формування основних типів ходи робота-гексапода .....                           | 41        |
| 2.7.1. Триподна хода .....                                                                  | 41        |
| 2.7.2. Хвильова хода.....                                                                   | 42        |
| 2.7.3. Поворот на місці та зміна напрямку руху .....                                        | 42        |
| 2.8. Оцінювання статичної стійкості робота під час руху .....                               | 43        |
| 2.9. Визначення робочих кутів, переміщень і кінематичних обмежень<br>приводів.....          | 44        |
| 2.10. Використання даних інерціального сенсора для корекції положення<br>корпусу .....      | 45        |
| Висновки до розділу 2 .....                                                                 | 46        |
| <b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ .....</b>                                      | <b>47</b> |
| 3.1. Розробка структурної та функціональної схеми електричної<br>підсистеми робота .....    | 47        |
| 3.2. Обґрунтування вибору інерціального сенсора.....                                        | 48        |
| 3.3. Обґрунтування вибору сервоприводів системи руху .....                                  | 50        |
| 3.3.1. Розрахунок кількості приводів для гексаподної конструкції.....                       | 50        |
| 3.3.2. Визначення вимог до крутного моменту сервоприводів та їх<br>кутового діапазону ..... | 50        |
| 3.3.3. Обґрунтування вибору сервоприводів.....                                              | 50        |
| 3.4. Обґрунтування вибору модулів керування сервоприводами .....                            | 52        |
| 3.5. Обґрунтування вибору сенсора дистанції .....                                           | 53        |
| 3.6. Електрична підсистема вузла повороту камери.....                                       | 54        |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7. Обґрунтування вибору OLED дисплея .....                                    | 56 |
| 3.8. Обґрунтування вибору мікроконтролерів .....                                | 57 |
| 3.9. Розрахунок енергоспоживання робота .....                                   | 58 |
| 3.9.1. Розрахунок споживання сервоприводів.....                                 | 58 |
| 3.9.2. Розрахунок сумарного споживання .....                                    | 59 |
| 3.10. Обґрунтування вибору підсистеми живлення.....                             | 59 |
| Висновки до розділу 3 .....                                                     | 60 |
| РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ.....                             | 61 |
| 4.1. Загальна концепція конструкції робота .....                                | 61 |
| 4.2. Розробка конструкції корпусу .....                                         | 61 |
| 4.2.1. Конструкція основного корпусу.....                                       | 61 |
| 4.2.2. Конструкція другорядного корпусу .....                                   | 62 |
| 4.3. Розробка конструкції ноги робота.....                                      | 63 |
| 4.4. Розробка механізму повороту камери.....                                    | 64 |
| 4.5. Планування розміщення електронних компонентів у конструкції<br>робота..... | 65 |
| 4.6. Технологічні особливості виготовлення деталей .....                        | 66 |
| 4.7. Складання та налагодження макета робота.....                               | 67 |
| Висновки до розділу 4 .....                                                     | 71 |
| РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....                               | 72 |
| 5.1. Загальна архітектура програмного забезпечення .....                        | 72 |
| 5.2. Алгоритм ініціалізації керуючого мікроконтролера .....                     | 73 |
| 5.3. Алгоритм головного циклу керуючого мікроконтролера.....                    | 74 |
| 5.4. Алгоритм виконання команд .....                                            | 76 |
| 5.4.1. Алгоритм перестановки ніг.....                                           | 78 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5. Алгоритм отримання команд .....                                            | 79 |
| 5.5.1. Алгоритм команди стоп .....                                              | 80 |
| 5.5.2. Алгоритм команди повороту башти .....                                    | 82 |
| 5.5.3. Алгоритм команди зміни висоти корпусу .....                              | 84 |
| 5.6. Алгоритм ініціалізації другорядного мікроконтролера .....                  | 84 |
| 5.7. Алгоритм опрацювання команд оператора .....                                | 86 |
| 5.8. Налагодження та перевірка працездатності програмного забезпечення<br>..... | 88 |
| Висновки до розділу 5 .....                                                     | 90 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                   | 91 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                 | 93 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – Аналогово-цифровий перетворювач

ПК – Персональний комп'ютер

ПІД-контролер – Пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер

ЦАП – Цифро-аналоговий перетворювач

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ШІ – Штучний інтелект

GPIO – Загальний вхід/вихід (англ. General Purpose Input/Output)

I2C – Синхронний послідовний протокол передачі даних

ІВМ – Інерціальний вимірювальний модуль

OLED – Дисплей на основі органічних світлодіодів (англ. Organic Light-Emitting Diode)

SLAM – Одночасна локалізація та побудова карти (англ. Simultaneous Localization and Mapping)

PLA – Полімолочна кислота (англ. Polylactic Acid)

SPI – Синхронний послідовний протокол передачі даних

UART – Універсальний асинхронний протокол приймання/передачі даних (англ. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

## ВСТУП

Сучасна робототехніка перебуває на етапі, переходу від прототипів, які можуть функціонувати лише у повністю контрольованих лабораторних умовах до моделей, що можуть бути виготовлені за допомогою масового виробництва та подальшого використання у споживчому секторі. Завдяки цьому подібні крокуючі роботи знаходять нові сфери застосування, що призводить до нових покращень для кращої підстановки під конкретні застосування.

Основними проблемами у цій сфері робототехніки залишаються незмінними а саме –забезпечення достатнього зусилля для виконання поставлених задач, питання енергоефективності для забезпечення якомога більшого операційного часу, оптимізація конструкції для зменшення складності підтримки без необхідності присутності висококваліфікованих інженерів та також, що не менш важливо – забезпечення необхідних обчислювальних можливостей для реалізації складних алгоритмів переміщення.

Також однією із останніх новинок у з'явилася тенденція до реалізації комп'ютерного зору, що може виступати у якості додаткового датчику, який допомагає локалізувати перешкоди до повноцінної системи, що відповідає за інтерпретацію всього навколишнього середовища та надає необхідний контекст до прийняття рішень.

Метою дипломної роботи є розробка портативного крокуючого робота-гексапода, який повинен мати здатність до пересування з автономним джерелом живлення та можливість до дистанційного керування. Також для забезпечення можливості оператора до навігації, не перебувають безпосередньо поряд із ним робот буде мати систему комп'ютерного зору, що буде надавати відеопотік на інтерфейс керування.

Результатом виконання є прототип подібної платформи, що втілює у собі базові функції робота-гексапода із комп'ютерним зором.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Особливості крокуючих роботів як класу мобільних робототехнічних систем

Загально прийнятим початком історії крокуючих роботів вважається робота Марка Райберта «Legged Robots That Balance»[1]. Її основна ідея полягає у тому що, крокуючий робот може залишатися у стабільному положенні навіть під час руху. Це було доведено шляхом створення одноногого крокуючого робота, що міг пересуватися за допомогою стрибків, та не падати у процесі. (Рисунок 1.1)

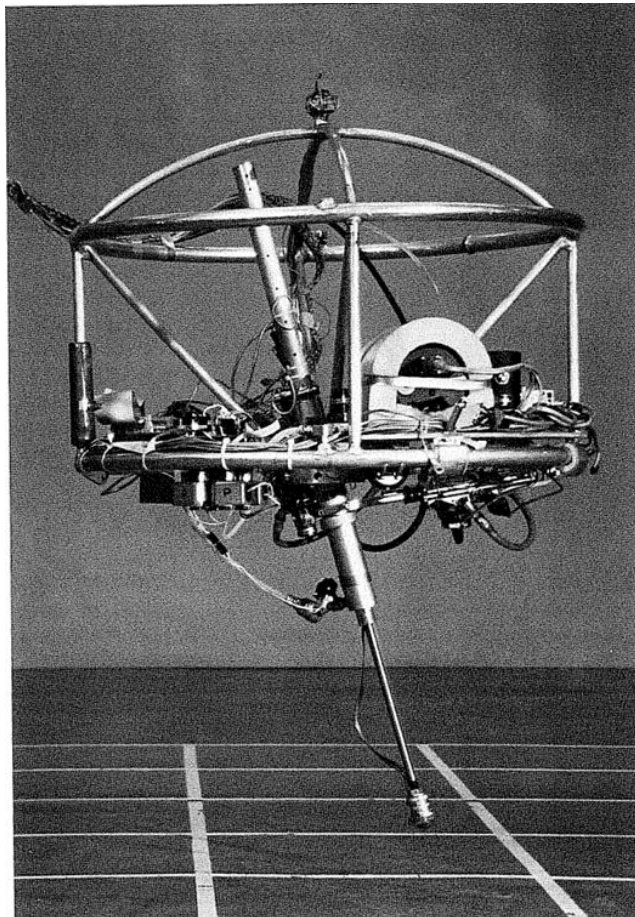


Рисунок 1.1. Стрибаючий робот Марка Райберта який він використовував у своїх експериментах [1]

У цій праці було закладено фундамент розуміння динамічної стабільності, що дозволило перейти від простих кінематичних систем до більш складних

динамічних структур які здатні самостійно утримувати рівновагу під час постійного руху [1].

На початку 2000-х років вектор наукових пошуків змістився у бік оптимізації архітектури, оскільки тогочасні механізми залишалися громіздкими через складність конструкції кінцівок. Пріоритетним став біоміметичний підхід, яскравим втіленням якого стала розробка робота RHex (рисунок 1.2).

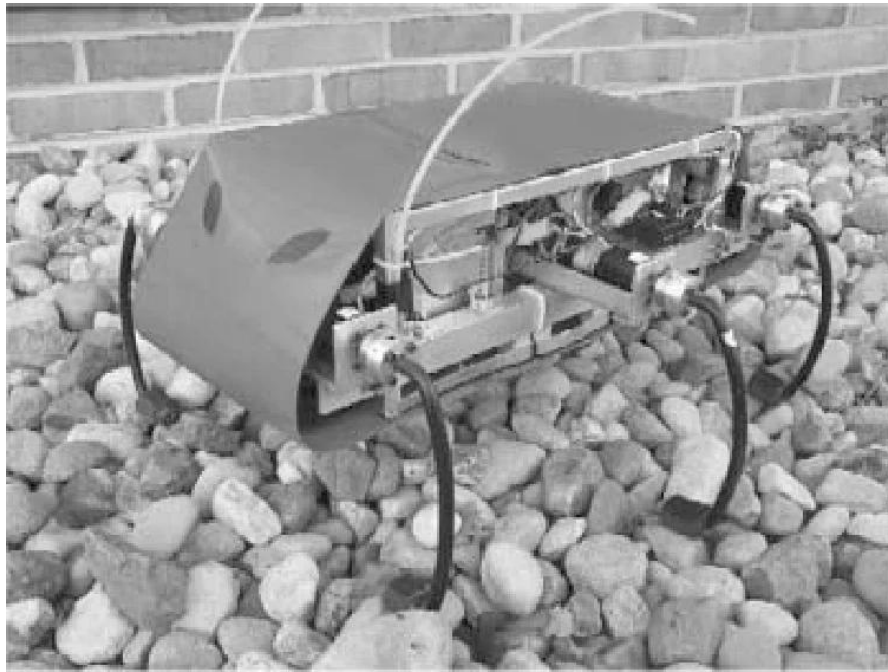


Рисунок 1.2. Робот RHex [2]

Цей робот мав здібності до руху через екстримально складні поверхні використовуючи лише 6 двигунів – по одному на кожну ногу. Це було досягнуто завдяки використанню гнучких кінцівок специфічної форми. Такий підхід підтвердив ефективність використання пасивної динаміки, що значно розширило можливості застосування мобільних платформ у польових умовах. [2].

Подальший поступ був зосереджений на створенні ефективної системи автоматичної навігації та використанні різноманітних сенсорних органів. Репрезентативним прикладом цього періоду є серія гексаподів LAURON, зокрема модель четвертого покоління, розроблена у 2010 році (рисунок 1.3) [3]. Комплекс обладнання включав силомоментні сенсори кінцівок для аналізу опору

поверхні, інерціальні модулі для відстеження центру мас, а також ультразвукові та інфрачервоні вимірювачі для побудови віртуальних карт простору. Контроль навантаження на двигуни здійснювався за допомогою датчиків струму, що дозволяло уникати механічних перевантажень.

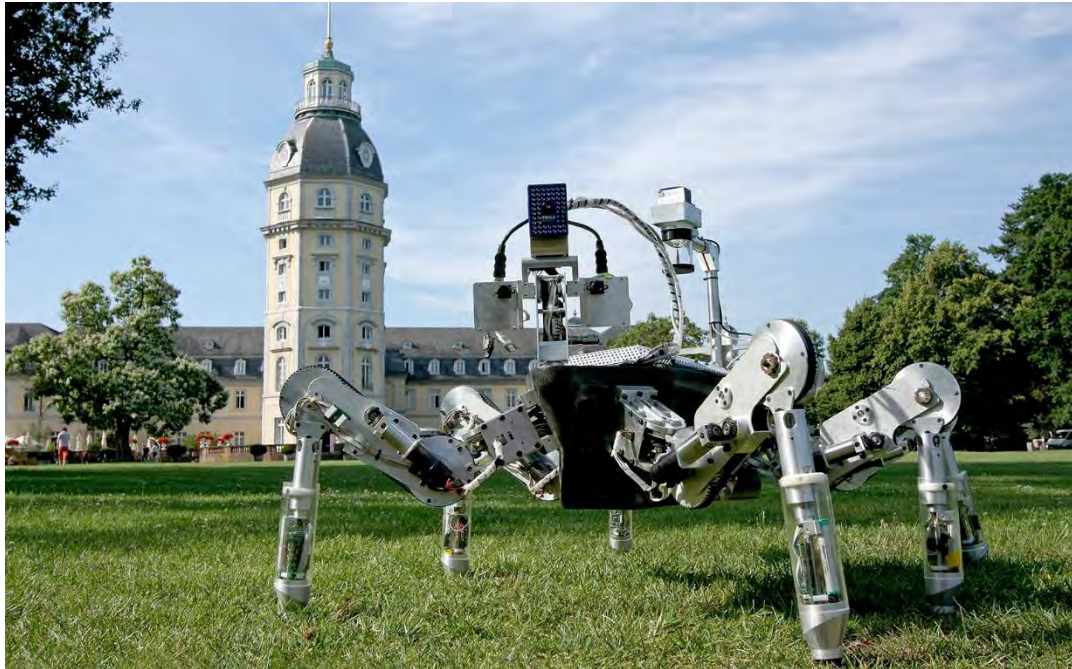


Рисунок 1.3. Робот-гексапод лінійки LAURON, 4 версія. Розроблений FZI Forschungszentrum Informatik у Німеччині 2009 р. [3]

Також паралельно розвивалися алгоритми керування подібними системами. Основний напрямком була задача поєднання даних, отриманих через датчики та створення на її основі детального аналізу поверхні. Подібні дослідження привели до винайдення концепції SLAM. Вона полягала у тому, щоб створювати внутрішню мапу у реальному часі на основі 3-вимірних даних із датчиків. Основним прикладом, що демонструє дану концепцію є робота Домініка Белтера «Integrated Motion Planning for a Hexapod Robot Walking on Rough Terrain» (2011) [4]. У ній, вони були одними із перших хто почали використовувати камери якості датчиків для автоматичної навігації. За допомогою цього вони не просто покращили обізнаність робота щодо його навколишнього середовища, а ще довели що такий підхід є більш енергоефективним ніж поточні на той час, а саме приблизно на 10% - 15% [4, 5].

На сучасному етапі розробки основна увага зосереджена на вдосконаленні та оптимізації вже існуючих підходів до рішень. Так наприклад сучасна розробка на платформі Weawer демонструє здатність до подолання екстремальних перешкод у автономному режимі завдяки адаптації складних керуючих алгоритмів у керування кінцівок із 5-ма ступенями свободи. Також ця система демонструє високу ступінь маневреності. [6].

## **1.2. Області застосування крокуючих роботів**

Роботи-гексаподи завдяки своїй структурі, що підтримує стабільне положення у більшості ситуацій найкраще підходять для виконання задач у середовищах із складним рельєфом. Ці особливості повстають із того факту, що для більшості випадків можна використовувати патерн переміщення ніг де три з них завжди будуть на землі. І якщо у цьому стані центр мас системи буде зосереджений всередині цього трикутника, то платформа буде залишатися у стабільному положенні.

Завдяки цьому, їх можна використовувати у безлічі ситуацій де звичайні колісні, або гусеничні конструкції не зможуть пересуватися. Наприклад у статті «Structure and Gait Design of a Lunar Exploration Hexapod Robot Based on Central Pattern Generator Model» [7] будується прототип гексапода, стиль ходьби якого може застосовуватися на роботах, що можуть бути відправленими у експедицію на іншу планету (у цьому прикладі на Місяць). Основними аргументами на користь цієї концепції виступає факт того, що модель може продовжувати роботу навіть коли одна із ніг буде пошкоджена. Також, оскільки поверхня може бути дуже рельєфною то тут так само важлива можливість пересуватися по ній без ризиків.

Також, однією із провідних сфер застосування мобільних роботів, в том числі і крокуючих є рятувальні операції. Їхня найбільша користь полягає у тому, що вони можуть працювати посеред інфраструктури, що була побудована під людей, в яких звичайні моделі на колесах або гусеницях не зможуть пройти, адже

для них сходи є нездоланою перешкодою [8]. Також, якщо інтегрувати алгоритми динамічної побудови шляху, в них буде можливість здійснювати навігацію посеред динамічно змінюваного середовища такого як, наприклад, будинок що руйнується. Ще однією з функцій які можна застосувати до таких платформ, це надати їм інструменти, які зможуть допомогти змінювати оточення. Маються на увазі такі дії, як відчинення дверей, перенесення об'єктів і розчищення завалів на дорозі, що забезпечить безпеку людям які будуть потім йти цим шляхом. Також, були розробки спрямовані на військове застосування. Мається мова про крокуючого робота під назвою BigDog (Рисунок 1.4), що був розроблений компанією Boston Dynamics за інвестицій DARPA.



Рисунок 1.4. Робот BigDog

Результатом роботи був чотириногий робот, висотою 1 метр, вагою 109 кілограмів. Його основним задачами повинні були бути розвідка територій та перенесення вантажу по пересіченій місцевості. Для цього він був оснащений двигуном внутрішнього згорання, що приводив у роботу гідравлічну систему,

яка здійснювала його рух. Завдяки цьому він міг переносити вантажі масою до 45 кілограмів [9].

Але не зважаючи на те, який це був прорив у робототехніці крокуючих роботів, ця розробка була визнана нерентабельною, по причині того що BigDog був занадто шумним, що призводило до неможливості виконання поставленим йому завдань через однозначний ризик бути поміченим противником на бої бою.

Наразі, можливості до автономної роботи роботів переживають нечуваний розвиток, як наслідок прориву технологій штучного інтелекту. Як наслідок ми отримали інструмент до створення системи що не просто аналізує дані у реальному часі, але ще може пам'ятати результати та застосовувати їх у подальшій роботі. Так основним напрямком, крокуючих роботів що намагається у повній мірі застосувати цю технологію у собі сфера гуманоїдних роботів. Поєднавши, сучасні рішення щодо збору даних та їх обробки очікується що у найближчий рік або два з'явиться перша комерційна модель мобільного робота (Рисунок 1.5), який зможе виконувати чорнову роботу на виробництві, замінивши роль звичайного робітника [10].



Рисунок 1.5. Робот Atlas 3, розроблений Boston Dynamics

### 1.3. Типові конструктивні схеми крокуючих роботів

Оскільки крокуючі роботи вже мають історію розвитку більше ніж 30 років [1], то є сенс переглянути типові конструкції для їхнього порівняння (Рисунок 1.6).

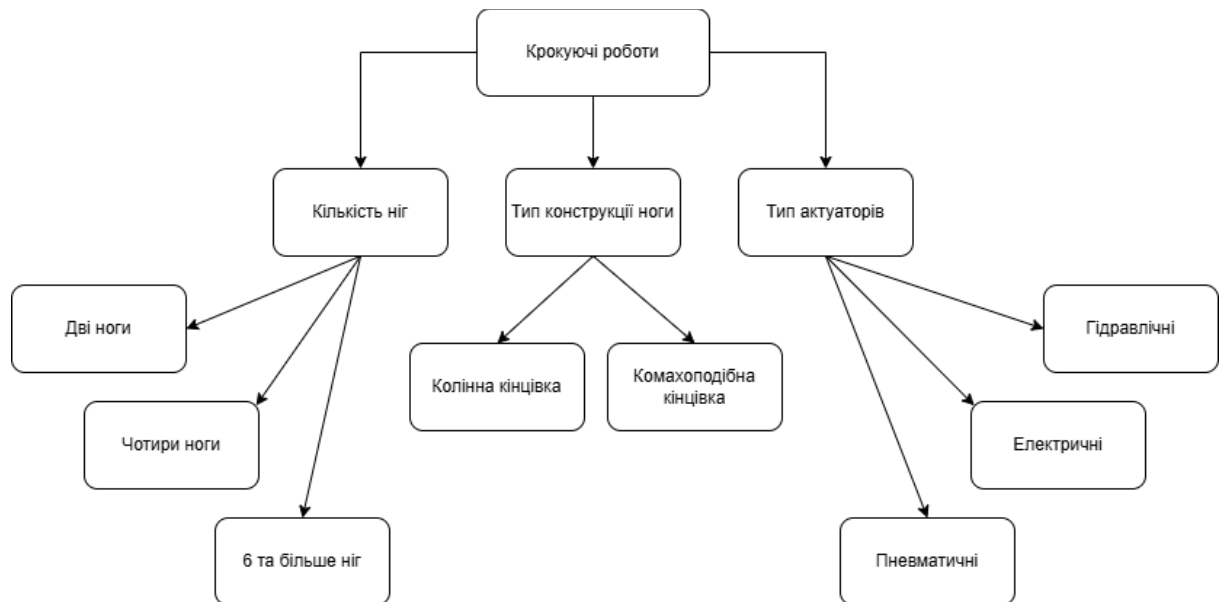


Рисунок 1.6. Діаграма класифікації конструктивних параметрів крокуючих роботів

Загалом, типові конструкції можна класифікувати у 3 класи характеристик, це яка кількість ніг у робота їх конструкція, і з допомогою яких актуаторів вони виконують рух.

#### 1.3.1. Двоногі, чотириногі та багатонігі роботи

Довгоногі роботи в більшості випадків використовуються для розробки гуманоїдних (або людиноподібних), роботів. Їхня основна особливість полягає у тому що вони можуть використовуватися у середовищах які були побудовані або адаптовані під особливості людського тіла. Також технічна реалізація подібних систем є однією із найскладніших серед крокуючих роботів. Такі моделі в більшості випадків доповнюються маніпуляторами, які допомагають із

взаємодією із навколишньою інфраструктурою. Наразі ведуться розробки таких гуманоїдних роботів, що зможуть виконувати чорнову роботу замість звичайних робітників. Так є можливість використовувати їх на місцях. Популярним рішенням щодо їх типу кінцівок є колінний клас, бо такі кінцівки наслідуються від ссавців, що доповнює розробку людиноподібного робота [11, 12].

Чотириногі роботи наразі є найбільш використовуваними типом конструкції платформи. Головною ідеєю є наслідування манери ходьби ссавців. Дана концепція стала популярною завдяки своєму співвідношенню до складності алгоритмічної реалізації та технічної. Їхні кінцівки також є колінного типу, адже конструкція наслідується від чотириногих ссавців. Завдяки цьому цей тип роботів є найшвидшим серед інших крокуючих роботів. Наразі вони використовуються у сферах розвідки та логістики [13, 14].

Роботи із шістьма та більше ногами відрізняються своєю підвищеною стабільністю. Це досягається за рахунок того, що у них є можливість мати мінімум 3 ноги одночасно на землі, і при умові збереження центру маси в умовному трикутнику, що утворюється із точок дотику із поверхнею платформа залишається стабільно. Також більша кількість ніг дозволяє мати доступ до більшою сили для переносу вантажів [14].

### 1.3.2. Особливості гексаподної конструкції

Роботи-гексаподи є частиною класу багатоногих платформ. Вони виділяються тим, що вони є мінімально задовільним варіантом конструкції і також вони наслідують всі переваги своєї категорії такі як забезпечення статичної стабільності у будь-який момент руху, велику вантажопідйомність.

Сама конструкція передбачає наявність 6 ніг, від чого і походить його назва. І оскільки цієї кількості ніг є достатньо для абсолютною більшості завдань то цей варіант наразі є найпоширенішим у своїй категорії.

## **1.4. Відомі приклади реалізації крокуючих роботів і їх функціональних можливостей**

### **1.4.1. Atlas HD**

Ця модель гуманоїдного робота є попередником Atlas 3 (Рисунок 3.2). Його основна особливість полягала у використанні гідравлічних актуаторів. Це було використано для досягнення швидких та потужних рухів, що дозволяло йому відтворювати складні гімнастичні рухи та ефективно пересуватися по екстремальним середовищам. Його основною проблемою була висока складність утримання, шум, та вага. Він, як і наступна модель, використовував методики комп'ютерного зору для застосування алгоритмів комплексування даних для відтворення віртуальної мати по якій він міг рухатися [15].



Рисунок 3.2. Гуманоїдний робот моделі Atlas HD [15]

### **1.4.2. Unitree Go1**

Ця модель чотириноного робота здебільшого схожа до Spot від Boston

Dynamics, але вона має декілька відмінностей (Рисунок 3.5). Найбільшою особливістю цієї платформи є її низька вартість. Також роботи цієї серії мають встановлені лазерні лідари які створюють заміну звичному комп'ютерному зору замість використання цифрових камер [16].



Рисунок 3.5. Модель чотириноного робота Unitree Go1 [16]

#### 1.4.3. Weaver

Це робот-гексапод що був розроблений групою дослідників CSIRO (Рисунок 3.1). Основна особливість полягає у тому, що його кінцівки мають по 5 ступенів свободи. Така конструкція надає безпрецедентні можливості до вільності пересування через екстремальні поверхні. Також цей робот має комп'ютерний зір, що дозволяє використовувати ці данні у алгоритмах SLAM із глибоким навчанням та можливості до автономної навігації. Він також має датчики силомоменту на кінчиках своїх кінцівок що дозволяє йому регулювати потрібне зусилля для підтримання рівноваги та виконання маневрів [6].



Рисунок 3.1. Модель робота-гексапода Weaver [6]

### **1.5. Особливості використання комп'ютерного зору в мобільних крокуючих роботах**

Комп'ютерний зір у робототехніці є провідним напрямком, коли йдеться мова про реалізацію автономної навігації. Завдяки ньому можна отримати багато інформації, яку можна обробляти у реальному часі. Реалізується він зазвичай за рахунок встановлення однієї або двох цифрових камер на корпусі. Також можна додати, що у більшості випадків комп'ютерний зір не повинен обмежуватися лише фіксуванням електромагнітних хвиль видимого діапазону. Наприклад можна використовувати зір у інфрачервоному спектрі, для пошуку людей під завалами зруйнованого будинку [8] та нічного бачення [17], а ультрафіолетовий для аналізу поверхонь космічних тіл [7]. І добре реалізована система із використанням цієї технології має потенціал бути конкурентною із роботом, що керується досвідченим оператором [18, 19].

Принцип роботи цієї технології полягає у перетворенні вхідного потіку зображень який складається із матриці пікселів, методами математичного перетворення у змістовний 3-х вимірне моделювання оточення. Потім результат

перетворення потрібно проаналізувати на предмет перешкод та змін для уникнення колізії або здійснення нагляду. [20]

Також дослідники розділяють комп'ютерний зір на декілька рівнів обробки зображення. Перший рівень називають низькорівневим по причині того, що такий аналіз знаходить лише найбанальніші елементи середовище. Це наприклад грані 3-ох вимірних фігур та їх ребра, що є корисним але не є універсальним. Другим рівнем обробки даних називають середнім. Він є кращим за попередній, бо уже має здібності до групування об'єктів за первинними ознаками та за аналізом поверхонь на предмет їхньої текстури та яскравості кольорів. Третім рівнем та найбільш продвинутим називають високий. На ньому крім всього того, що включають в собі попередні рівні, також має здібності до контекстного розуміння об'єктів та можливості складання на основі цих даних 3-ох вимірних карт, що є схожими до карт створених за допомогою SLAM [20, 21, 22].

Але для роботи такої складної системи потрібно мати не менш, складніший алгоритм опрацювання даних. Загалом є два основні підходи втілення – це використання сучасних технологій глибокого навчання, або застосування комплексування для створення віртуальної карти. Перший варіант значно переважає за другим. Він може застосовувати для глибокого аналізу та паралельного навчання, що із збільшенням наданих даних покращує кінцевий результат. Другий варіант, його також називають алгоритмом SLAM (від Simultaneous Localization and Mapping) також відомий як алгоритм фузії карти [21] (Рисунок 1.7). Він також може забезпечити ефективний обхід перешкод, але його можливості лімітуються можливостями до вибору ефективного шляху. Його суть полягає у створенні віртуальної мапи на бору у робота, по якій він може визначити своє положення у просторі. І сучасна тенденція полягає у тому, щоб поєднувати ці два методи для отримання ще кращої навігаційної здатності [23].

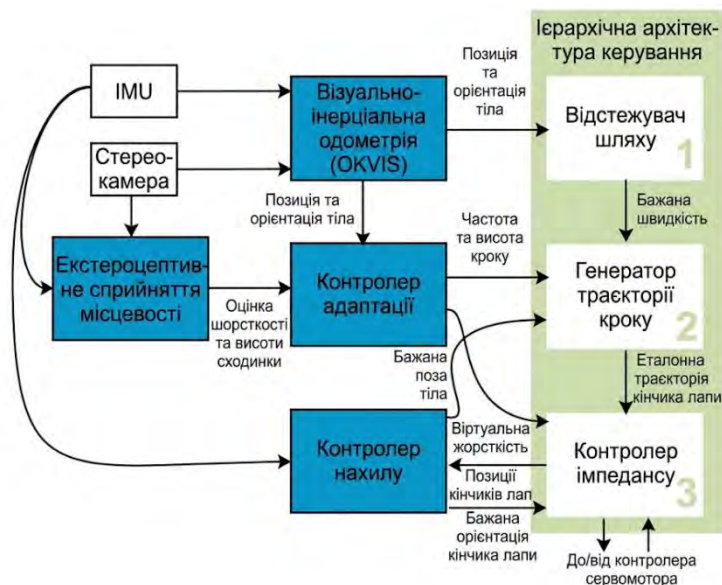


Рисунок 1.7. Схема роботи контролера платформи Weaver із використанням SLAM алгоритму [23]

Використання алгоритмів глибокого навчання також має свої недоліки. Найбільш помітним, це є його вимоги до обчислювальних можливостей. Оскільки моделі ШІ є гігантськими по міркам потрібної пам'яті, то для використання їх у спеціалізованих галузях намагаються створити такі моделі, що вміють виконувати лише якусь одну задачу, що значно зменшує її розмір. Але для функціонування із раціонально релевантною швидкістю потрібно щоб пристрій виконував обчислення на значно високій швидкості. Для вирішення цієї проблеми розробники зазвичай використовують одне із цих двох рішень – використання більш потужного оснащення або додати окремий обчислювальний центр, який буде виконувати лише одну задачу, що є подібним до застосування декількох ядер на процесорі у ПК для виконання більше процесів за одиницю часу.

Також є альтернативний підхід до виконання цієї задачі. Якщо у розробника є проблеми із застосуванням потужного обчислювального модуля на борту робота, то можна перенести ці обчислення на сторону хмарного сервера. Цей метод може надати значне покращення до конструкції системи, адже без потреби у потужних компонентах можна зменшити енергоспоживання системи, і

зменшення витрат живлення дозволяє зменшити об'єми приладів для здійснення зменшення температури. Але у такого методу також є свої обмеження. Найбільш важливими лімітуючим фактором є пропускна здатність використовуваного каналу зв'язку. Наприклад якщо використовувати камеру з розширенням 4к для збору візуальних даних то передати таке відео через WiFi на швидкості, що буде задовольняти потреби робота до оперативного реагування на зміни в оточенні не є можливим. Для вирішення такої проблеми можна використати окремий канал зв'язку, який зможе з цим працювати та не перешкоджати нормальній роботі мережі [24, 25].

Також значним обмеження такого способу керування є проблема затримки передачі даних. Адже будь-яка інформація що повинна надсилатися від точки А до точки Б, і вона не пройде цей шлях миттєво. І тому зі збільшенням відстані між відправником та отримувачем збільшується час доставки. І якщо цей час буде занадто великим то, робот не зможе вчасно зреагувати та підлаштуватися під оточення. [23].

Але, якщо основною метою розробки ж роботів ,що будуть дешевим та таким, що його можна виготовляти у промислових масштабах, то наразі компанії надають перевагу в бік виготовлення моделей що мають лише частину, що збирає лише візуальні дані. Керування такою системою відбувається людиною-оператором, що є навчена управлінню та, як наслідок може застосовувати у безлічі різних завдань (Рисунок 1.8) [26 - 28].



Рисунок 1.8. Крокуючий робот з напівавтоматичним керуванням RHIMO-2 [25]

## 1.6. Відомі обмеження та складнощі проєктування крокуючих роботів

До основних проблем у реалізації, що призводять до найбільших складнощів у розробці крокуючих-роботів відносяться такі фактори як складність конструкції, складність розробки алгоритмів керування та вибір правильного типу двигунів для актуаторів, що будуть здійснювати зусилля для руху і найбільш важливим фактором є ціна виробництва таких систем (Рисунок 1.9).

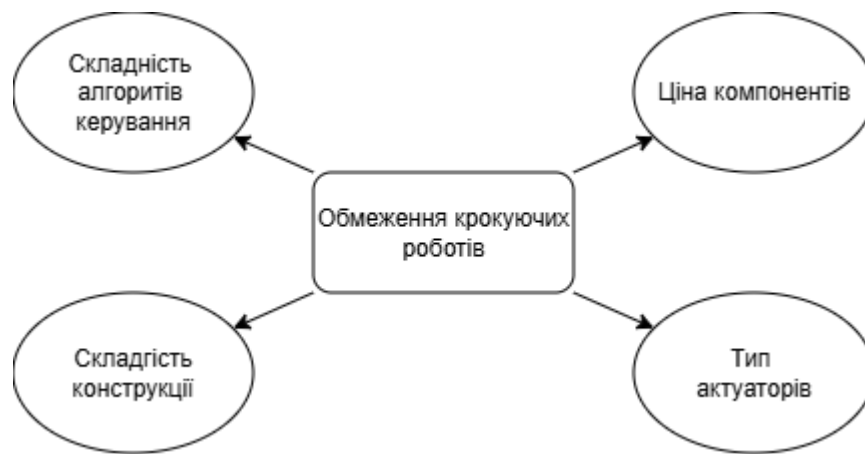


Рисунок 1.9. Основні обмеження крокуючих роботів

Крокуючі роботи наразі вважаються однією із найскладніших галузей приладобудування через велике теоретичне навантаження та поєднання у собі усіх поточних передових технологій електроніки, низькорівневої розробки та матеріалознавства. Оскільки для здійснення будь-яких задач, які передбачають точний рух маніпуляторів, чим фактично є ноги у роботів то потрібно мати детальну математичну модель керування, та електричних компонентів на які її можна записати. Також для досягнення повного автоматичного керування обов'язково потрібно мати алгоритми глибокого навчання будь-якої складності. Але основна проблема таких моделей у їхніх безпрецедентних витрат у обробувальних потужностей. Ця проблема є настільки значною що у деяких випадка є доцільним відмовитися від повністю автоматичного керування і зменшити його до рівня коли людина-оператор буде обирати напрямок руху, а

робот сам буде вираховувати як йому ставити ноги для досягнення цілі [29].

Також не менш значною проблемою є вибір двигунів для актуаторів, які будуть здійснювати рух робота. Основна проблема сучасних двигунів, що вони мають дуже низький показник відношення розміру та ваги до сили. Щоб вирішити цю проблему раніше використовувалися гідравлічні або пневматичні актуатори. Але з часом їхні недоліки стали очевидними: незважаючи на велику силу яку вони мають, для забезпечення навіть віддалено стабільної роботи робот потребував цілу команду інженерів для його обслуговування, через причину частих поломок. Згодом рішення змістилися у бік електричних двигунів. Але вони теж мають свої недоліки. Наприклад у порівнянні із гідравлікою вони мають замало сили. Також великим недоліком є складність виробництва якісних двигунів що призводить до збільшення їхньої ціни [30, 31, 15]

### 1.7. Формулювання задач дипломного проєкту

Зробивши огляд стану індустрії та провівши їх порівняння (Таблиця 1.1.) можна сформулювати технічне завдання проєкту.

Таблиця 1.1. Порівняння крокуючих роботів

| Модель      | Кількість кінцівок | Тип актуаторів | Тип стабільності | Сенсорна система / Зір                     | Ключова особливість                                  |
|-------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Weaver      | 6                  | Електричні     | Статична         | Комп'ютерний зір, SLAM, 5 DoF на ногу      | Висока маневреність та адаптація до рельєфу          |
| Unitree Go1 | 4                  | Електричні     | Динамічна        | 4D-LiDAR, камери, MQTT/Ethernet інтерфейси | Низька вартість (\$2700), доступність для досліджень |
| Atlas HD    | 2                  | Гідравлічні    | Динамічна        | Стереокамери, комплексовання даних         | Складні гімнастичні рухи, висока вага та шум         |

- 1) Робот повинен мати 6 ніг для забезпечення стабільності платформи.
- 2) Кожна кінцівка повинна мати 3 ступені свободи, але провівши детальніший аналіз компонентів для забезпечення цього, було прийнято рішення зменшити їхню кількість з 3 до 2. Це забезпечить меншу собівартість компонентів, адже для більш складної системи потрібно мати компоненти кращої якості.
- 3) Робот повинен мати просту систему комп'ютерного зору. Для проєкту буде достатньо забезпечити постійний відео потік для оператора, що забезпечить йому можливість виконувати задачі без потреби бути безпосередньо поряд.
- 4) Робот повинен мати можливість дистанційного зв'язку. Причому критично важливо, щоб оператору не було потрібно мати додаткового устаткування, для забезпечення каналу або це устаткування повинно бути легкодоступним і мати велику вірогідність, що воно вже у нього є.
- 5) Робот повинен мати можливість маніпулювати своїм центром маси відповідно до нахилу поверхні на якій він знаходиться, для забезпечення стабільності положення системи.
- 6) Робот повинен мати таку систему, що буде доповнювати можливості відео нагляду. Ця система повинна надавати додаткову область огляду та бути керованою оператором. Також її швидкість повороту повинна бути не менше ніж 2 об/хв.
- 7) Робот повинен працювати у автономному режимі щонайменше напротязі 30 хвилин.
- 8) Робот повинен мати систему динамічної індикації на своєму корпусі, що дає можливість інтуїтивного розуміння щодо поточних дій системи.
- 9) Робот повинен мати можливість увімкнення та вимкнення всієї своєї системи за допомогою кнопки, що буде знаходитися на його корпусі.
- 10) Робот повинен мати акумулятор для можливості поповнення заряду у вимкненому режимі роботи системи, без необхідності втручання у конструкцію.
- 11) Вага робота не повинна перевищувати 2 кілограм.

## Висновки до розділу 1

У першому розділі дипломної роботи було проведено ґрунтовне дослідження щодо становлення крокуючих роботів та їх сфери застосування. Були розглянуті основні приклади різноманітних типів крокуючих роботів. Це були моделі двоногих роботів такі як, Atlas HD та Atlas 3i. Також були розглянуті моделі чотириногих роботів, що наслідують свою поведінку від ссавців. Були розглянуті екстремальні варіанти конструкції такі, як одноногий робот, що пересувається замість крокування стрибками та восьминогий, який спеціально має більше ніг ніж потрібно для забезпечення статичної стабільності для можливості продовжувати роботу навіть після пошкоджень.

Додатково до цього, були розгляну методи впровадження комп'ютерного зору для надання можливості більш комплексного аналізу оточення та надання зворотного зв'язку оператору. У ході аналізу було знайдено, що комп'ютерний зір поділяють на рівні виходячи із кількості контексту, що можна отримати.

На основі цього аналізу я склав повноцінне технічне завдання, що визначає потрібні функціональні параметри разом із подальшими кроками, що будуть мати місце у процесі розробки прототипу робота-гекапода. До основних пунктів увійшли такі функціональні можливості як дистанційне керування, установлення примітивного комп'ютерного зору та визначення кількості ніг. Наступним етапом дипломного проєкту стане математичне визначення моделі робота для можливості здійснення осмисленого керування його положенням.

## **РОЗДІЛ 2. КІНЕМАТИКА СИСТЕМИ РУХУ**

Побудова адекватної кінематичної моделі є фундаментальним етапом проектування крокуючого робота. Математичний опис просторового положення ланок є необхідною умовою для реалізації алгоритмів стабільного та передбачуваного керування. Відсутність точного кінематичного аналізу унеможливорює вирішення задач прямої та зворотної кінематики, що є критичним для координації руху гексапода в умовах складного рельєфу.

### **2.1. Типові кінематичні схеми ніг крокуючих роботів**

Вибір топології ноги робота визначає основні характеристики системи, її складність управління габарити та конструкційні особливості. В сучасній робототехніці для крокуючих систем переважно розглядають дві основні архітектури: послідовну та паралельну.

#### **2.1.1. Послідовна кінематична структура**

Послідовна схема передбачає відкритий кінематичний ланцюг, де кожна наступна ланка з'єднується з попередньою за аналогією до «ланцюга» (Рисунок 1). Ці та подібні системи характеризуються значною гнучкістю та значним об'ємом робочої області. Використовуючи такі системи є дуже зручним виконання задач, коли потрібно дістатися до певної точки, адже існує безліч композицій даної кінцівки подібно до людської руки.[32]

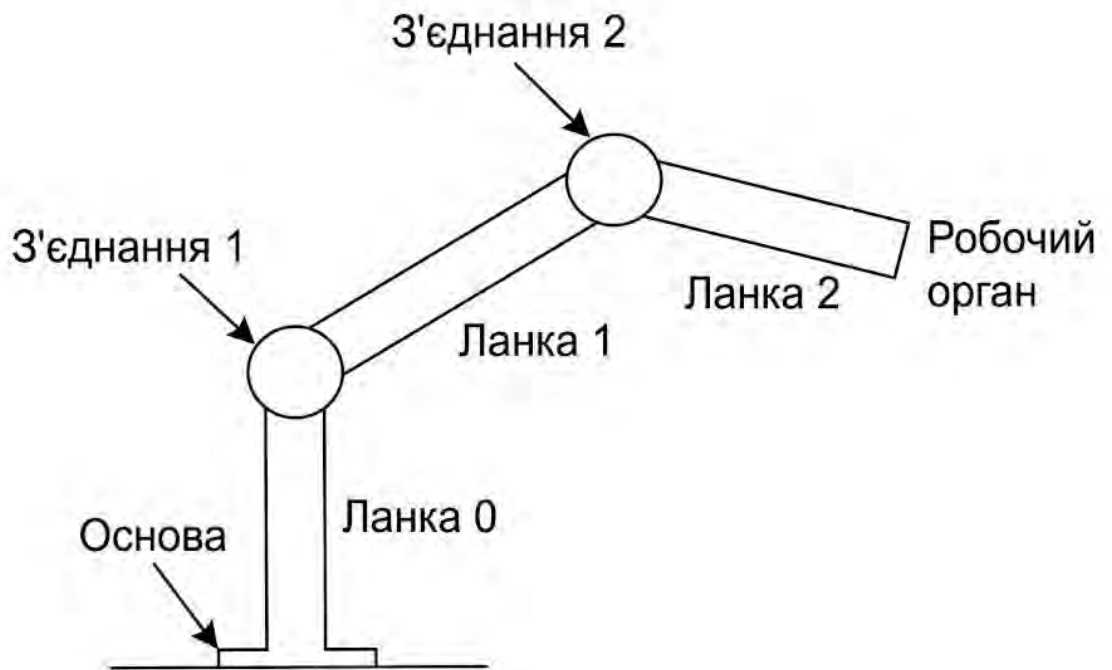


Рисунок 2.1. Типова послідовна кінематична схема кінцівки [32]

Головною перевагою такої схеми є відносна простота математичних формул, що допомагає у оптимізації обчислень. Але з основних недоліків є нерівномірне навантаження двигунів. Це відбувається внаслідок того, що останньому двигуну потрібно піднімати лише те навантаження яка потребує задача, а наступному вже потрібно підняти і навантаження і перший двигун з каркасом до нього. Іншим недоліком є те що у такій схемі похибки двигунів додаються один до одного, що призводить до ускладнень у забезпеченні точного керування роботом.

### 2.1.2. Паралельна кінематична структура

Паралельна схема базується на замкнених кінематичних ланцюгах, де декілька незалежних важелів одночасно керують одним робочим органом. Це здійснюється за допомогою підключення цих важелів до незалежних один від одного двигунів від чого і походить назва схеми, адже ці вони під'єднані «паралельно» відносно інших. Така структура забезпечує керування з дуже

низькою похибкою, адже вона фактично буде приблизно дорівнювати до похибки самого двигуна. Також це позбавляє недоліку послідовної схеми, де кожний наступний двигун повинен витримувати навантаження всієї структури, що йде після нього і натомість є можливість розподілити її рівномірно на всіх.

Прикладом ефективного застосування такої структури є мобільні дельта-роботи для сільськогосподарських потреб, які демонструють високу швидкість та точність маніпуляцій завдяки зосередженню маси в центрі системи [33].

Але до недоліків таких систем відноситься висока математична складність розв'язання прямої та зворотної кінематичної задачі та відносно велика обмеженість у робочій області, на відміну від послідовної де більшість обмежень виходять від фізичних обмежень самих двигунів. У паралельній схемі є великий ризик колізій ланок що може призвести до пошкодження всього обладнання. Також один із недоліків є те, що зі збільшенням ступенів свободи системи збільшується розмір несучої конструкції двигунів. І в деяких випадках така властивість може призвести до повної недоцільності використання такого робота взагалі.

Для мобільного гексапода з комп'ютерним зором вибір між цими схемами має базуватися на балансі між точністю позиціонування камери та енергетичними витратами на переміщення маси власних кінцівок.

## **2.2. Кінематична структура робота-гексапода**

Виходячи з аналізу у попередньому розділі була складена порівняльна таблиця (Таблиця 2.1.1).

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика кінематичних схем

| Критерій порівняння      | Послідовна кінематична схема            | Паралельна кінематична схема                    |
|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Геометрія ланцюга        | Відкритий кінематичний ланцюг           | Замкнений кінематичний ланцюг                   |
| Розташування приводів    | Розосереджене (на кожній рухомій ланці) | Зосереджене на основі (корпусі)                 |
| Математична складність   | Легка                                   | Складна                                         |
| Робоча зона              | Велика, забезпечує високу маневреність  | Обмежена через ризик колізії ланок              |
| Жорсткість конструкції   | Низька (через консольне навантаження)   | Висока (навантаження розподіляється паралельно) |
| Динамічні характеристики | Висока інерційність кінцівок            | Низька інерційність, висока швидкість           |
| Точність позиціонування  | Похибки кожного шарніра додаються       | Похибки усереднюються, висока повторюваність    |
| Маса кінцівок            | Значна (включає вагу двигунів)          | Мінімальна (лише вага важелів/тяг)              |

Аналіз даних таблиці дозволяє зробити висновок, що попри переваги паралельної схеми в аспекті жорсткості та точності, вона має суттєві обмеження для реалізації мобільної крокуючої платформи. Оскільки ключовою вимогою до робота-гексапода є висока маневреність та здатність до подолання складних перешкод, обмежений робочий простір паралельної схеми є критичним недоліком.

Особливу увагу слід приділити питанню компонування апаратного забезпечення. Оскільки кожна кінцівка гексапода повинна мати два ступені свободи, використання паралельної структури призвело б до надмірної концентрації приводів у центральній частині корпусу. Це створює суттєві конструктивні перешкоди для розміщення інших критично важливих модулів.

Враховуючи необхідність забезпечення балансу між вагою, маневреністю та вільним простором на платформі для інтеграції інтелектуальних систем, для даного проєкту було обрано послідовну кінематичну схему. Це рішення дозволяє максимізувати робочу зону кожної кінцівки, що є оптимальним для реалізації алгоритмів комп'ютерного зору.

### 2.2.1. Загальна схема розташування ніг

Для забезпечення статичної стабільності та рівномірного розподілу маси було прийнято октагональну форму платформи. Для уникнення зіткнення ніг під час руху, платформа буде видовжена у одному напрямку, що буде паралельний до напрямку руху.

Ноги будуть прикріплені перпендикулярно до 6 граней дзеркально по осі напрямку руху і збільшуватися за годинниковою стрілкою. Положення кожної ноги відносно корпусу визначається кутом  $C$ , який вказує на порядковий номер. Та довжиною  $s$ , яка визначає відстань від центру платформи.

Кути передніх ніг є  $45^\circ$  та  $315^\circ$ , для серединних ніг це будуть значення  $90^\circ$  та  $270^\circ$  і задні кінцівки будуть визначені кутами  $135^\circ$  та  $225^\circ$ . Довжини для передніх та задніх ніг будуть однаковими, але для серединних вони будуть коротшими, як наслідок витягнутої форми корпусу.

### 2.3. Геометрична модель однієї ноги робота

Згідно з технічними вимогами до проєкту, конструкція кожної опорної кінцівки гексапода базується на використанні двох активних приводів, що забезпечує системі два ступені свободи. Таке рішення дозволяє оптимізувати енерговитрати та масу робота, зберігаючи при цьому необхідну маневреність для переміщення по площині.

Для аналізу просторового положення кінцівки розроблено геометричну схему, представлену у двох проекціях (Рисунки 2.2 та 2.3).

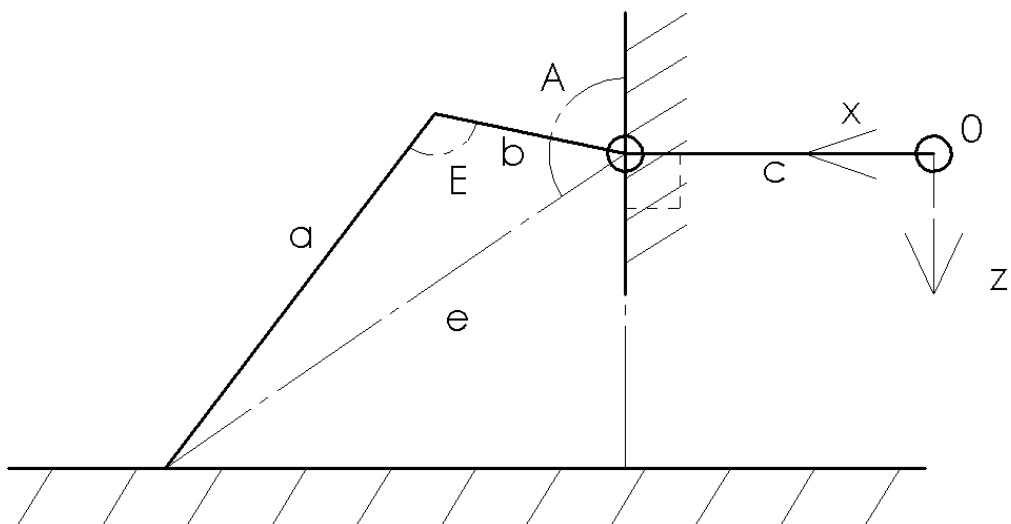


Рисунок 2.2 – Схема конструкції ноги, вид збоку.

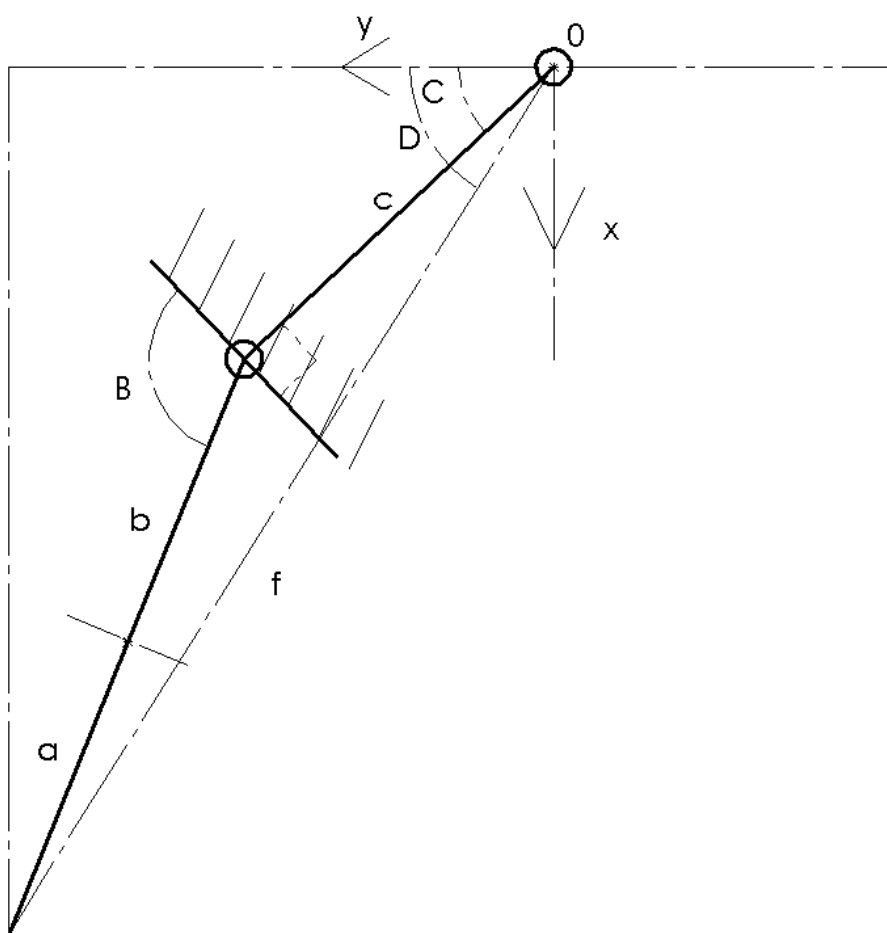


Рисунок 2.3. Схема конструкції ноги, вид зверху

Математичний опис стану системи базується на використанні узагальнених координат, де ключовими керованими параметрами є кути в активних шарнірах. Кут  $A$  визначає вертикальне відхилення ланок, регулюючи висоту підйому корпусу та кроку, тоді як кут  $B$  відповідає за горизонтальну орієнтацію кінцівки відносно точки її кріплення.

Важливу роль у моделі відіграє константний кут  $C$ , який характеризує кутову орієнтацію основи кожної ноги. Цей параметр забезпечує можливість трансформації локальних координат кінцівки у глобальну систему координат робота, де значення кута безпосередньо залежить від розташування та порядкового номера ноги на корпусі.

Відносне положення самих кутів до ланок, зумовлене конструкційними параметрами моделі прототипу, що буде описано у наступному розділі.

Фізичні характеристики конструкції представлені довжинами основних ланок  $a$  та  $b$ , а також величиною  $c$ , що позначає горизонтальний виніс точки кріплення від центральної осі системи. Поряд із реальними геометричними параметрами до моделі введено допоміжні віртуальні величини  $e$  та  $f$ , які виконують роль проміжних довжин для спрощення тригонометричних перетворень. Зокрема, параметр  $e$  позначає пряму відстань від шарніра до точки контакту з поверхнею, а  $f$  є проекцією кінцівки на горизонтальну площину.

Використання таких віртуальних величин дозволяє суттєво оптимізувати обчислювальну складність алгоритмів оберненої кінематики, що є критично важливим для забезпечення коректної роботи системи керування у реальному часі. Описана геометрична структура створює необхідний теоретичний фундамент для подальшої розробки алгоритмів стабілізації та автономної навігації гексапода.

## **2.4. Пряма кінематика однієї ноги**

Для визначення робочої зони окремої ноги робота потрібно визначити її пряму кінематику. Суть цього визначення полягає у визначенні позиції всередині

системи координат, маючи у якості вхідних параметрів фізичні довжини ланок та кути, що застосовані до них. У нашому випадку координати які ми будемо шукати відносяться до декартової системи координат. Для виконання цієї задачі ми скористаємося геометричним підходом, що полягає у представленні ноги, як набір геометричних фігур з відповідними властивостями.

Для початку нам потрібно визначити довжини  $f$  та  $e$  для спрощення подальших розрахунків.

Довжину  $e$  можна визначити з трикутника, зі сторонами  $a$  та  $b$  і кутом між ними  $E$ . Тоді використавши теорему косинусів маємо:

$$e = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos E \quad (2.1)$$

Також, якщо ми визначимо що довжина  $f$  є частиною трикутника зі стороною  $c$  та стороною що є проекцією довжини  $e$  на площину  $xu$  тоді її можна визначити як:

$$f = (e \sin(180 - A))^2 + c^2 - 2(e \sin(180 - A))c \cdot \cos(180 - B) \quad (2.2)$$

І якщо ми використаємо формули зведення тригонометричних функцій тоді:

$$f = (e \sin(A))^2 + c^2 + 2(e \sin(A))c \cdot \cos(B) \quad (2.3)$$

Тепер, маючи ці довжини ми можемо перейти до визначення координат. Для початку ми визначити координату  $z$ , як катет прямокутного трикутника із гіпотенузою  $e$ . Тоді для кінцевого визначення потрібно отримати кут, що є суміжним до кута  $A$ . Тоді  $z$  дорівнює:

$$z = e \cdot \cos(180 - A) \quad (2.4)$$

Або:

$$z = -e \cdot \cos A \quad (2.5)$$

Для визначення координат  $x$  та  $y$ , можна представити їх як катети прямокутного трикутника із гіпотенузою  $f$  та кутом  $D$ . Сам кут можна визначити як суму кута, протилежного до проекції довжини  $e$  на площину  $xu$  та кута, що визначає порядковий номер ноги  $C$ . Тоді згідно теореми синусів маємо:

$$D = C + a \sin \left( \frac{\sin(180 - B) \cdot e \sin(180 - A)}{f} \right) \quad (2.6)$$

Або:

$$D = C + a \sin \left( \frac{\sin B \cdot e \sin A}{f} \right) \quad (2.7)$$

Тепер можна представити координати  $x$  та  $y$  як:

$$x = f \cdot \sin D \quad (2.8)$$

$$y = f \cdot \cos D \quad (2.9)$$

Таким чином ми визначили пряму кінематику окремої ноги у контексті всього робота, і ми можемо визначити робочу її робочу область.

## 2.5. Зворотна кінематика однієї ноги

У попередньому розділі ми визначили пряму кінематику ноги робота, і наступним кроком є визначення його оберненої кінематики, результати якої

будуть використані при створенні алгоритму керування. Суть задачі оберненої кінематики полягає у визначенні кутів положення ланок маючи у розпорядженні довжини та координати точки у яку ми хочемо поставити ногу.

Оскільки наша нога передбачає лише 2 ступеня свободи то достатнім є визначення кутів А та В.

Опираючись на раніше виведені довжини е (2.1) спочатку можна визначити значення кута А:

$$A = 180 - a \cos\left(\frac{z}{e}\right) = a \cos\left(-\frac{z}{e}\right) \quad (2.10)$$

Опираючись на визначення кута А можна визначити кут В із визначення довжини е:

$$B = a \cos\left(\frac{f - (e \sin A)^2 - c^2}{2 \cdot e \sin(A) \cdot c}\right) \quad (2.11)$$

Таким чином, ми отримали набір функцій, що описують переміщення ноги робота-гексапода у вигляді рішення завдання оберненої кінематики.

## 2.6. Кінематична модель робота в цілому

Кінематична модель робота складається із 6 ніг. Але для здійснення керування переміщенням потрібно мати метод для їх відокремлення. Це здійснюється завдяки визначенню кута С.

Всі методи керування руху зводяться до практично однакової задачі: визначення схем координат для переміщення кожної окремої кінцівки. Це реалізовується за допомогою визначення функції що буде визначати положення кожної ноги напротязі певного часового відрізка.

Також для забезпечення стабільного положення на похилих поверхнях потрібно застосовувати поправку до положення ніг за допомогою інерціального вимірювального модуля.

## 2.7. Методи формування основних типів ходи робота-гексапода

Всі схеми ходи робота-гексапода складаються із циклу перестановки ноги. В залежності від того, з якою періодичністю кожна нога здійснює свій цикл перестановки, змінюється тип оди самого робота. Сам цикл перестановки складається з 3 фаз: підняття ноги, перестановка її в опорне положення та прикладання зусилля для переміщення (Рисунок 2.) [34].



Рисунок 2.4. Схема циклу перестановки ноги [34]

### 2.7.1. Триподна хода

Триподна хода є однією із 3 щ найчастіше зустрічаються у природі серед організмів із великою кількістю ніг. Її основна особливість серед інших типів є швидкість та маневреність. Цей тип ходи зустрічається переважно серед шестиногих комах, що добре підходить для робота гексапода, адже у нього теж передбачається 6 ніг у конструкції.

Його суть полягає у розділенні ніг на дві групи по три ноги, де вони працюють у синхронно та у протифазі, тобто протилежно один до одної. Це можна

побачити підчас самої ходи, в один момент група з 3 трьох перебуває у фазі підйому ноги, коли інша група у фазі прикладання зусилля, і навпаки коли перша група у фазі прикладання зусилля друга у фазі підйому. (Рисунок 2) [34, 35].

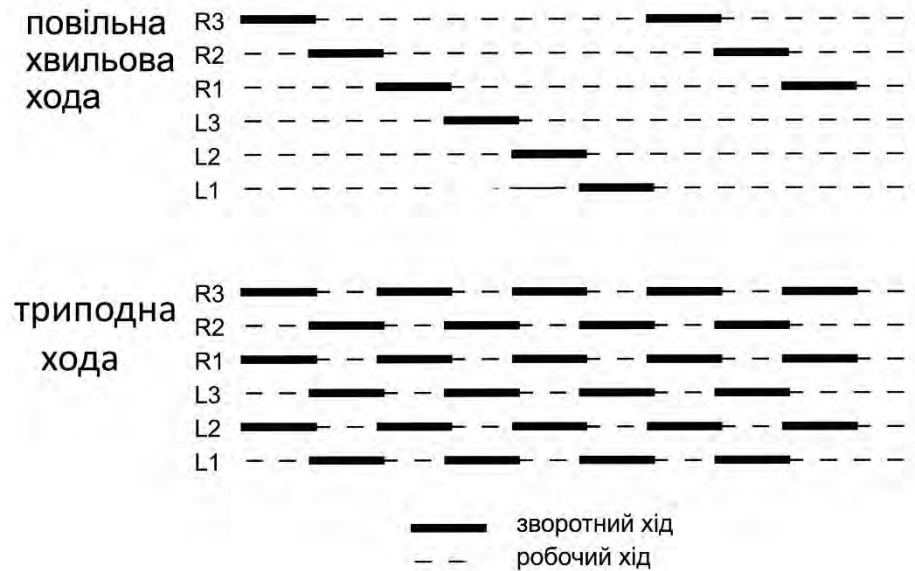


Рисунок 2.5. Типи ходи що найчастіше зустрічаються серед комах [35]

### 2.7.2. Хвильова хода

Хвильова хода є другою за поширеністю серед комах і найчастіше зустрічається серед комах з великою кількістю ніг. Вона є набагато повільнішою ніж триподна, але відрізняється дуже великою стабільністю переміщення. На відміну від триподної схеми там де в один момент працює група ніг, у хвильовій за раз пересувається лише одна нога і фаза прикладання зусилля відсутня, тобто рух такого робота є продуктом сумарного переміщення всіх кінцівок на один крок [35].

### 2.7.3. Поворот на місці та зміна напрямку руху

Поворот на місці для триподної схеми ходу, досягається шляхом віддзеркалення руху деяких кінцівок у межах однієї групи таким чином, що

ззовні це виглядає як переміщення кінцівок за або проти годинникової стрілки, в залежності від напрямку повороту.

Зміна напрямку руху досягається повним віддзеркаленням руху всіх кінцівок. Таким чином можна обирати коли потрібно рухатися вперед або назад. [35, 36].

## 2.8. Оцінювання статичної стійкості робота під час руху

Статична стійкість робота-гекспода, визначається тим як близько проекція центру маси всієї є до центру багатокутника, що утворюється із точок дотику ніг до поверхні (Рисунок 2.6.). Якщо центр мас знаходиться поза межами цього багатокутника, платформа не є стабільною та може перекинутися. Якщо центр знаходиться на межі, то він може залишатися стабільним лише при застосуванні динамічної стабільності, що потребує алгоритмів із адаптивними можливостями до балансування [34].

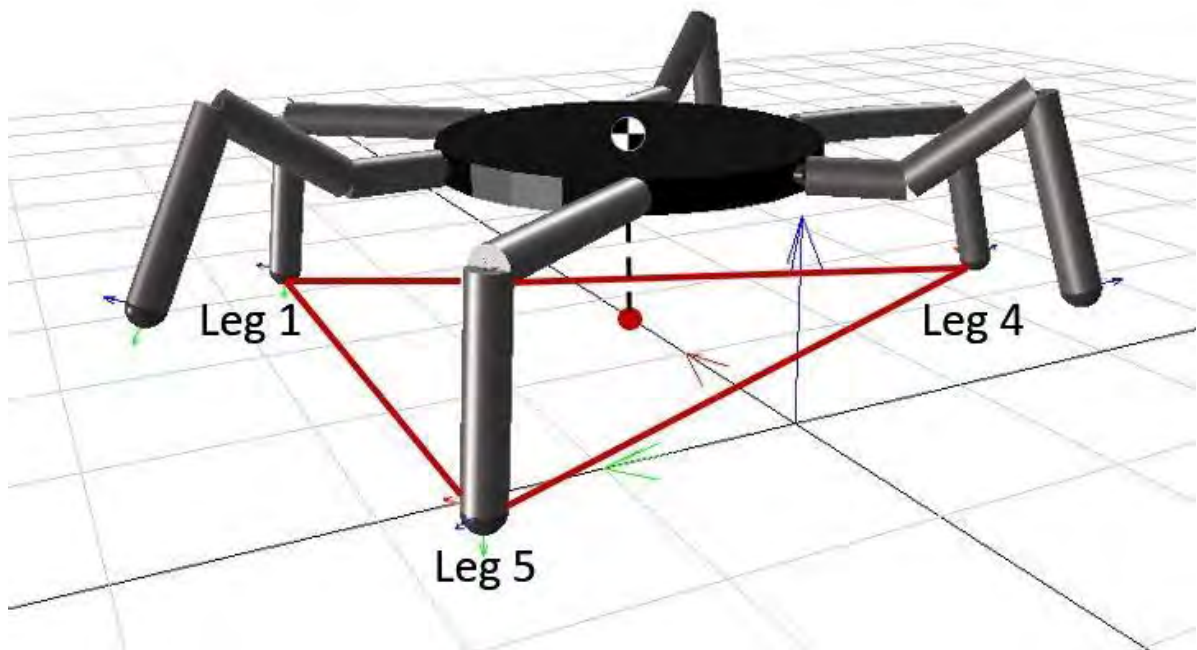


Рисунок 2.6. Зображення підтримуючого полігона робота [34]

## 2.9. Визначення робочих кутів, переміщень і кінематичних обмежень приводів

Для визначення робочих кутів ніг робота-гексапода, потрібно перейти від теоретичних координат до реальних обмежень сервоприводів та реальних параметрів кінцівок.

Для початку потрібно визначати робочі кути сервоприводів. Зазвичай цей вид двигунів має кут роботи від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Також потрібно мати на увазі той факт, що використовувати повний робочий кут не є безпечним для конструкційної цілісності і зазвичай використовується менший кут. Наприклад для нашого випадку можна використати робочий кут від  $10^\circ$  до  $170^\circ$ .

Це також виразити таким виглядом:

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}, \quad (2.12)$$

Де  $\theta$  – поточний кут,  $\theta_{\min}$  – нижня границя кута,  $\theta_{\max}$  – верхня границя кута

Далі, наступне обмеження виражається досяжністю ноги. Цей параметр обмежується величинами  $a$ ,  $b$  та  $c$ . Оскільки кінцівки мають лише 2 ступеня свободи робоча зона виглядає як поверхня кулі із радіусом  $e$  (2.1).

Додатковим фактором є просторові обмеження горизонтального маневрування. Для запобігання зіткнень між сусідніми кінцівками робота під час повороту на місці або крабового ходу вводяться взаємозалежні програмні ліміти. Максимальний кут відхилення ноги від нейтрального положення не повинен перевищувати половини кутової відстані між осями кріплення ніг на корпусі, що математично гарантує відсутність перетину робочих зон суміжних кінцівок у будь-якій фазі циклу ходи. [34 - 37].

## 2.10. Використання даних інерціального сенсора для корекції положення корпусу

Для забезпечення стабільного положення корпусу під час пересування потрібно використати данні із модуля гіроскопа акселерометра. Ця задача включає в собі 2 основні частини: отримання даних із модуля та використання цих даних у кінематичних рівняннях [38].

Модуль гіроскопа-акселерометра дає можливість визначити такі параметри робота: його крен та тангаж. Використовуючи їх, можна визначити нормальну площину до гравітації.

Стандартна форма формули площини:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2.13)$$

Де

$$A = \cos(-roll) \cdot \sin(-pitch) \quad (2.14)$$

$$B = -\sin(-pitch) \quad (2.15)$$

$$C = \cos(-roll) \cdot \cos(-pitch) \quad (2.16)$$

Де коефіцієнт D дорівнює від'ємному значенню бажаної дистанції до землі.

Далі щоб застосувати цю формулу площини необхідно підібрати такі значення  $x$ ,  $y$ ,  $z$  щоб результат обчислення дорівнював 0. Але оскільки у нас згідно оберненої кінематики значення  $x$  та  $y$  знаходяться, то можна знайти лише координату  $z$  за допомогою рішення лінійного рівняння, що буде мати вигляд:

$$z = -\frac{Ax + By + D}{C} \quad (2.17)$$

Таким чином у нас є метод для реагування на похилість поверхні та зберігання стабільності при зміщенні центру мас робота до краю опорного багатокутника.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломного проєкту, була вирішена задача визначення способу переміщення робота-гексапода. Це досягалося шляхом визначення задачі прямої кінематики для установлення робочої зони та методу перевірки правильності відповідності кутів ноги до координат двигуна. Потім було визначення рівняння оберненої кінематики, які повинні у майбутньому використовуватися безпосередньо всередині алгоритму перестановки ніг.

Також було розглянуто типи ходи для досягнення оптимального результату. У ході аналізу обговорювалися два типи ходи хвильовий та триподний. Вони обоє наслідуються від комах та мають свої переваги та недоліки. У кінці було прийнято рішення використовувати триподний тип ходи завдяки його перевазі у швидкості перед хвильовою яка має перевагу у стабільності. Потім для покращення аспекту стабільності положення платформи, у ході аналізу чого було виявлено, що достатнім критерієм є зберігання центру мас робота всередині багатокутника, що складається із опорних точок. І результатом стали набір функцій, що використовують данні IBM для створення нормальної площини до поверхні на якій стоїть робот, що можна використовувати для корекції положення під час знаходження на похилих поверхнях.

Всі розрахунки проводили у контексті ноги із двома ступенями свободи. Була проведена конкретизація геометрії місця положення двигунів всередині її. Також було розглянуто типи конструкції кінцівок для досягнення оптимального результату. У ході аналізу обговорювалися два основні типи: паралельна конструкція, та послідовна, після чого обрали послідовний за рахунок можливості до спрощення конструкції та уникнення концентрації кількості двигунів всередині корпусу.

У наступному розділі буде проведено розробку електричної підсистеми та підбору двигунів для подальшого створення прототипу.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ

### 3.1. Розробка структурної та функціональної схеми електричної підсистеми робота

Провівши, аналіз кінематики робота-гексапода, відповідно до технічного завдання, було створено структурну схему (Рисунок 3.1) та функціональну схему (Додаток А).

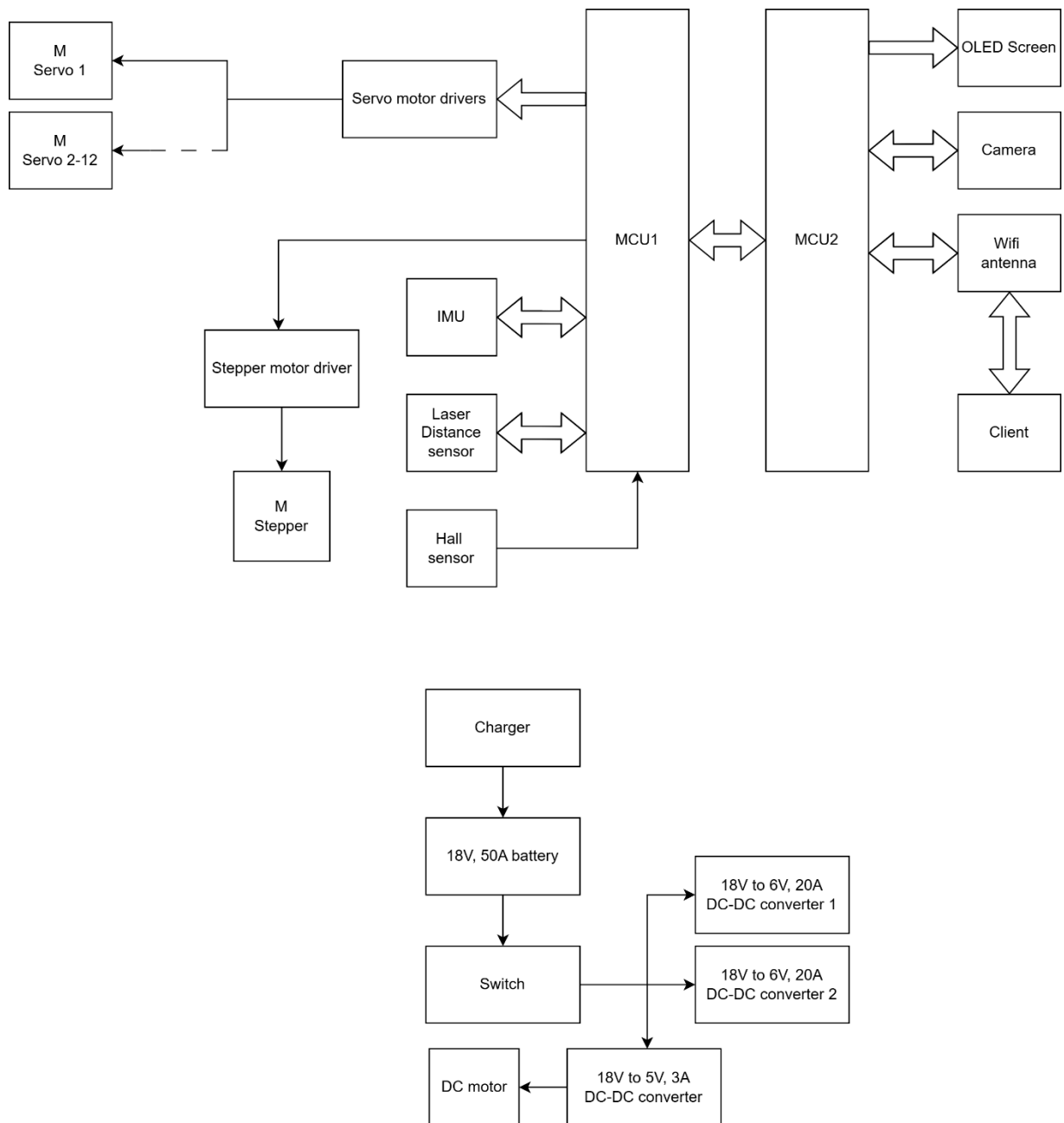


Рисунок 3.1. Структурна схема робота-гексапода

На вище згаданих схемах видно, що система складається із 2-ох мікроконтролерів, камери, 2-ох драйверів сервоприводів, інерціального вимірювального модуля, датчика відстані та OLED дисплея. Також ця система має зв'язок через локальну мережу WiFi із клієнтом. Як видно із функціональної схеми (Додаток А), два мікроконтролери мають двостороннє підключення через UART протокол передачі даних. Це зумовлено необхідністю мати зв'язок між ними при умові, що обидва мають свою частоту роботи що робить неможливим використання синхронних протоколів передачі даних таких як I2C та SPI, навідміну від обраного, який є асинхронним.

Далі, до одного мікроконтролера підключено через протокол I2C камеру та OLED дисплей, і до іншого – драйвери керування двигунами та датчики дистанції, ефекту Хола та IBM. Це розділення зумовлене необхідністю ефективного розподілення обчислювальних ресурсів для забезпечення стабільної роботи робота. Наприклад, для одного контролера підключені камера, дисплей та WiFi зв'язок по причині відсутності їхньої потреби для безпосереднього здійснення руху, а лише для інформування оператора. В свою чергу, на іншому контролері підключені датчики одометрії, по причині їхніх безпосередньої потреби у регулюванні положення під час руху і відповідного керування драйверами двигунів. Також камера була встановлена на іншому мікроконтролері, по причині великого обчислювального навантаження, і тому для неї буде обрано такий, що буде мати 2 ядра для відокремлення цієї задачі від роботи загальної системи [39].

### **3.2. Обґрунтування вибору інерціального сенсора**

Для реалізації функції збору інформації для відстеження положення та прискорення у тривимірному просторі потрібно обрати інерціальний вимірювальний модуль. І тому для остаточного вибору було підібрано 3 кандидати: MPU-6050 [40], MPU-9250 [41] та BMI160 [42] та складена

порівняльна характеристика (Таблиця 3.1).

Таблиця 3.1. Порівняльна характеристика ІВМ

| Характеристика                           | MPU-6050 [40]                                                        | MPU-9250 [41]                                                                                     | BM160 [42]                                                                |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Кількість осей                           | 6 осей (акселерометр + гіроскоп)                                     | 9 осей (акселерометр + гіроскоп + магнітометр)                                                    | 6 осей (акселерометр + гіроскоп)                                          |
| Роздільна здатність АЦП                  | 16 біт                                                               | 16 біт                                                                                            | 16 біт                                                                    |
| Діапазони осей                           | Гіроскоп: 250, 500, 1000, 2000 град/с<br>Акселерометр: 2, 4, 8, 16 g | Гіроскоп: 250, 500, 1000, 2000 град/с<br>Акселерометр: 2, 4, 8, 16 g<br>Магнітометр: 4800 $\mu$ T | Гіроскоп: 125, 250, 500, 1000, 2000 град/с<br>Акселерометр: 2, 4, 8, 16 g |
| Підтримування інтерфейсів передачі даних | 400 кГц I2C                                                          | 400 кГц I2C та 20 МГц SPI                                                                         | 1 МГц I2C та 10 МГц SPI                                                   |
| Споживання струму                        | 3.9 мА                                                               | 3.5 мА                                                                                            | 0.925 мА                                                                  |
| Робоча напруга                           | 2.375В – 3.46В                                                       | 2.4В – 3.6В                                                                                       | 1.71В – 3.6В                                                              |

Було обрано модуль інерціального сенсору BM160, тому що він:

- 1) Має значно менше споживання струму ніж його конкуренти.
- 2) Має більший діапазон вимірювання кутового положення.
- 3) Має I2C інтерфейс із значно більшою частотою роботи.

У використанні в роботі-гексаподі буде використаний модуль із використанням даної мікросхема, для більш гнучкого розміщення в середині корпусу та вбудованого понижувача прямого струму із 5В до 3.3В (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.2. Модуль ІВМ на основі мікросхеми BM160

### **3.3. Обґрунтування вибору сервоприводів системи руху**

#### **3.3.1. Розрахунок кількості приводів для гексаподної конструкції**

Виходячи із технічного завдання та геометрії кінцівки описаної у 2 розділі, для забезпечення 2 ступенів свободи потрібно мінімум 2 двигуни на кожний тип руху. Зважаючи, що для забезпечення статичної стабільності було вирішено використовувати 6 ніг. Тому сумарно для всі кінцівок потрібно 12 двигунів.

#### **3.3.2. Визначення вимог до крутного моменту сервоприводів та їх кутового діапазону**

Згідно технічного завдання ми визначили що сумарна маса робота не повинна перебільшувати 2 кілограмів. Також ми встановили використання триподної схеми руху, що значить що в один момент часу платформу повинно підтримувати мінімум 3 ноги. Тож мінімальні критерії для двигуна повинні забезпечувати підтримку мінімум третини всієї ваги робота, і для створення конструктивного запасу бажано обирати параметри що можуть витримати  $2/3$  ваги робота. Також для забезпечення розрахованої робочої зони кожної ноги потрібно обирати сервоприводів із робочим кутом мінімум  $180^\circ$ .

#### **3.3.3. Обґрунтування вибору сервоприводів**

Під час вибору серводвигуна було підібрано 3 кандидати за їхню приблизну схожість та близькість до потрібних характеристик. Це MG996r [43], DS5180 [44] та DS3218 [45]. Для проведення аналізу була створена порівняльна таблиця 3.2.

Проведенні аналізу було виявлено, найкращим варіантом є сервопривод DS3218. Він має найменшу характеристику споживання струму з оптимальним моментом сили, але використовуватися буде сервопривод MG996r, з огляду на раціональне використання ресурсів.

Таблиця 3.2. Порівняльна характеристика сервоприводів

| Характеристика             | MG996r [43] | DS5180 [44]   | DS3218 [45]   |
|----------------------------|-------------|---------------|---------------|
| Робоча напруга             | 6 В         | 8.4 В         | 7.2 В         |
| Момент сили                | 11 кг/см    | 105 кг/см     | 21 кг/см      |
| Робочий струм              | 1 А         | 2 А           | 800 мА        |
| Кут повороту               | 180°        | 180° або 270° | 180° або 270° |
| Вага                       | 55 грам     | 60 грам       | 158 грам      |
| Максимальна частота роботи | 50 Гц       | 330 Гц        | 330 Гц        |



Рисунок 3.3. Сервопривод MR996r [43].

При умові, що довжина плеча кінцівок не буде перебільшувати 12 см то можна отримати такий момент сили:

$$F = \frac{11\text{кг} / \text{см}}{12\text{см}} = 0.91\text{кг} \quad (3.1)$$

З чого видно що двигун може витримати приблизно половину теоретичної маси робота, і тому його було обрано як компромісний варіант між мінімальним та бажаним забезпеченням характеристик.

### 3.4. Обґрунтування вибору модулів керування сервоприводами

Для забезпечення керування сервоприводами потрібно підібрати модуль драйвера, що може генерувати ШІМ сигнал потрібної частоти та може надати потрібне живлення кожному серводвигуну, або досягнути цього з використанням 2 чи 3 однакових драйверів, що будуть підключені паралельно. У ході аналізу було знайдено лише один модуль з характеристиками PCA9685 [46] (Рисунок 3.4), що є близьким до потрібних і є раціональним вибором з точки зору використання ресурсів.



Рисунок 3.4. Багатоканальний драйвер сервоприводів PCA9685 [46].

Технічні характеристики [46]:

- Має 12-бітну точність генерації ШІМ сигналу на каналах
- Має вбудований частотний генератор, що може працювати у діапазоні від 24 Гц до 1526 Гц
- Підтримує роботу через протокол I2C
- Має робочий діапазон напруги для сервоприводів від 2.3В до 6В
- Має 16 незалежних ШІМ каналів
- Робоча напруга мікросхеми 5В
- Робочий струм мікросхеми 3 мА

### 3.5. Обґрунтування вибору сенсора дистанції

Для виміру дистанції платформи до поверхні, щоб мати можливість керування цим параметром було підібрано 3 кандидати: VL53L0X [47], VL53L4CD [48] та TFM8801 [49] та для більш детального аналізу було складена таблиця характеристик (Таблиця 3.3).

Таблиця 3.3. Порівняльна характеристика датчиків дистанції

| Характеристика           | VL53L0X [47]                            | VL53L4CD [48]                           | TFM8801 [49]                            |
|--------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Діапазон вимірювання     | До 2 метрів                             | До 1.2 метрів                           | Від 20 мм до 2.5 метрів                 |
| Метод вимірювання        | Невидимий лазер з довжиною хвилі 940 нм | Невидимий лазер з довжиною хвилі 940 нм | Невидимий лазер з довжиною хвилі 940 нм |
| Кут огляду               | 25°                                     | 18°                                     | 37°                                     |
| Інтерфейс передачі даних | 400 Гц I2C                              | 1 МГц I2C                               | 1 МГц I2C                               |
| Частота замірів          | 33 мс                                   | 10 мс                                   | 33 мс                                   |
| Робоча напруга           | Від 2.6 В до 3.5 В                      | Від 2.6 В до 3.5 В                      | Від 2.7 В до 3.3 В                      |
| Робочий струм            | 19 мА                                   | 24 мА                                   | 32 мА                                   |

Після порівняльного аналізу було обрано використовувати VL53L0X, через його енергоефективність та відносну велику дальність замірів та куту огляду.

Безпосередньо у пристрої буде використано модуль на основі цієї мікросхеми із вбудованим понижувачем струму від 5В до 3.3В для спрощення підключення живлення та встановлення (Рисунок 3.5).

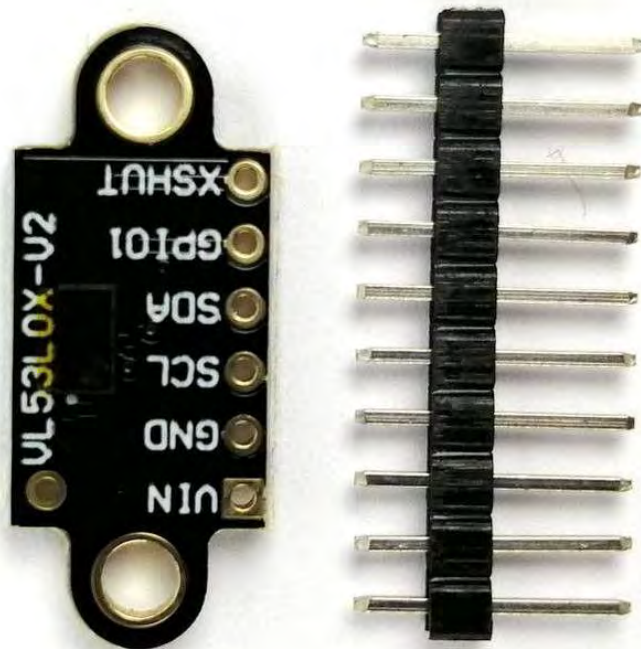


Рисунок 3.5. Модуль лазерного датчика дистанції на основі схеми VL53L0X

### 3.6. Електрична підсистема вузла повороту камери

Для створення електричної системи вузла повороту камери було вирішено використовувати кроковий двигун 28BYJ-48 (Рисунок 3.7) завдяки його відносно малим габаритам. Також для здійснення керування цим двигуном був обраний модуль комплекту підсилювачів напруги ULN2003 (Рисунок 3.6) завдяки його можливостям до роботи із високими струмами.

Технічні характеристики ULN2003 [50]:

- Максимальна робоча напруга 50В
- Максимальний робочий струм на один канал 500 мА
- Має 7 паралельно підключених робочих канали
- Мають можливість роботи із керуючими струмами 5В
- Робочий струм 1.35 мА

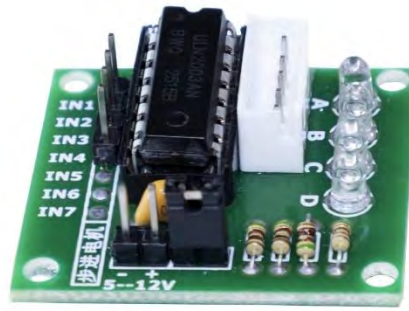


Рисунок 3.6. Набір ключів підсилення струму ULN2003

Технічні характеристики 28BJY-48 [51]:

- Робоча напруга 5В
- Номінальний робочий струм 100 мА
- Номінальний момент сили 0.35 кг/см
- Максимальна робоча частота до 1000 Гц
- Максимальна швидкість повороту 15 об/хв.



Рисунок 3.7. Кроковий двигун 28BJY-48

Також для можливості відстеження стартового положення було прийнято використовувати датчик ефекту Хола на корпусі робота із магнітом на башті. Для цього було вирішено використовувати датчик SS41F (Рисунок 3.8).

Технічні характеристики SS41F [52]:

- Діапазон робочої напруги від 4.5В до 24В
- Робочий струм 25 мА



Рисунок 3.8. Датчик ефекту Хола SS41F

### 3.7. Обґрунтування вибору OLED дисплея

Для відображення базової інформації для оператора, згідно технічного завдання потрібно підібрати дисплей для виконання цієї функції. Тому було підібрано дисплей моделі SSD1306 [53].

Характеристики SSD1306 [53]

- Розмір дисплея: 128 на 64 пікселів
- Інтерфейс роботи: 400 Гц I2C
- Робоча напруга: 5 В
- Робочий струм: 15 мА



Рисунок 3.9. Модуль OLED дисплея SSD1306

### 3.8. Обґрунтування вибору мікроконтролерів

Було обрана плата розробника ESP32-CAM, на основі мікроконтролера ESP32 що буде відповідати за відео ефір та підтримку зв'язку з користувачем тому що він має данні якості:

- 1) Має вбудований модуль WiFi, що надає канал зв'язку.
- 2) Має 2 ядра, що дозволяє розділити навантаження необхідності обробляти відео ефір та тримати зв'язок.
- 3) Має вбудовану підтримку модуля камери OV2640, що забезпечує надійне підключення та готове програмне забезпечення у вигляді відповідних бібліотек
- 4) Має суттєву програмну підтримку, завдяки великій кількості готових бібліотек для різних модулів та ситуації від розробника та спільноти.

Технічні характеристики [54]:

- Двоядерний 32-бітний процесор Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 MHz
- 448 КБ ROM, 520 КБ SRAM та 16 КБ SRAM в модулі RTC
- Підтримка стандартів 802.11 b/g/n (2.4 GHz) зі швидкістю передачі даних до 150 Mbps
- Наявність 48 виводів GPIO, які підтримують до 18 каналів 12-бітного АЦП, 2 канали 8-бітного ЦАП, а також інтерфейси SPI, I2C, I2S та UART.
- Режими живлення Active, Modem-sleep, Light-sleep, Deep-sleep, Hibernation, де струм споживання у режимі глибокого сну становить від 10 до 25  $\mu$ A
- Піковий робочий струм 260 мА
- Робоча напруга 5В з вбудованим понижувачам до 3.3В

Було обрано плату розробника на основі мікроконтролера STM32F103C8T6, що буде відповідати за виконання команд руху, збору даних із датчиків та їх

оброблення та прямого керування кінцівками робота тому що він має:

- 1) Велику підтримку від спільноти розробників
- 2) Має 2 інтерфейсу I2C, що дозволяє відокремити керування двигунами від іншої одометрії, адже це призведе до значних шумів на шині даних. Що виведе із ладу датчики.
- 3) Має вбудовані можливості використання переривань на програмному рівні, що дозволяє підтримувати декілька задач одночасно, наприклад як очікування команди через UART та виконання команди руху.
- 4) Програмне забезпечення CubeIDE для написання коду керування надає інструменти для дебагу у реальному часі, та дозволяє редагувати стандартні команди програми запуску до рівня на якому можна вручну побітово керувати пам'яттю.

Технічні характеристики [55]:

- 32-бітний мікропроцесор Arm Cortex-M3, з тактовою частотою до 72 MHz
- 64 КБ FLASH, 20 КБ SRAM
- Має 37 виводів GPIO, два інтерфейси I2C, три інтерфейси UART, два інтерфейси, один інтерфейс USB 2.0 та один SPI.
- Два 12-бітних АЦП де у кожного є 16 каналів.
- Робочий струм 150 мА
- Робоча напруга 5В з вбудованим понижувачем до 3.3В

### **3.9. Розрахунок енергоспоживання робота**

#### **3.9.1. Розрахунок споживання сервоприводів**

Згідно технічних характеристик сервоприводу MG996r номінальний робочий струм дорівнює 500 мА, але при повному навантаженні він може піднятися до 1 А. також потрібно пам'ятати про пусковий струм двигуна що

зазвичай є у 2.5 разів більшим за робочий, тобто 2.5 А.

Було установили що для всієї конструкції потрібно 12 сервоприводів тому загальне споживання буде дорівнювати:

$$I_{серво} = \sum_{i=1}^{12} I_{сервоi} = 12 \text{ А},$$

і якщо врахувати коефіцієнт пікового споживання:

$$I_{серво \max} = I_{серво} \cdot 2.5 = 30 \text{ А},$$

що є чималим і буде необхідність підбору акумулятора з великим робочим струмом.

### 3.9.2. Розрахунок сумарного споживання

З технічних характеристики датчиків та мікроконтролерів та врахувавши пусковий струм крокового двигуна 28BJY-48 можна дізнатися сумарне споживання системи, що буде дорівнювати

$$I = \sum_{+I_{28BJY} \cdot 2.5 + I_{SS41F} + I_{OLED} + I_{ESP} + I_{STM}} I_{ком} = I_{BMI} + I_{серво} + 2I_{PCA9685} + I_{VL53} + I_{ULN} + = 30.73 \text{ А}$$

## 3.10. Обґрунтування вибору підсистеми живлення

Перш за все потрібно підібрати правильне джерело живлення. Після проведення аналізу було прийнято рішення використовувати збірку із 16 нікель-кадмієвих акумуляторів ємністю 4000 мА\*г, що при раціональному використанні може надати живлення для роботи на приблизно 20 хв [56].

Далі потрібно понизити на розділити вхідну напругу із акумулятора. У даній збірці номінальна напруга дорівнює 1.2 то кінцева напруга дорівнює  $1.2 \times 16 = 19.2 \text{ В}$ . Оскільки споживання всієї схеми робота є значно меншою чим сумарне поживання сервоприводів було прийнято рішення розділити живлення на 2 вітки. Перша вітка складається із понижувача прямого струму на базі схеми LM2596. Оскільки вона має максимальний пропускний струм 3 А, то буде

використовуватися для надання живлення схемі при пониженні до напруги 5 В [57].

Для живлення серводвигунів було використано понижувачі прямого струму на базі схеми TPS40057. Але оскільки Одна така схема не може пропускати більше 15 А, то було прийнято рішення використати 2 такі схеми, по одній на половину сервоприводів. Також вони були налаштовані на пониження до 6 В, для отримання максимального моменту сили від сервоприводів [58].

### **Висновки до розділу 3**

У ході виконання третього розділу дипломного проєкту було вирішено задачу із створення структурної схеми та функціональної схеми (Додаток А). На їх основі було підібрано мікроконтролери та модулі для забезпечення виконання всіх функцій, що були поставлені у технічному завданні. Також було обраховано загальне споживання всієї системи та проведено аналізу рішення для забезпечення оптимальним джерелом енергії та його розподілення по роботі.

Як результат виконання розділу була створена електрична принципова схема робота-гексапода (Додаток Б), яка описує всі з'єднання між модулями та мікроконтролерами та як потрібно підводити живлення.

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ**

Розробка конструкції є ключовим етапом у розробці будь-якого пристрою, адже під час чого процесу з'ясовуються чи всі обрахунки та припущення, що мали місце у розробці були правильними та мають право на існування. Також результатом цього етапу є готовий прототип, який може бути запрограмованим і врешті-решт керованим для реального використання. І тому цей етап є надзвичайно важливим для успішного завершення проєкту.

### **4.1. Загальна концепція конструкції робота**

Виходячи із технічного завдання робот повинен мати функціонал для здійснення пересування рух башти з камерою та місце для розміщення електроніки. Тому конструкція буде складатися і декількох ключових частин:

- Конструкція ніг, яка повинна бути однаковою для всіх 6 ніг для забезпечення простого виготовлення та обслуговування і також зберігати в собі сервоприводи для руху.
- Основний корпус, всередині якого буде зберігатися електроніка одометрії для переміщення, системи живлення та мікроконтролер, що буде відповідати за опрацювання інформації з датчиків та іншого мікроконтролера і використовувати їх для керування серводвигунами.
- Другорядний корпус, всередині якого знаходиться мікроконтролер з камерою та OLED дисплей для відображення інформації оператору.
- Конструкція обертання башти, яка пов'язує основний корпус та другорядний і забезпечую обертання останнього

### **4.2. Розробка конструкції корпусу**

#### **4.2.1. Конструкція основного корпусу**

Оскільки основний корпус нема електроніку відповідає за зберігання електроніки, що опрацьовує пересування, то він також буде мати місця для кріплення ніг. Також Я його розбив на дві деталі для простоти збірки та надійного закріплення джерела живлення.

Як показано на рисунку (Рисунок 4.1) верхня та нижня частини корпусу з'єднані гвинтами, також присутні місця гвинтового кріплення для конструкції повороту башти та ніг. На нижній частині корпусу також присутні отвори для установки перемикача та відводу порту для підключення зарядки. Також на верхній частині присутні отвори для проведення кабелів всередину нижньої частини та отвори на боках для використання меншої кількості матеріалу із збереженням конструкційної цілісності.

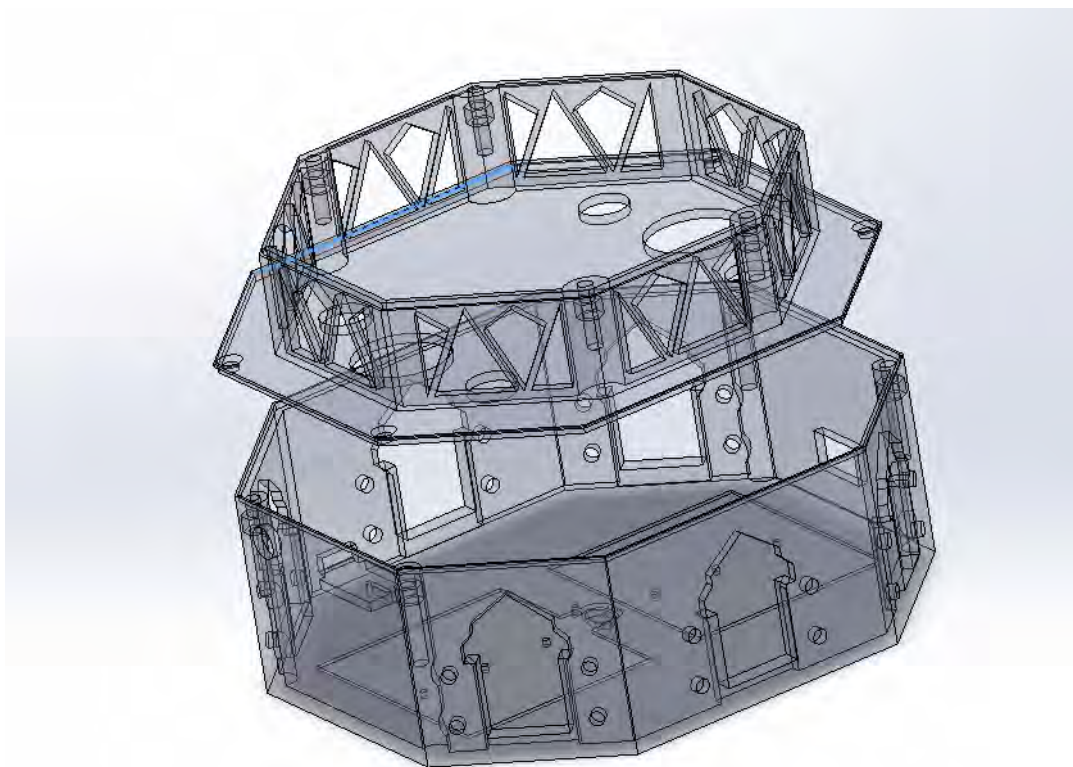


Рисунок 4.1. Модель основного корпусу робота-гексапода

#### 4.2.2. Конструкція другорядного корпусу

Конструкція другорядного корпусу також складається із декількох деталей (Рисунок 4.2), а саме – деталі до якої приліплюється мікроконтролер, та конструкція повороту башти, деталі що виступає у ролі кришки корпусу та місцем для кріплення вентилятора для охолодження камери та її самої. Ці дві деталі з'єднуються заціпками та половинами кріплення OLED дисплею. Також нижня деталь має отвір для проведення кабелів з основного корпусу та місця для кріплення магніту для відстеження його датчиком ефекту Хола.

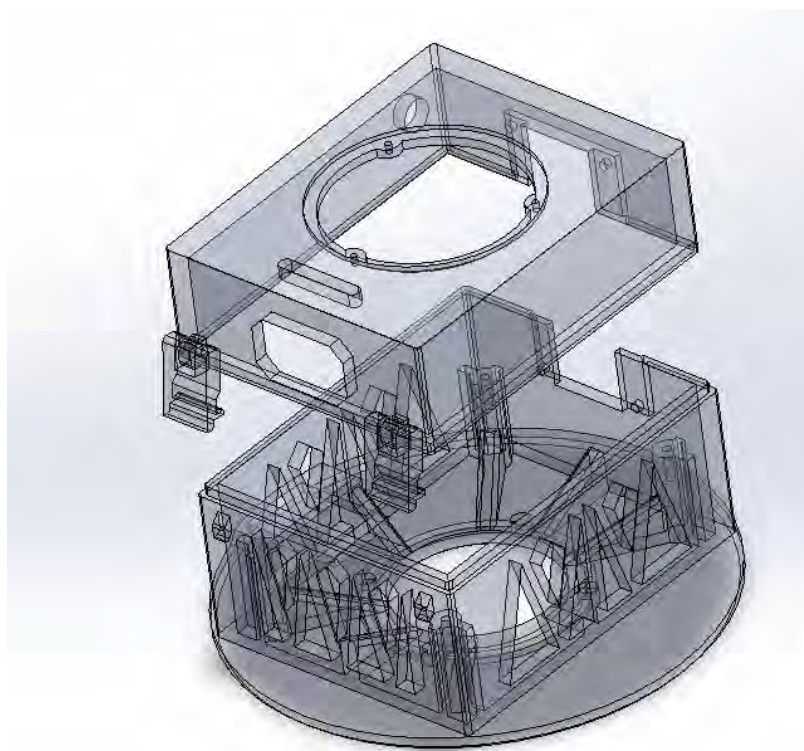


Рисунок 4.2. Модель другорядного корпусу

Основний корпус складається

### **4.3. Розробка конструкції ноги робота**

Конструкція ноги складається із 4 деталей. Дві з цих деталей призначенні для установлення двигунів а інші дві призначенні для утворення ланки опори до поверхні (Рисунок 4.3.). Кріплення двигунів розраховані на гвинтове з'єднання і також мають конструкційні елементи для проведення кабелів від сервоприводів

до їхніх драйверів.

Також варто зазначити, що опорна частина має Г-подібну форму для збільшення горизонтальної відстані від точки прикладання моменту сили у робочому положенні та для можливості підняти ногу для лежачого положення без ризику колізії із кріпленням двигуна. Також конструкція стопи має конструкції елементи для економії матеріалу без значної втрати у міцності.

Габарити плеча, що буде впливати на прикладену силу двигунами дорівнює 11 см. І якщо провести розрахунки аналогічні до таких що були наведені у (3.1), то максимальна прикладена сила дорівнює 1 кг на одну ногу, що є задовільним результатом в рамках технічного завдання.

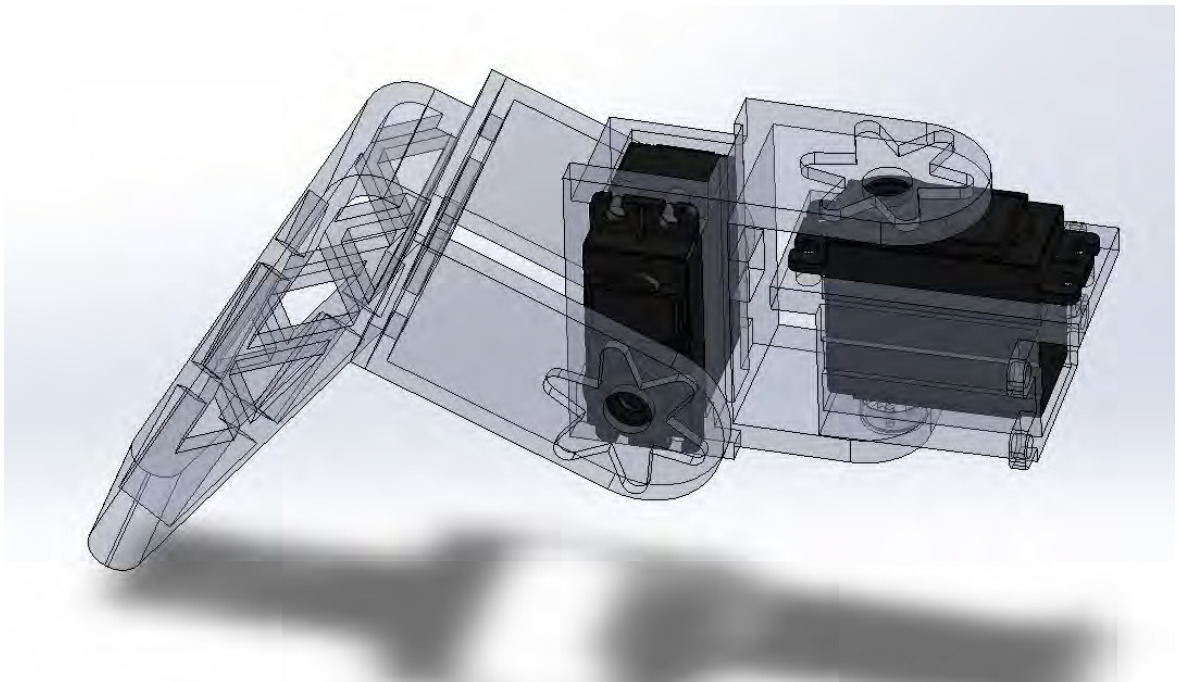


Рисунок 4.3. Модель ноги робота-гексапода

#### 4.4. Розробка механізму повороту камери

Механізм повороту башти складається із зубчастої передачі, яка складається із двох зубчастих коліс. Перше колесо має посадкове місце під підшипник, який у свою чергу одягається на кріпильну деталь, що пов'язує із основний корпусом за допомогою гвинтового з'єднання. Також на цю кріпильну деталь є посадкове

місце для крокового двигуна на який одягається інше зубчасте колесо що прикладає крутний момент до повороту. Потім використовується фрикційне кріплення для прикріплення до нижньої деталі другорядного колеса. І всередині посадкового місця для підшипника є отвір, що призначений для проведення кабелів через контакте кільце. Самі зубчасті колеса мають модуль 1 та їхній передатний коефіцієнт дорівнює 0.26, що при заданій швидкості обертання крокового двигуна 15 обертів за хвилину буде означати що максимальна швидкість обертання башти дорівнює 3.9 обертів на хвилину, що є задовільним результатом який знаходиться в межах технічного завдання (Рисунок 4.4).

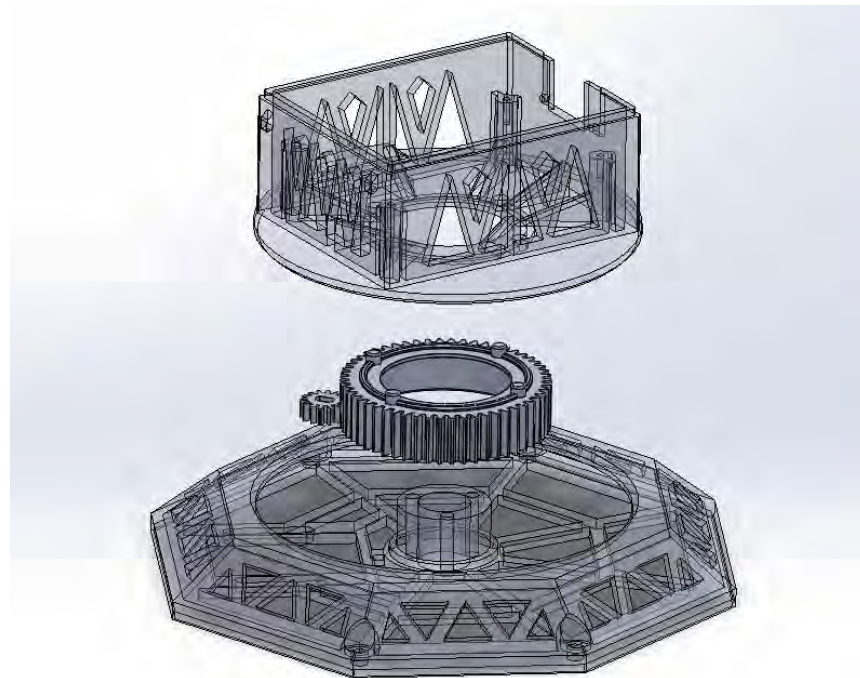


Рисунок 4.4. Модель механізму повороту башти

#### **4.5. Планування розміщення електронних компонентів у конструкції робота**

Було вирішено прикріпити джерело живлення всередині нижньої деталі основного корпусу, разом із драйверами сервоприводів також до дна деталі посередині буде прикріплено датчик дистанції.

Далі понижувачі струму та мікроконтролер руху будуть розміщені у верхній деталі основного корпусу, далі сигнальні кабелі та кабелі живлення через контактне кільце потрапляють до другорядного корпусу де розміщений мікроконтролер з камерою.

Сама камера буде кріпитися на алюмінієвий радіатор, що буде прикріплений до кришки другорядного корпусу також він буде обдуватися вентилятором, що також прикріплений до цієї кришки. OLED дисплей буде виступати у ролі додаткового з'єднання між деталями другорядного корпусу.

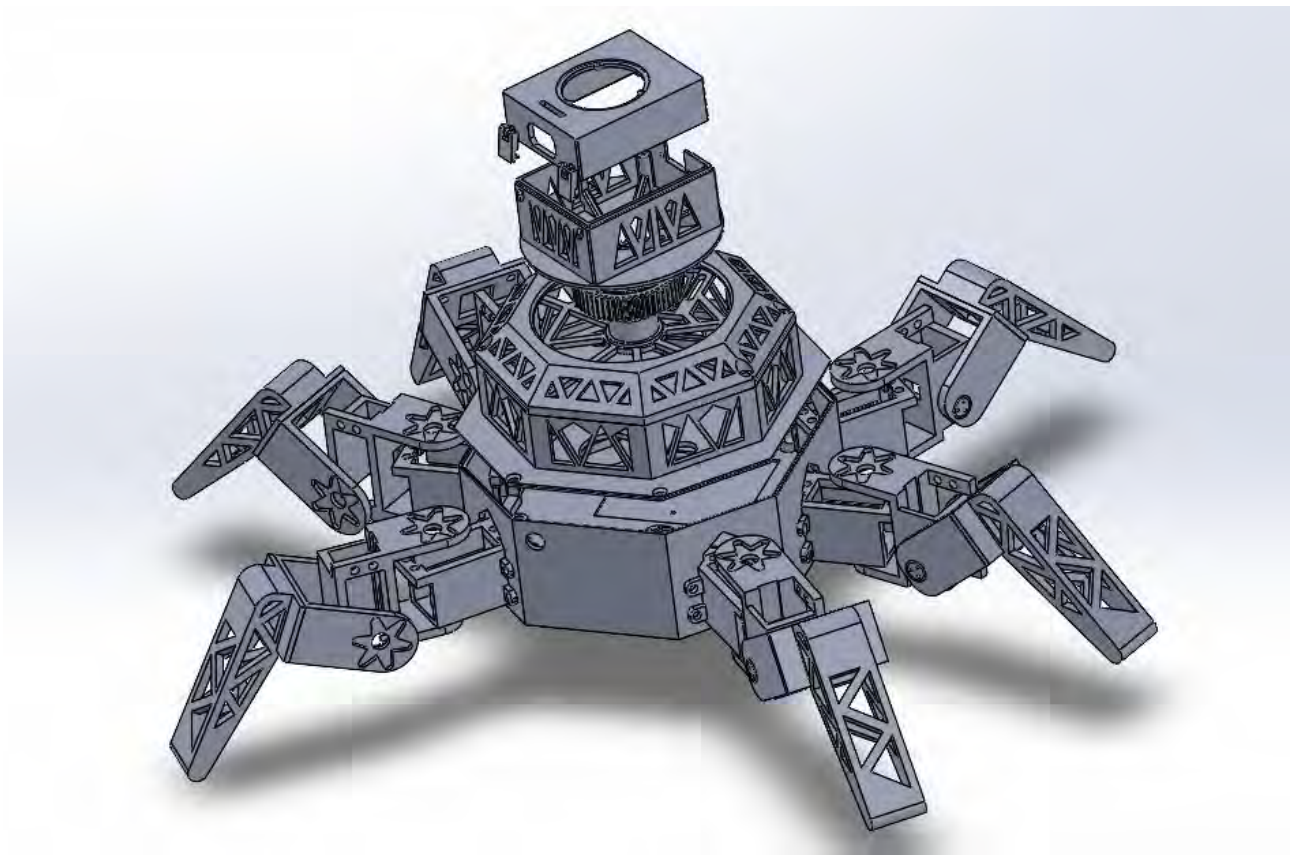


Рисунок 4.5. Повна модель робота-гексапода

#### **4.6. Технологічні особливості виготовлення деталей**

Для виготовлення всіх структурних деталей було використано адитивне виготовлення за допомогою технології 3D-принтерів. У якості структурного матеріалу було обрано пластик PLA, завдяки його високій стійкості до високих температур та високій твердості. Також чинником, що мав місце у виборі цього

матеріалу з поміж інших був факт того, що PLA є найдоступнішим пластиком для використання у друці.

#### 4.7. Складання та налагодження макета робота

Після виготовлення деталей в нас є все необхідне, щоб приступити до складання прототипу. Спочатку були зібрані всі 6 ніг та приєднані до нижньої частини основного корпусу. Далі на дно цієї деталі був становлений датчик дистанції. Наступним етапом було встановлення джерела живлення на нижній частині верхньої деталі основного корпусу і встановлення драйверів разом з ним (Рисунок 4.6).

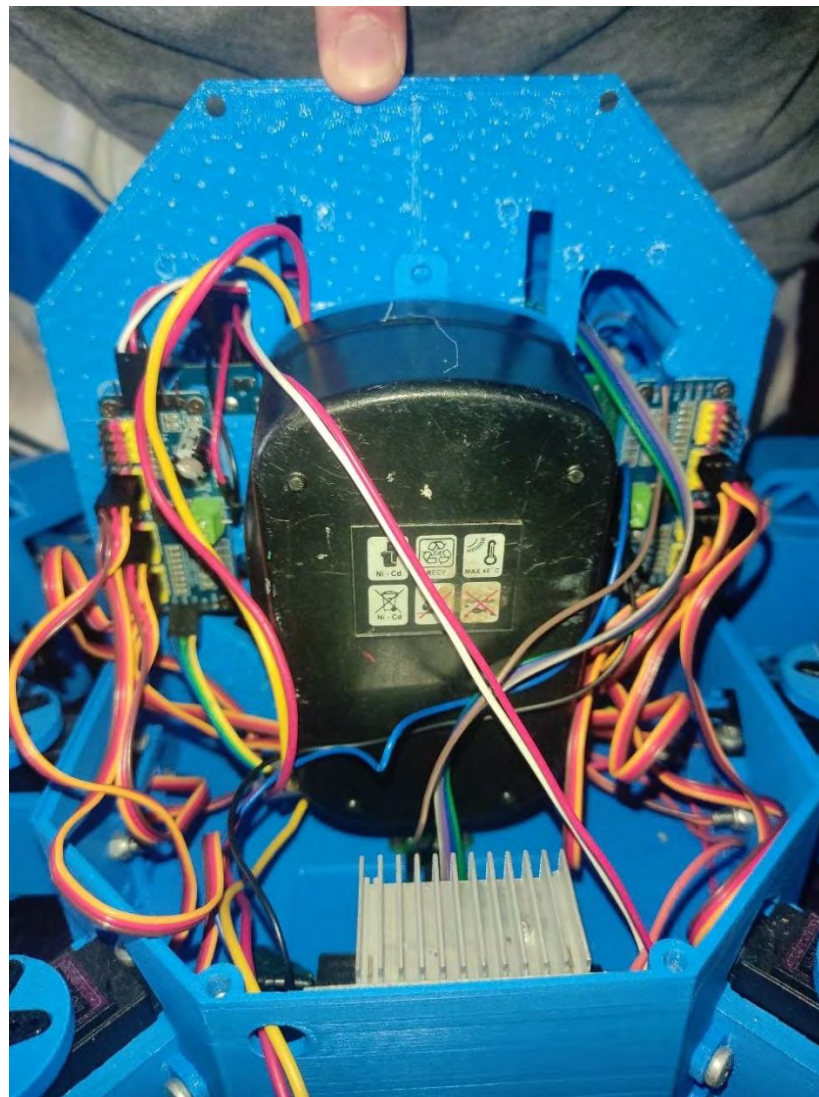


Рисунок 4.6. Підключення сервоприводів та джерела живлення.

Наступним етапом було встановлення першого мікроконтролера та підключення його до драйверів та джерела живлення у єдину систему, закінчуючи етап збірки основного корпусу (Рисунок 4.7).

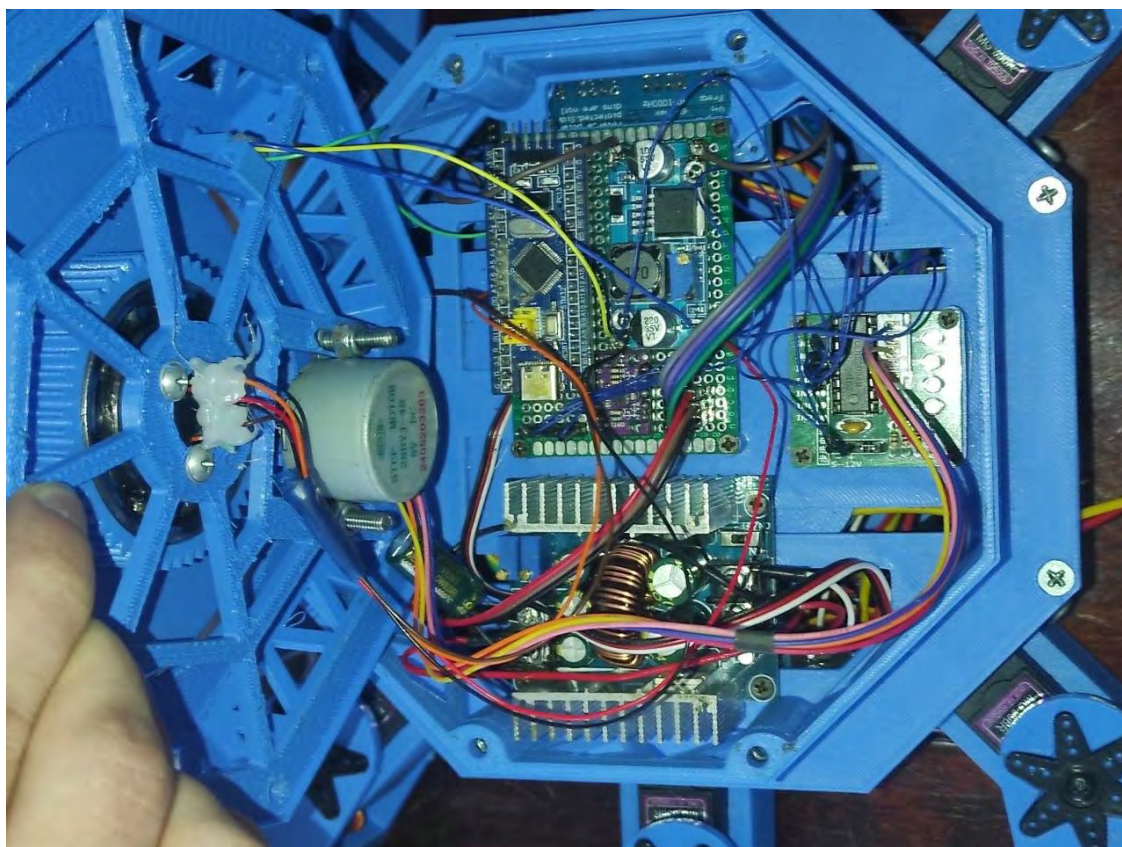


Рисунок 4.7. Встановлення мікроконтролера управління рухом.

Далі потрібно зібрати механізм повороту башти. Спочатку було здійснено підключення драйверу крокового двигуна та датчика ефекту Хола. Потім було встановлено ведене зубчасте колесо разом у збірці із підшипником та проведено підключення від основного корпусу до другорядного. Далі було встановлено кроковий двигун і завдяки слотам для гвинтів із запасом, підлаштовано для ефективного зчеплення двох зубчастих коліс (Рисунок 4.9).

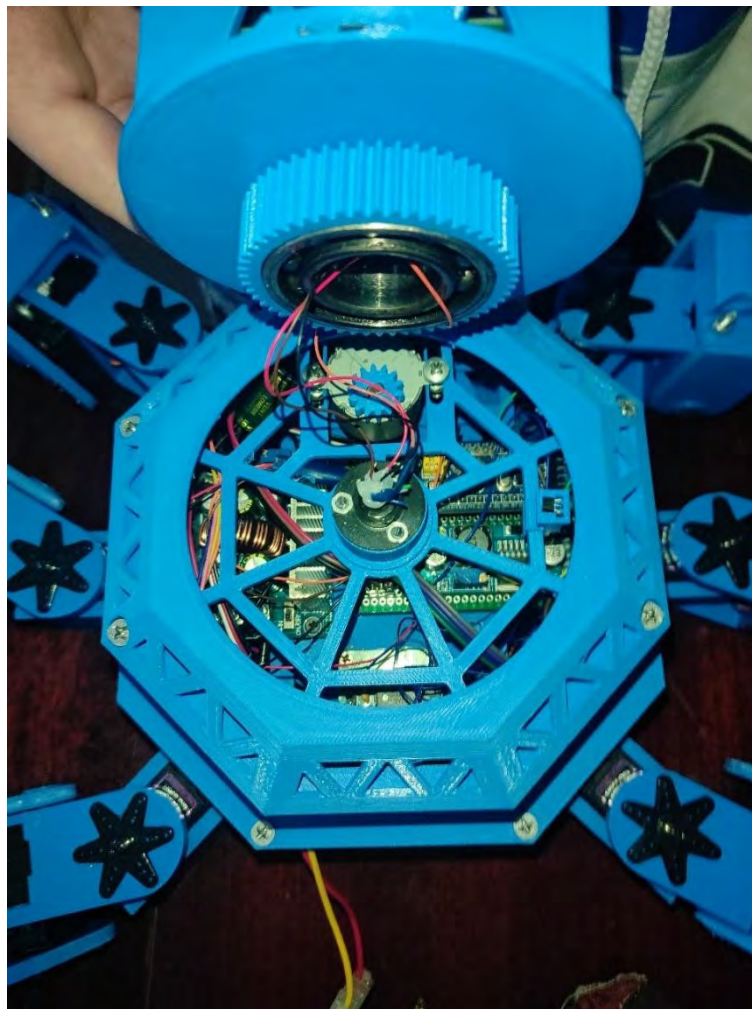


Рисунок 4.8. Збирання механізму повороту башти.

Завершальним етапом було збирання другорядного корпусу. Завдяки завчасно проведеним кабелями із сигналами та живленням було підключено другий мікроконтролер та встановлено OLED дисплей разом із камерою та вентилятором (Рисунок 4.9).

Після виконання всіх етапів збірки ми маємо готовий пристрій який може бути запрограмований та керованим (Рисунок 4.10).

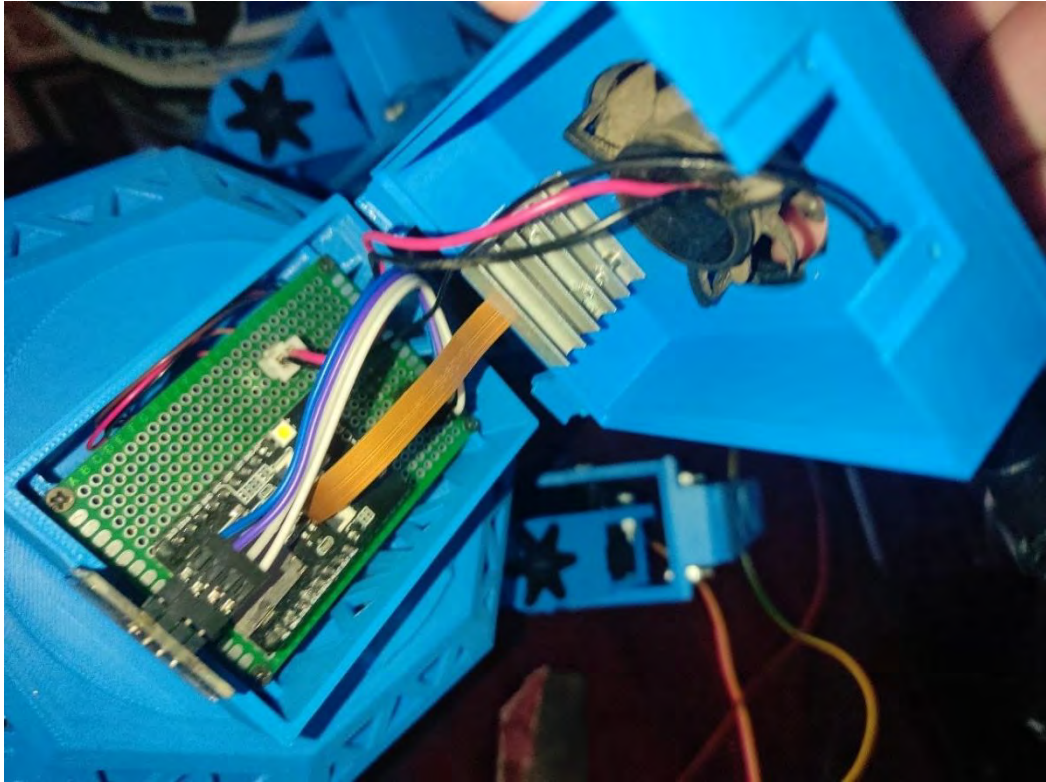


Рисунок 4.9. Установлення електроніки у другорядний корпус.



Рисунок 4.10. Зібраний прототип робота-гексапода

## **Висновки до розділу 4**

У четвертному розділі дипломної роботи було спроектовано корпус робота-гексапода. Було продемонстровано основні конструкційні рішення на прикладі готової моделі. Потім завдяки використанню адитивних технології 3Д-друку, з використанням пластику PLA було виготовлено дані деталі для подальшої збірки

У другій частині розділу було детально описаний процес збірки та установлення електричних компонентів всередині. Також було пояснено принцип роботи повороту башти та застосування контактної кільця для проведення кабелів від основного корпусу до другорядного. Результат завершення розділу є готовий прототип робо-гексапода, що готовий до подальшого програмування та безпосереднього використання.

## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 5.1. Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення для керування робот-гексаподом поділяється на два основні компоненти: програмне забезпечення для ESP32 та для STM32F103C8T6.

Програма для ESP32 в основному характеризується як пасивна, що лише під час увімкнення ініціалізується та налаштовує модулі та зв'язок і потім переходить у режим очікування команд для передачі їх до STM32F103C8T6 та постійної відео трансляції на веб-сторінку.

На противагу алгоритм для STM32F103C8T6 теж можна в певному сенсі назвати реактивною, бо вона працює відповідно до отриманої команди, але також займається складними розрахунками оберненої кінематики та постійного аналізу даних з датчиків одометрії. Але в цілому принцип роботи алгоритму STM32F103C8T6 базується на первинній ініціалізації процесів під час увімкнення та потім передачі більшість з них на переривання, такі як очікування сигналу від ESP32 через UART підключення і циклічну роботу таймерів, що змінюють значення поточного кроку та використовуються для керування баштою шляхом перемикавання GPIO пінів для керування ULN2003.

Але як алгоритм роботи STM32F103C8T6 теж використовує головний цикл. Він використовується для таких задач, як періодичне оновлення даних з датчиків, опираючись на певні часові проміжки та постійне оновлення положення ніг для підтримки стабілізації та здійснення пересування, як реакція на зміну поточної команди.

Для написання коду використовується два середовища програмування: CudeIDE для STM32F103C8T6, бо вона розроблена тими самим розробником, що і мікроконтролер, що робить її максимально сумісною для роботи, і ESP-IDF для ESP32, що є розширенням для Microsoft Visual Studio Code. Вона, як і попередня також розроблена тією же компанією, що і мікроконтролер та надає можливості

до повноцінного використання всіх функцій разом із підтримкою офіційних бібліотек (Додаток В).

## **5.2. Алгоритм ініціалізації керуючого мікроконтролера**

Ініціалізація STM32F103C8T6 є важливим етапом для початку його роботи. Під час цього процесу спочатку проводиться оголошення всіх змінних та структур, що будуть використовуватися у подальшій роботі. До змінних входять в основному значення, що виступають у ролі маркерів відстежування зміни станів деяких процесів. До переліку структур входять конструктори для ініціалізації датчиків, адже так можна наперед визначити інтерфейс передачі даних та режим роботи. Також, оскільки кожна нога має свої координати, кути двигунів, та інші допоміжні параметри, було прийнято рішення створити за спільним шаблоном екземпляри структури для кожної ноги, для їх визначення.

Наступним кроком є ініціалізація потрібних I2C та UART інтерфейсів, та переведення UART у режим очікування повідомлення, що у разі спрацювання створить переривання і опрацює команду. Далі з використанням попередньо створених екземплярів структур проводиться ініціалізація драйверів сервоприводів та на іншому I2C каналі проводиться ініціалізація IBM. Потім для забезпечення збігу значень фактичного положення ніг із змодельованим всередині програми, проводиться грубе виставлення ніг та задання початкових значень ПД контролерів для кожної ноги. І наприкінці проводить ініціалізація датчика дистанції за допомогою сторонньої бібліотеки (Рисунок 5.1).



Рисунок 5.1. Алгоритм ініціалізації STM32F103C8T6

### 5.3. Алгоритм головного циклу керуючого мікроконтролера

Головний цикл STM32F103C8T6 відповідає за оновлення загального стану робота-гексапода. До цього входить оновлення інформації з датчиків із заданою періодичністю, що є значно повільнішою ніж робота самого мікроконтролера. Це зроблено з ціллю зниження чутливості системи до різких змін оточення, що може вивести із стабільного положення. Також проводиться зчитування сигналу із датчика Хола для відстеження, чи башта є припарковано.

У другій частині циклу відбувається оновлення положення ніг робота згідно поточної команди, для здійснення переміщення, що вже відбувається кожного циклу для забезпечення максимальної плавності переміщення (Рисунок 5.2).

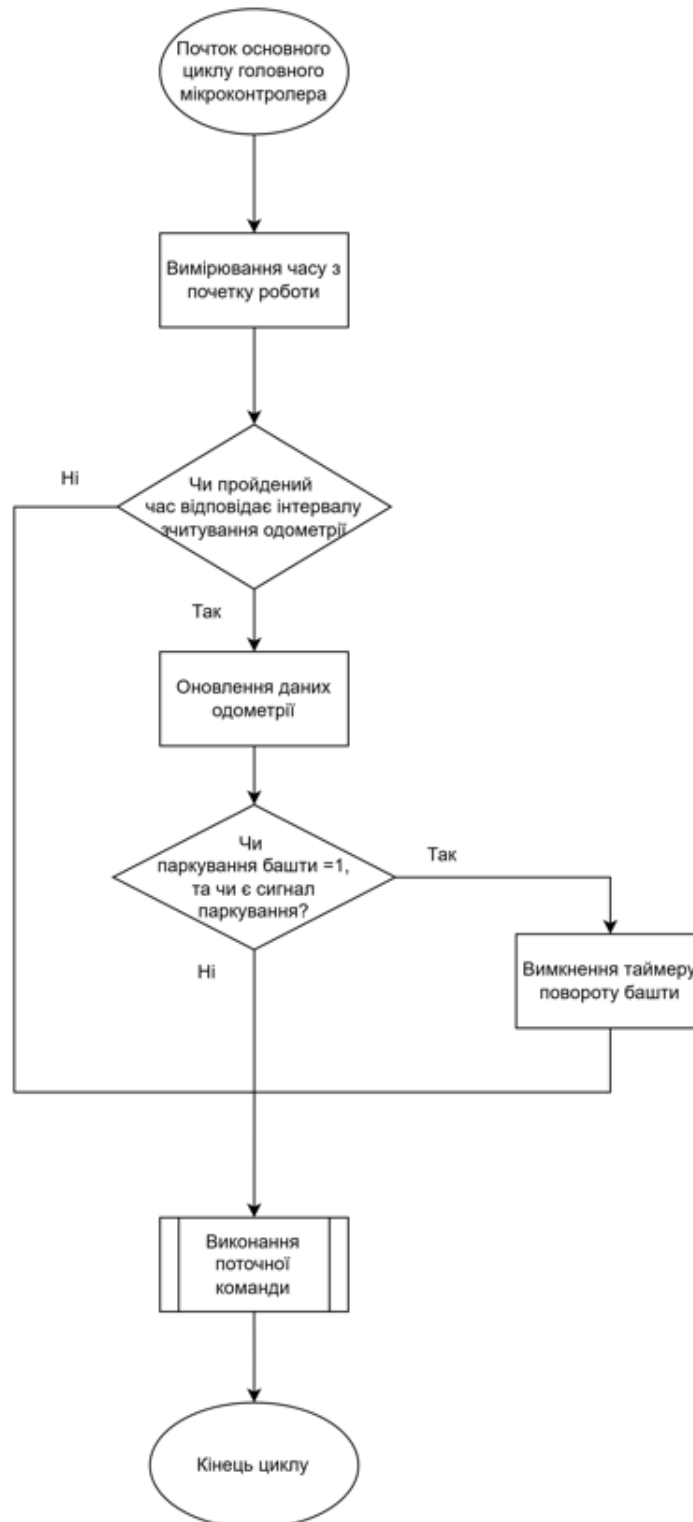


Рисунок 5.2. Алгоритм головного циклу STM32F103C8T6

#### **5.4. Алгоритм виконання команд**

Алгоритм виконання команди, що виконується кожного циклу роботи STM32F103C8T6, виступає у ролі постійної підстановки під поточну команду. На початку проводиться перерахування нахилу, отриманого з ІВМ, адже його сирі дані, не підходять для безпосередньої роботи. Потім проводиться перерахування нормальної площини, що моделює де знаходиться поверхня, для подальшого визначення поправки для зміщення центру маси робота.

Наступним етапом є визначення стандартного положення ніг на основі команди. У ролі вхідних даних враховується крок циклу перестановки ноги, що рахується самостійно за допомогою стороннього таймеру. Це робиться для контрольованого крокування, адже сама команда викликається набагато частіше ніж саме крокування.

І наприкінці алгоритму використовується функція, що ініціює фактичне переміщення ніг з урахуванням всіх змінних, що були визначенні попередньо (Рисунок 5.3).

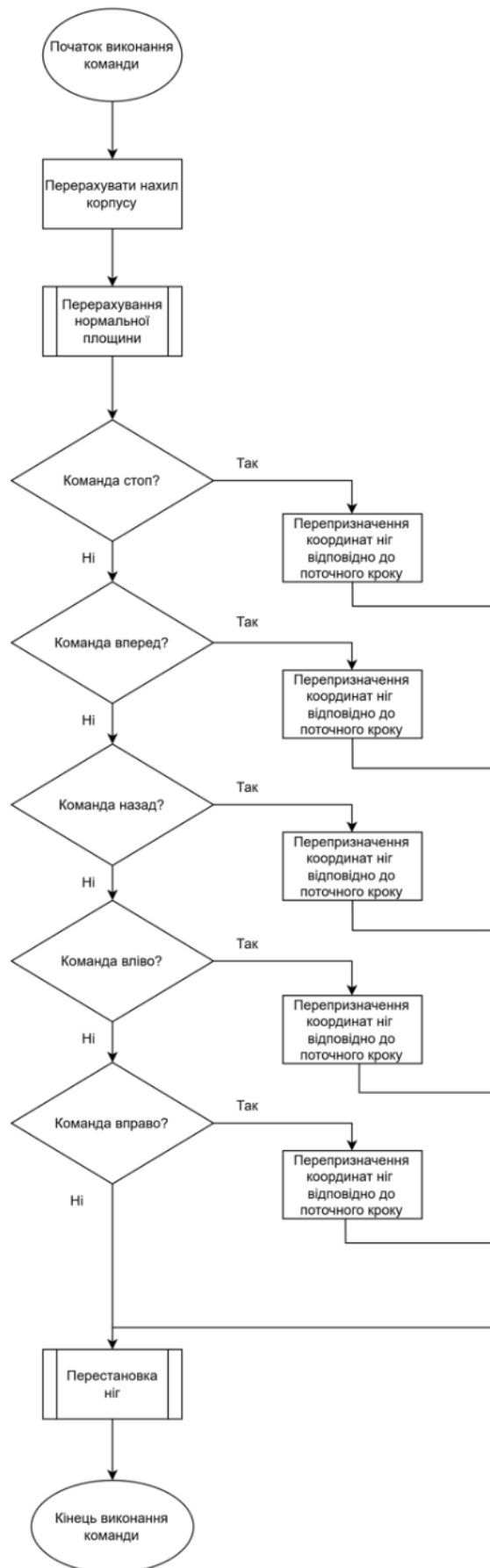


Рисунок 5.3. Алгоритм виконання команди

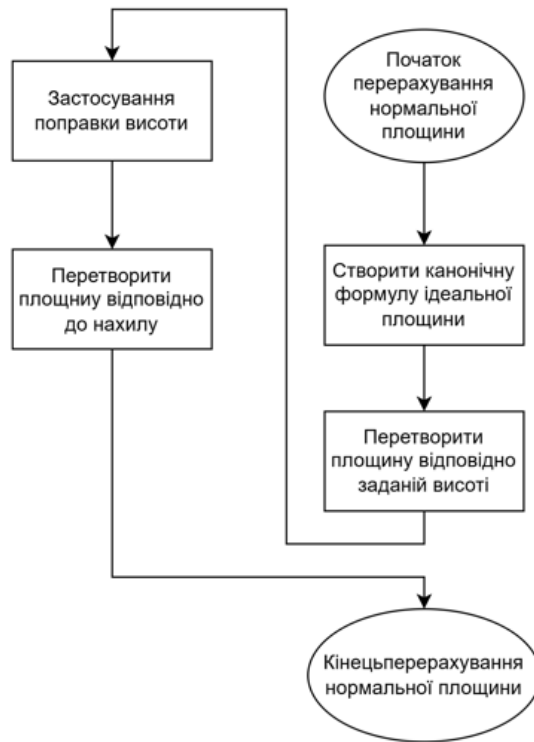


Рисунок 5.4. Алгоритм перевизначення нормальної площини

#### 5.4.1. Алгоритм перестановки ніг

Алгоритм перестановки ніг складається із циклу, що проходить через кожну ногу  $i$  для кожної визначає її  $z$  положення за формулою (2.17), і наступник кроком оновлює інформацію для ПД контролера і згідно його результату обчислення призначає кути для поточної ноги (Рисунок 5.5).

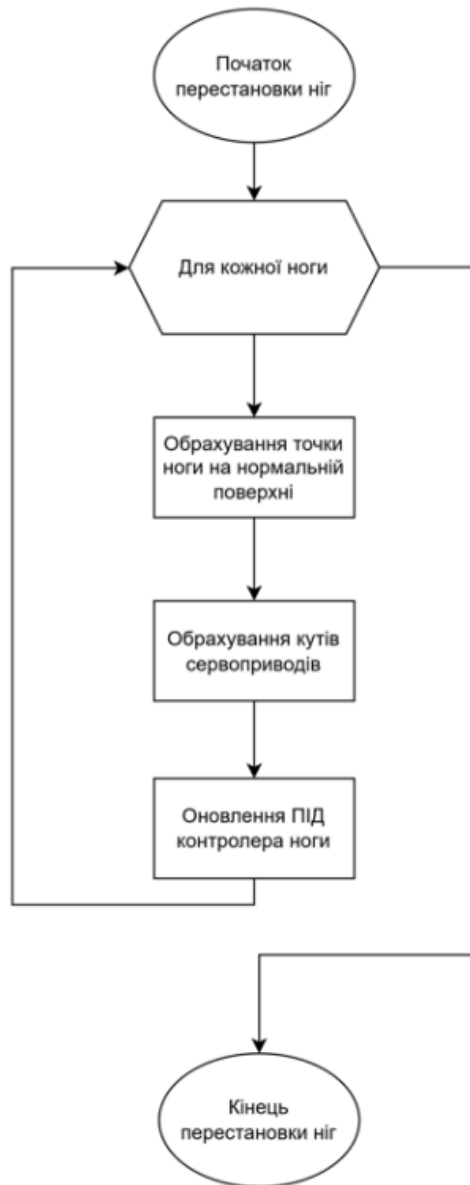


Рисунок 5.5. Алгоритм перестановки ніг.

### 5.5. Алгоритм отримання команд

Головна ціль цього алгоритму – визначити чи прийшла команда та чи вона була валідною. Другорядним функціоналом є виконання команд, що не впливають безпосередньо на саму траєкторію руху робота-гексапода. Це такі команди, як поворот башти в різні сторони, та її паркування. Також окремою функцією виділено підготовка до повної зупинки робота.

Починається робота алгоритму із перевірки, чи спрацював правильний UART інтерфейс, це потрібно для забезпечення належної роботи та захист від

випадкових спрацювань. Потім, остільки через інтерфейс інформація приходить як набір символів, його потрібно розпарити та перевести у зрозумілий для програми варіант.

Після цього проводиться перевірка, чи виділена команда має збіги із набором доступних команд. Це проводиться для остаточного вирішення чи буде програма виконувати цю команду, адже якщо збігу не буде, то нам потрібно, щоб система не мала реакції на неї. Але у разі наявності збігу вона вноситься у поле поточної команди, що означає що програма почала виконувати її і у наступній ітерації головного циклу буде діяти відповідно.

Останнім етапом є перевірка чи це є команда повороту башти, зміни висоти платформи або зупинки і у разі збігу виконує її. А у разі відсутності збігів вважається що надійшла команда руху і вмикається таймер, що рахує крокування (Рисунок 5.6).

#### 5.5.1. Алгоритм команди стоп

Команда стоп повинна зупиняти всі процеси руху, що наразі відбуваються та надати можливість повернутися у стоячу позу під час руху у будь-який момент. Це здійснюється 2 два основні етапи: скидання лічильна крокування, та зупинка його, і окреме визначення положення ніг всередині алгоритму виконання команд. Таким чином виходить що під час отримання цієї команди крокування моментально зупиняється і ноги переставляються у положення очікування (Рисунок 5.7). Варто зазначити що така реалізація доступна завдяки особливостям конструкції багатонігих роботів, адже під час виконання буде фаза зупинки під час руху, що у динамічно стабільних роботів призведе до втрати контролю.

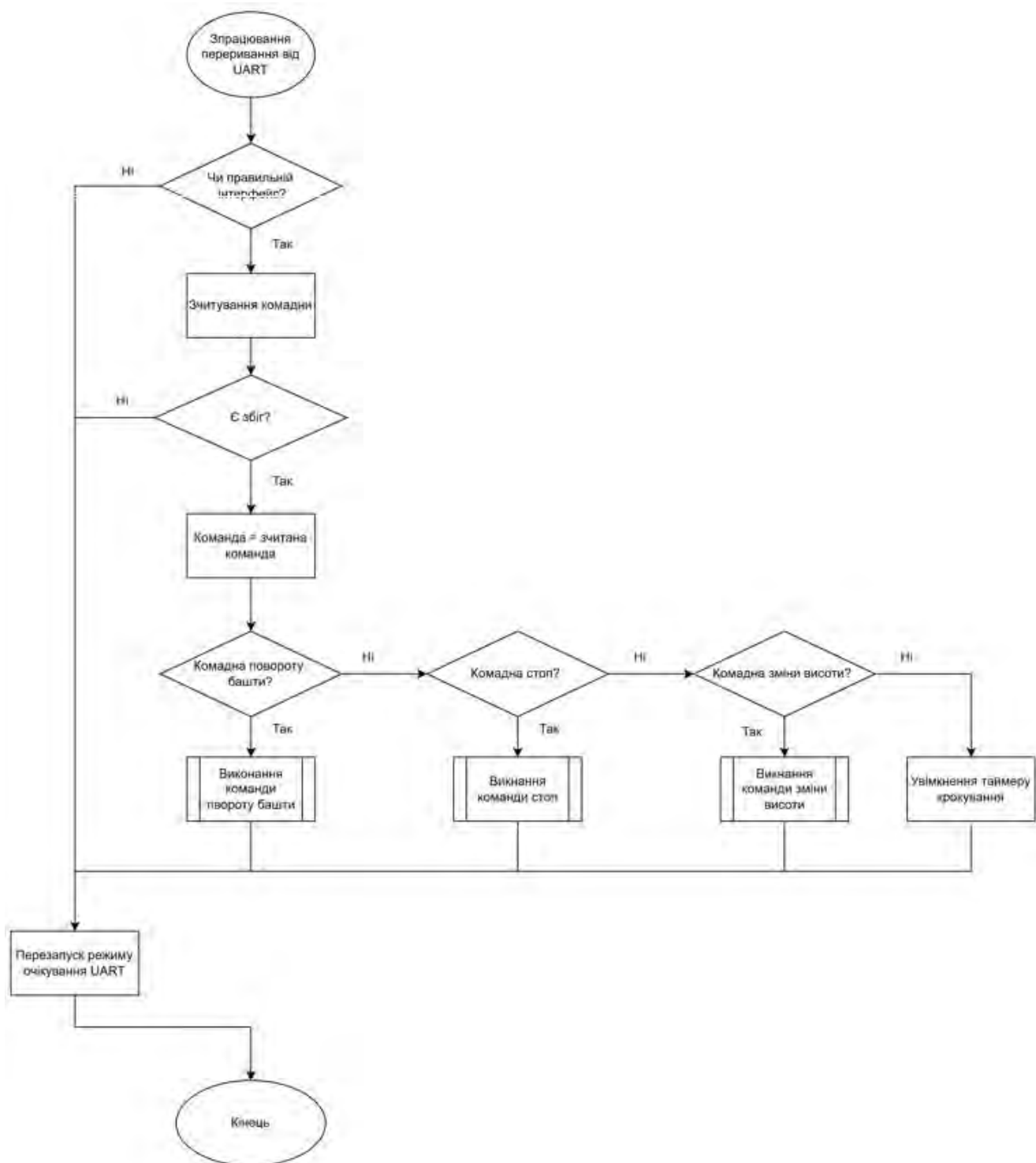


Рисунок 5.6. Алгоритм опрацювання отриманої команди.



Рисунок 5.7. Алгоритм команди стоп.

#### 5.5.2. Алгоритм команди повороту башти

Виконання цієї команди спочатку передбачає визначення самого типу повороту: за часовою стрілкою, проти або виконати процес паркування башти, щоб мати можливість вирівнювання куту огляду камери із напрямком руху робота-гексапода.

Першим кроком спрацювання команди є подібним до команди зупинки – вимикання всіх таймерів та скидання значення кроку для виконання повної зупинки. Наступник кроком є визначення типу команди і у залежності від вибору обирається напрямок руху та параметри запуску повороту. У випадку звичайного повороту додаткових параметрів до запуску немає, поворот башти буде виконуватися до спрацювання команди стоп. Але у випадку команди паркування визначається відповідний параметр, що перевіряється всередині основного циклу і якщо разом з ним буде сигнал від датчика ефекту Хола, то це буде значить, що башта у припаркованому положенні і вимкне таймер, що відповідає за її рух (Рисунок 5.8).

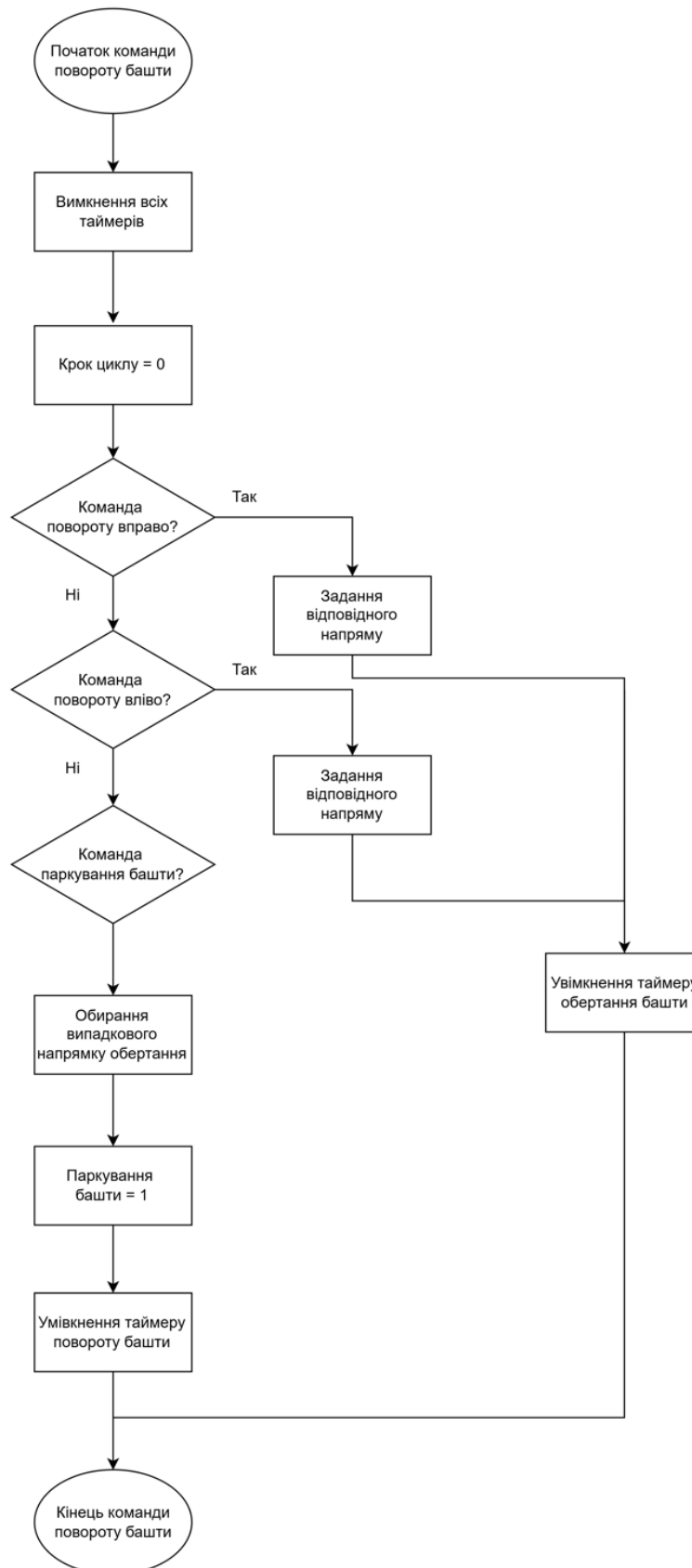


Рисунок 5.8. Алгоритм повороту башти.

### 5.5.3. Алгоритм команди зміни висоти корпусу

Цей процес передбачає додаткове опрацювання повідомлення, адже при визначенні типу команди непередбачено отримання кількісного значення для заощадження ресурсу. І визначивши його проводиться оновлення поправочного коефіцієнта для перерахунку нормальної площини (Рисунок 5.9).



Рисунок 5.9. Алгоритм опрацювання команди зміни висоти платформи.

### 5.6. Алгоритм ініціалізації другорядного мікроконтролера

Алгоритм роботи ESP32, працює у пасивному режимі, тобто у нього немає звичного основного циклу, а всі процеси працюють паралельно у асинхронному режимі. Тому основна частина коду складається із ініціалізації при увімкненні мікроконтролера.

Вона відбувається у такому порядку, спочатку проводиться оголошення всіх змінних, що буду використовуватися подальшому, потім відбувається ініціалізація та налаштування інтерфейсів передачі даних I2C та UART. Наступним відбувається ініціалізація камери та налаштування її параметрів, таких як, розширення частота кадрів, гамма і т. д. Після цього проводиться ініціалізація OLED дисплея та увімкнення WiFi модуля у режимі точки доступу з його налаштуванням. Останнім запускається локальний сервер із створенням веб-сторінки, що слугує інтерфейсом для взаємодії з оператором і місцем, куди передається відеоряд із камери. У ході написання коду були використані стандартні бібліотеки, від розробника Espressif `esp_wifi.h`, `esp_http_server.h`, `driver/uart.h`, `driver/i2c_master.h`, що належать до одного репозиторію [60] та, бібліотеку `esp_camera.h`, що також від цього розробника але належить іншому репозиторію [61] (Рисунок 5.10).



Рисунок 5.10. Алгоритм ініціалізації ESP32.

### **5.7. Алгоритм опрацювання команд оператора**

Фактично це основна програма, яка виступає зв'язуючим каналом між веб-сторінкою та всією системою. Вона спрацьовує при отриманні переривання від оператора у вигляді повідомлення з веб-сторінки. Оскільки інформація приходить у вигляді набору символів першим чином спочатку проводиться її парсинг. Після його проведення алгоритм аналізує який тип команди прийшов і у залежності від нього оновлює зображення на OLED дисплеї для надання оператору зворотної інформації чи команда була зрозуміла. І наступним кроком здійснює ретрансляцію цієї команди через UART інтерфейс до STM32F103C8T6 для подальшого опрацювання (Рисунок 5.11).

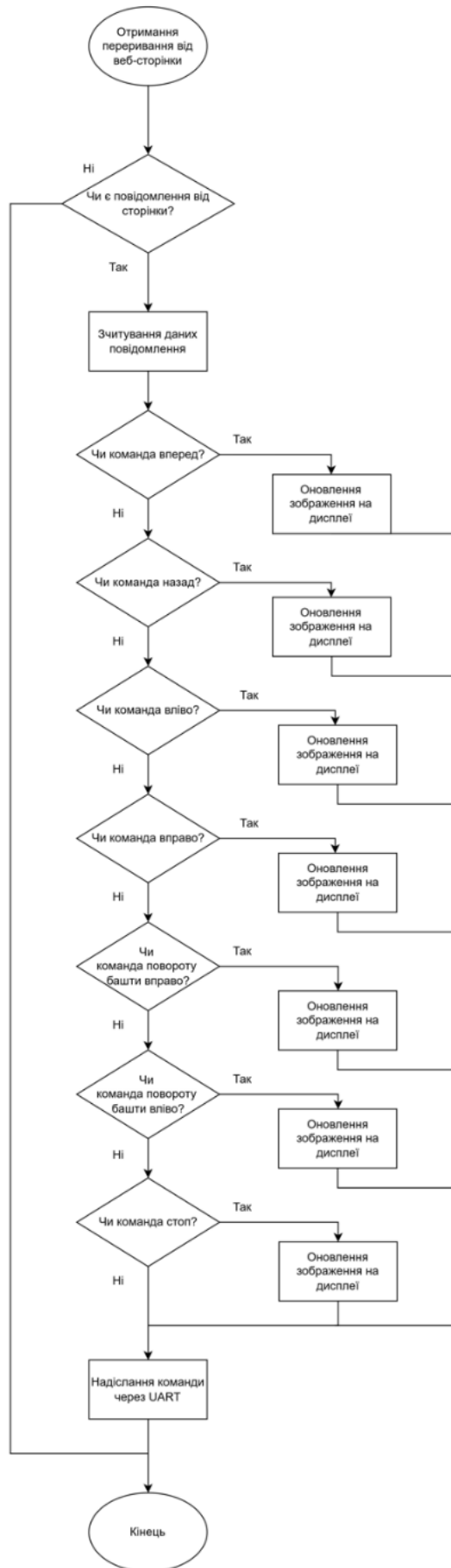


Рисунок 5.11. Алгоритм опрацювання повідомлень від оператора.

## 5.8. Налаштування та перевірка працездатності програмного забезпечення

Оскільки дана реалізація робота-гексапода є прототипом то для перевірки його працездатності було достатньо перевіри відпрацювання всіх функцій, що було в нього закладені. Для цього використовується інтерфейс, що призначений для керування (Рисунок 5.12).

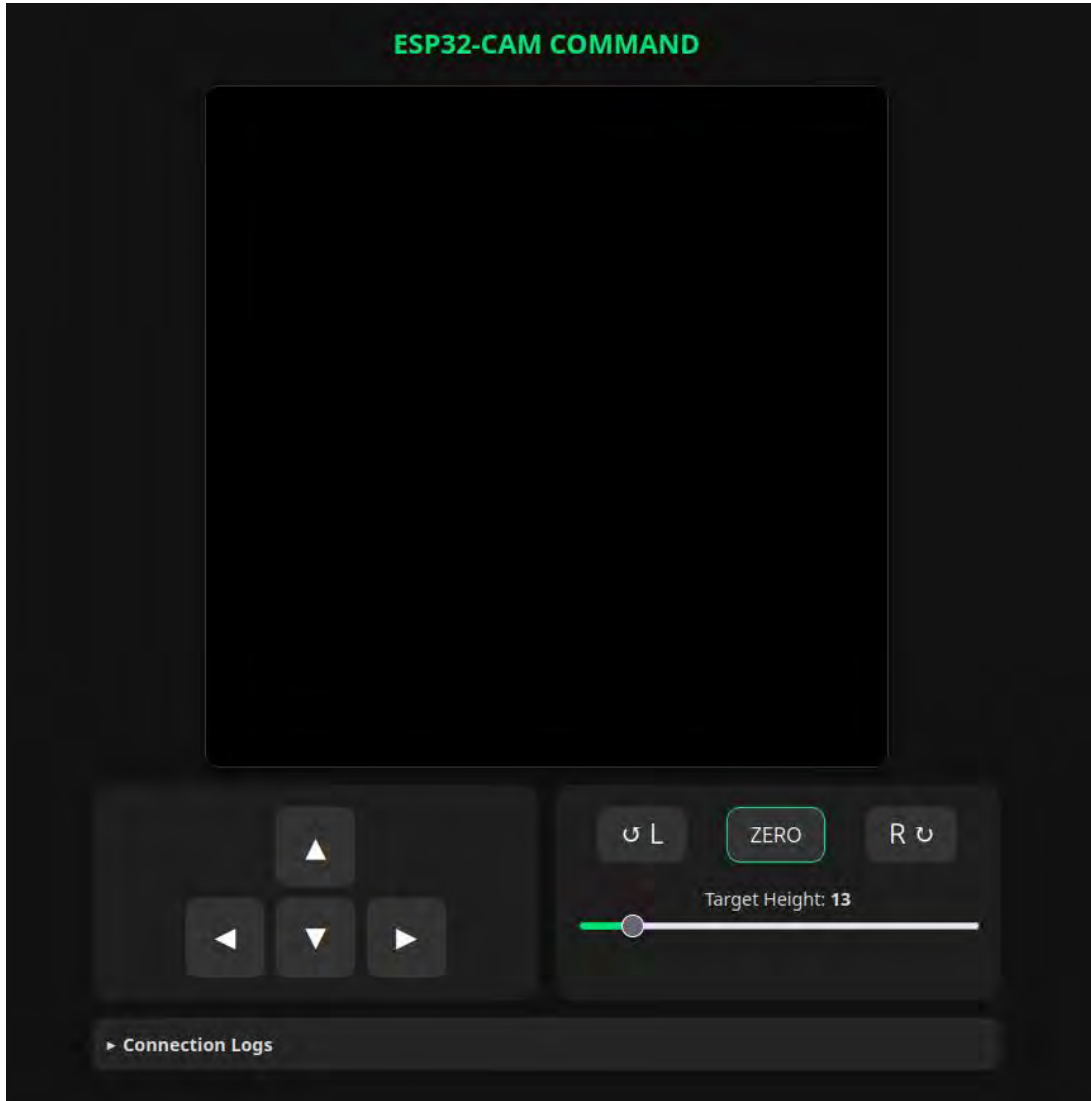


Рисунок 5.12. Інтерфейс для взаємодії з роботом-гексаподом.

На ньому присутні кнопки для задання команд напрямку руху, повороту башти та підбір висоти платформи, команда. Фактично управління відбувається шляхом затискання кнопок, бо при відтисканні автоматично надсилається команда стоп, що зупиняє його рух. Додатково на ними є поле на яке виводиться

відео трансляція з камери.

Для перевірки чи була надіслана команда є додаткове текстове поле, на якому виводять всі команди, що надсилаються на ESP32 (Рисунок 5.13), таким чином дуже просто відслідкувати, у випадку виникнення проблем, місця їхнього походження.

І після проведення тестування було визначення, що робот-гексапод працює у задовільному вигляді та відповідає до свого технічного завдання (Рисунок 5.14).

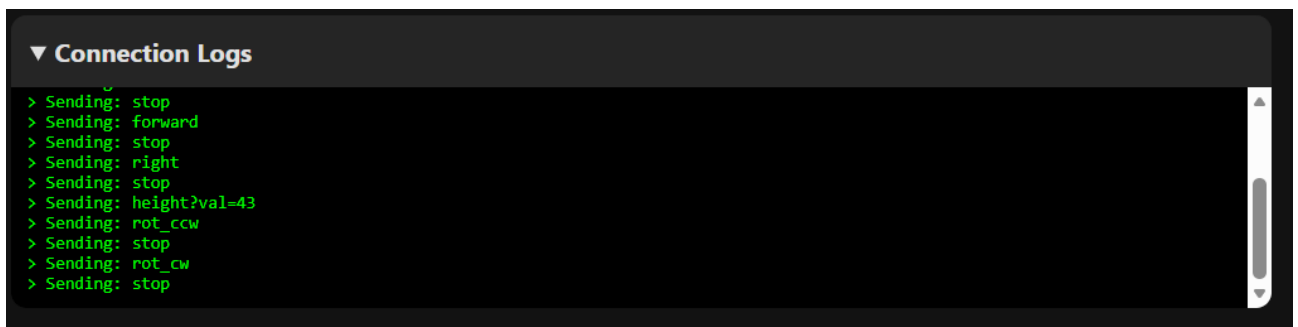


Рисунок 5.13. Текстове поле з логуюванням відправлених команд.

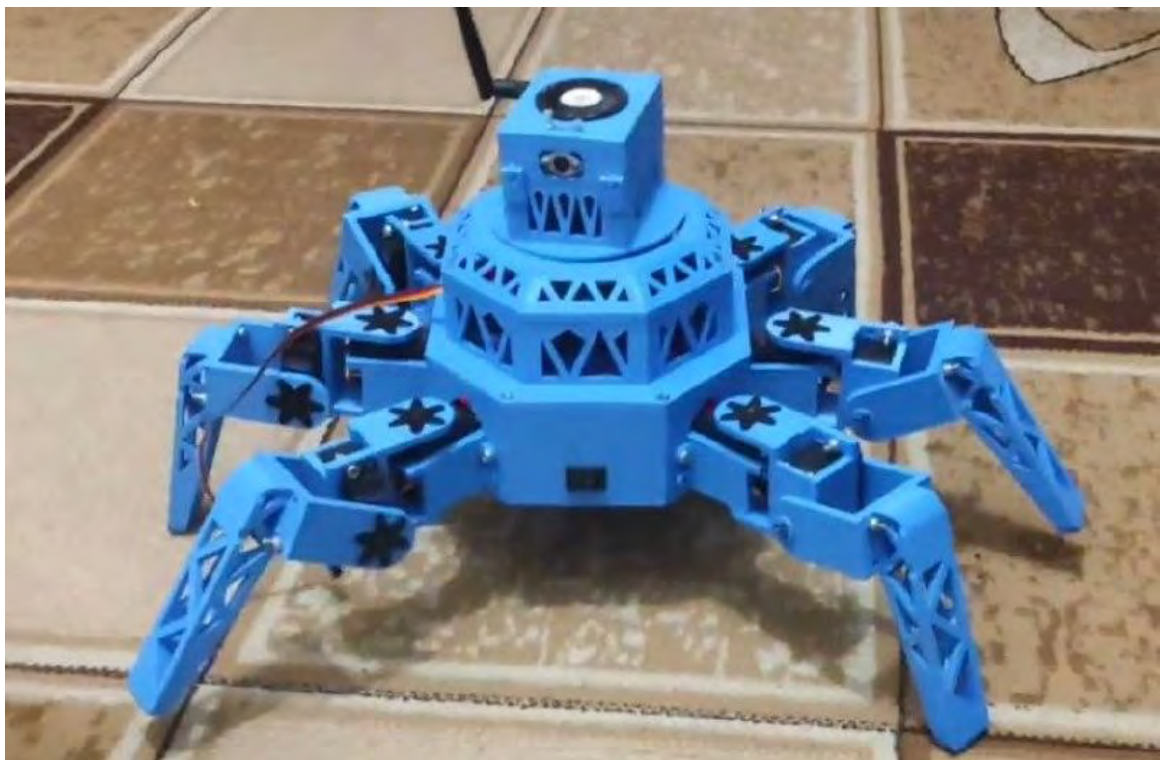


Рисунок 5.14. Демонстрація роботи робота-гекспода.

## Висновки до розділу 5

Під час виконання п'ятого розділу було проведено розробку програмного забезпечення для робота-гексапода. Архітектура складалася із двох мікроконтролерів, що мають між собою зв'язок через UART інтерфейс. Особливістю було те що для різних мікроконтролерів було застосовано різних підхід для розробки: STM32F103C8T6 використовувала архітектуру програми де у основі був головний цикл, що оновлював стан кожної ноги відповідно до команди що опрацьовувалась за допомогою переривання по UART. Також рядом із головним циклом були додаткові процеси, що працювали на таймерах, що дозволяло керувати швидкістю крокування та поворотом башти без втручання у основний цикл.

Другий мікроконтролер мав інший підхід до розробки програмно забезпечення. Її суть полягала у відсутності основного циклу, натомість замість неї у асинхронному режимі працювало декілька процесів – опрацювання відеоряду з камери, утримання локального сервера з підключення на точку доступу через вбудований модуль WiFi та опрацювання переривань, які надходили від повідомлень оператора через веб-сторінку.

Сама веб-сторінка являла собою основний інтерфейс для керування робот-гексаподом і вміщала в собі функції надсилання команд для керування, отримання та відображення відеоряду з камери та текстове поле, яке записувало та надавало можливість перегляну правильність надісланих команд.

Результатом виконання цього розділу був готовий прототип робота який виконував технічне завдання на задовільному рівні і готовому для демонстрації своєї концепції.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи «Робот-гексапод із комп'ютерним зором» був створений прототип системи що здатна самостійно пересуватися через нетипові поверхні за допомогою 6 ніг та мати дистанційне керування, що надає оператору можливість до виконання різних завдань без необхідності персонального знаходження поряд. Ця можливість також підсилюється завдяки наявній на борі камери, що постійно надсилає відеоряд на інтерфейс оператора та, завдяки вбудованому у корпус механізму повороту, має огляд місцевості у діапазоні кута  $360^\circ$ .

Для досягнення цього результату було проведено ґрунтовне дослідження розвитку крокуючих роботів, їх типи, здібності та сфери застосування. Також було зроблено детальне дослідження щодо технологій комп'ютерного зору, їхніх сильних сторін та недоліків. На основі цієї інформації було розроблено технічне завдання, що слугувало конкретизацією потрібних якостей прототипу.

Далі для погодження конструкції, була проведена детальне дослідження проблем прямої та оберненої кінематики. Шляхом їх розв'язання було затверджена геометрія ніг, що надало можливість розробити математичну модель для управління. Також вона була посилена завдяки визначенню метода пересування центру мас для забезпечення кращої стабільності під час знаходження на похилих поверхнях.

Наступним етапом була розробка структурної та функціональної системи робота-гексапода, що надало можливість для вибору електричних компонентів. Після цього було розроблено електричну принципову схему, для опису підключень між модулями та мікроконтролерами. Сама схема описує систему, що має два мікроконтролери які виконують різні задачі для досягнення спільної цілі. Цей вибір був зумовлений необхідністю розмежувати обчислювальне навантаження від необхідності постійно обраховувати обернену кінематику, опрацьовувати відеоряд з камери та забезпечувати зв'язок з оператором через WiFi канал, що є дуже складним до реалізації на одному мікроконтролері одночасно.

Потім був етап збірки прототипу, що відбувався за допомогою програми 3Д-моделювання SOLIDWORKS. Завдяки її використанню була створена 3Д-модель конструкції та розробка повороту башти. Потім були використані технології 3Д-друку для виготовлення конструкційних деталей, що дозволило закінчити збірку прототипу.

І для завершення прототипу було розроблено програмне забезпечення, що було розділене на дві частини, через причину необхідності прошити 2 мікроконтролери. Як результат можна було розбити спеціалізовані алгоритми для специфічних завдань кожного центру обчислень. Мікроконтролер STM32F103C8T6 виступає у ролі центру, що збирає данні з датчиків йодометрії та застосовує їх для вирішення завдань оберненої кінематики та здійснення руху згідно отриманих команд. ESP32у свою чергу виступає як відеопроцесор та хост локального сервера для підтримки інтерфейсу керування роботом.

Подальші покращення можуть полягати переході на потужніші двигуни, також додатково можна перейти від паралельного підключення до одного драйвера до з'єднання всіх серводвигунів через єдину шину, що буде переносити керуючий сигнал та живлення. Також можна перейти на акумулятори із іншою хімією, наприклад на LiPo, які мають більшу енергетичну щільність за NiCd. Також можна скористатися додатковою стабільністю та додати функціоналу до кінцівок, щоб вони не тільки виконували функцію ніг, а також могли виступати у ролі маніпуляторів. Додатково можна розширити кількість датчиків та надати можливість відслідковувати індивідуальне положення ніг та навантаження, що вони отримують у реальному часі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.
2. U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek, "RHex: A simple and highly mobile hexapod robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 616–631, Jul. 2001.
3. A. Roennau et al., "LAURON IV: A robust six-legged walking robot for rough terrain," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Anchorage, AK, USA, 2010, pp. 131–138.
4. D. Belter, "Integrated Motion Planning for a Hexapod Robot Walking on Rough Terrain," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 6918–6923, 2011.
5. А. В. Котусенко та А. С. Момот, "Аналіз алгоритмів навігації автономних роботів," у *Зб. праць XVIII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених "Погляд у майбутнє приладобудування"*, Київ, 13–14 трав. 2025, с. 109–112.
6. M. Bjelonic, N. Kottege, T. Homberger, P. Borges, P. Beckerle, and M. Chli, "Weaver: Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain," *J. Field Robot.*, vol. 35, no. 7, pp. 1063–1079, Oct. 2018, doi: 10.1002/rob.21795.
7. B.-M. Shu, Y.-Q. Guo, W.-H. Luo, Z.-D. Xu, and Q. Xu, "Structure and Gait Design of a Lunar Exploration Hexapod Robot Based on Central Pattern Generator Model," *Actuators*, vol. 13, no. 2, p. 79, Feb. 2024, doi: 10.3390/act13020079.
8. J. Delmerico, S. Mintchev, A. Giusti, B. Gromov, K. Melo, T. Horvat, C. Cadena, R. Siegwart, A. Ijspeert, and D. Scaramuzza, "The current state and future outlook of rescue robotics," in *Field and Service Robotics (Springer Proceedings in Advanced Robotics)*, vol. 16, M. Hutter and R. Siegwart, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2018, pp. 445–471, doi: 10.1007/978-3-319-67361-5\_29.
9. M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825, 2008, doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833.

10. "Atlas (robot)," *Wikipedia*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas\\_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas_(robot)). [Accessed: 07-May-2026].
11. M. Shamsuddoha, T. Nasir, and M. S. Fawaaz, "Humanoid Robots like Tesla Optimus and the Future of Supply Chains: Enhancing Efficiency, Sustainability, and Workforce Dynamics," *Automation*, vol. 6, no. 1, p. 9, 2025, doi: 10.3390/automation6010009.
12. C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell, "Design of HyQ—a hydraulically and electrically actuated quadruped robot," *Proc. Inst. Mech. Eng. I: J. Syst. Control Eng.*, vol. 225, no. 6, pp. 831–849, 2011, doi: 10.1177/0959651811402275.
13. J. Moses and G. Ford, "See Spot save lives: fear, humanitarianism, and war in the development of robot quadrupeds," *Digital War*, vol. 2, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1057/s42984-021-00037-y.
14. D. Wettergreen, H. Pangels, and J. Bares, "Behavior-based gait execution for the Dante II walking robot," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, Pittsburgh, PA, USA, 1995, vol. 3, pp. 274–279, doi: 10.1109/IROS.1995.525895.
15. S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, and R. Tedrake, "Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot," *Auton. Robots*, vol. 40, no. 3, pp. 429–455, Mar. 2016, doi: 10.1007/s10514-015-9479-3.
16. N. Gyrichidi, M. P. Romanov, Y. Y. Tsepkin, and A. M. Romanov, "Enabling Navigation and Mission-Based Control on a Low-Cost Unitree Go1 Air Quadrupedal Robot," *Designs*, vol. 9, no. 2, art. no. 50, Apr. 2025, doi: 10.3390/designs9020050.
17. J. R. Martinez-de Dios and A. Ollero, "An Infrared Vision System for Field Robotics Applications," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 35, no. 1, pp. 7–21, 2002, doi: 10.3182/20020721-6-ES-1901.00813.
18. S.-Y. Shin, Y.-W. Kang, and Y.-G. Kim, "Obstacle Avoidance Drone by Deep Reinforcement Learning and Its Racing with Human Pilot," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 24, p. 5571, Dec. 2019, doi: 10.3390/app9245571.
19. В. С. Якотюк та А. С. Момот, "Аналіз ефективності методів пошуку

вибухонебезпечних предметів із використанням БПЛА," у *Зб. праць XIX Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених "Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"*, Київ, 20–21 груд. 2023, с. 373–376.

20. R. L. Simpson, "Computer vision: an overview," *IEEE Expert*, vol. 6, no. 4, pp. 11–15, Aug. 1991, doi: 10.1109/64.85917.

21. Y. J. Zhang, "Computer Vision Overview," in *3-D Computer Vision*, Singapore: Springer, 2023, pp. 1–21, doi: 10.1007/978-981-19-7580-6\_1.

22. A. Momot and O. Zemliakov, "Automated semantic segmentation of terrain images," *Norwegian Journal of Development of the International Science*, no. 156, pp. 114–118, 2025, doi: 10.5281/zenodo.10817342.

23. C. Chen, J. Lin, B. You, J. Li, and B. Gao, "Hexapod Robot Motion Planning Investigation Under the Influence of Multi-Dimensional Terrain Features," *Front. Neurorobot.*, vol. 19, art. no. 1605938, 2025, doi: 10.3389/fnbot.2025.1605938.

24. M. Bjelonic, T. Homberger, N. Kottege, P. Borges, M. Chli, and P. Beckerle, "Autonomous Navigation of Hexapod Robots With Vision-based Controller Adaptation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Singapore, 2017, pp. 5612–5619, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989655.

25. R. Bangera, "The Convergence of Private Wireless with AI and Machine Learning: Investigating how private networks enable real-time data processing at the edge for AI-driven applications in manufacturing, predictive maintenance, and autonomous systems," *Int. J. Artif. Intell. Digit. Res.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2026.

26. M. Neshat, G. Sepidname, E. Mehri, and A. Zalimoghadam, "The Review of Soft Computing Applications in Humanitarian Demining Robots Design," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 4, Jan. 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i4/55595.

27. Р. М. Галаган, А. А. Сакута, А. С. Момот, О. В. Муравйов, та О. А. Повшенко, "Перспективи розвитку чотириногих роботів з функцією голосового управління," *Вісник Херсонського національного технічного університету*, № 4(95), с. 23–34, 2025, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2025.4.2.3.

28. О. М. Корнієнко та А. С. Момот, "Аналіз ефективності сенсорних систем

гексапода для автономної навігації у динамічному середовищі," у *Зб. праць XXI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених "Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"*, Київ, 10–11 груд. 2025, с. 162–165.

29. R. Ott, M. Gutiérrez, D. Thalmann, and F. Vexo, "VR Haptic Interfaces for Teleoperation: An Evaluation Study," in *Proc. IEEE Intell. Veh. Symp. (IVS)*, Las Vegas, NV, USA, 2005, pp. 789–794, doi: 10.1109/IVS.2005.1505201.

30. R. Parasuraman, T. B. Sheridan, and C. D. Wickens, "A model for types and levels of human interaction with automation," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans*, vol. 30, no. 3, pp. 286–297, May 2000, doi: 10.1109/3468.844354.

31. H.-W. Park, S. Park, and S. Kim, "Variable-Speed Quadrupedal Bounding Using Impulse Planning: Untethered High-Speed 3D Running of MIT Cheetah 2," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, pp. 5163–5170, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139918.

32. K. Ogawa, K. Narioka, and K. Hosoda, "Development of whole-body humanoid 'pneumat-BS' with pneumatic musculoskeletal system," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 4838–4843, doi: 10.1109/IROS.2011.6095091.

33. R. D. Savatekar and A. Dum, "Design of control system for articulated robot using Leap Motion sensor," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 1407–1417, 2016.

34. "Mobile Delta Robot Zaps Weeds in Agricultural Fields," *Automation News*, Jul. 9, 2023. [Online]. Available: <https://www.assemblymag.com/articles/97943-mobile-delta-robot-zaps-weeds-in-agricultural-fields>.

35. "3. Fundamentals of Hexapod Robot," *Hackaday.io*. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/21904-hexapod-modelling-path-planning-and-control/log/62326-3-fundamentals-of-hexapod-robot>. [Accessed: May 10, 2026].

36. L. Chabin, "Gaits," *Laurent Chabin Personal Homepage*. [Online]. Available: <http://chabin.laurent.free.fr/gaits.htm>. [Accessed: May 17, 2026].

37. S. Zhang, X. Zhang, and L. Sun, "Gait Analysis and Stability Evaluation of a

Hexapod Robot," *Acad. J. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 160–168, 2025, doi: 10.54097/s3zkw273.

38. I. O. Dovbysh, O. V. Muraviov, A. S. Momot, and H. A. Bohdan, "Autonomous UAV Navigation: Technologies for Orientation and Localization," *Applied Questions of Mathematical Modelling*, vol. 8, no. 1, pp. 57–61, 2025.

39. "I2C vs SPI vs UART: Introduction and Comparison — Similarities and Differences," *Total Phase Blog*, Dec. 9, 2021. [Online]. Available: <https://www.totalphase.com/blog/2021/12/i2c-vs-spi-vs-uart-introduction-and-comparison-similarities-differences/>. [Accessed: May 19, 2026].

40. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification*, revision 3.3, document PS-MPU-6000A-00, InvenSense, Inc., Sunnyvale, CA, USA, May 2012.

41. *MPU-9250 Product Specification*, revision 1.1, document PS-MPU-9250A-01, InvenSense, Inc., San Jose, CA, USA, Jun. 2016.

42. *BMI160 Small, Low Power Inertial Measurement Unit Datasheet*, document revision 1.0, document number BST-BMI160-DS000-09, Bosch Sensortec, Reutlingen, Germany, Nov. 2020.

43. *MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo Specifications*, Tower Pro, Distributed by HandsOn Technology, Tech. Rep. MG996R-DS, 2026.

44. ANNIMOS DSSERVO Technology Co., Ltd., *DS5180 (RED) 7.4V 80kg RC Digital Servo Product Datasheet*, n.d.

45. Miuzei, *DS3218 6V 20kg RC Digital Servo Product Datasheet*, n.d..

46. L. Fried, *Adafruit 16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver*, Adafruit Learning System, Tech. Guide 2329, May 2026.

47. *VL53L0X Time-of-Flight (ToF) Laser-Ranging Sensor Datasheet*, document revision 3, STMicroelectronics, Geneva, Switzerland, May 2026.

48. *VL53L4CD Time-of-Flight high accuracy low power proximity sensor Datasheet*, document DS13812-Rev 8, STMicroelectronics, Jul. 2024.

49. *TMF8801 Time-of-Flight Sensor Datasheet*, document DS000648, v4-00, ams AG, Premstaetten, Austria, Jul. 2019.

50. *ULN2001, ULN2002, ULN2003, ULN2004 Seven Darlington arrays*

*Datasheet*, document DocID5279 Rev 14, STMicroelectronics, Geneva, Switzerland, Nov. 2021.

51. *28BYJ-48-5V Stepper Motor Specifications*, Kiatronics, Tech. Rep. 28BYJ-48, 2026.

52. *SS41F Hall Latch Position Sensor Datasheet*, version 3.10, SEC Electronics, Inc., Nov. 2013.

53. *SSD1306 Advance Information 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller Datasheet*, revision 1.1, Solomon Systech Limited, Apr. 2008.

54. *ESP32 Wi-Fi & Bluetooth MCU Datasheet*, version 1.0, Espressif Systems, Shanghai, China, 2016.

55. *STM32F103x8, STM32F103xB Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU Datasheet*, document revision 18, STMicroelectronics, Geneva, Switzerland, Jun. 2023.

56. І. О. Довбиш, О. В. Муравйов, Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, та А. С. Момот, "Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА," *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 34 (73), № 5, с. 16–21, 2023.

57. *LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator Datasheet*, document SNVS124G, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, Mar. 2023.

58. *TPS40054, TPS40055, TPS40057 Wide-Input Synchronous Buck Controller Datasheet*, document SLUS593J, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, Jun. 2022.

59. Squieler, *VL53L0X---STM32-HAL: VL53L0X STM32F4 Library*, version main. GitHub, 2021. Available: <https://github.com/Squieler/VL53L0X---STM32-HAL>.

60. Espressif Systems, *Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) API Reference*, v5.x. Espressif Systems, 2026. [Online]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/>

61. Espressif Systems, *ESP32 Camera Driver Component*, version 2.0. GitHub, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/espressif/esp32-camera>

62. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

63. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.

64. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

65. Комп'ютерне проєктування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

66. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслєв, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

67. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

68. Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.