

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ІНЖЕНЕРНО - ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ЖУЧЕНКО
« ____ » _____ 20__ р

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з напрямку підготовки **151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

на тему: *Автоматизація процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота*

Виконав: студент 4 курсу, групи ЛА-91
(шифр групи)

Чередниченко Віктор Ігорович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

_____ (підпис)

Керівник доцент, к.т.н, Сазонов Артем Юрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Охорона праці ст. викл, к.т.н. Ковтун А. І.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент _____

(підпис)

Київ - 2023 року

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

Інженерно-хімічний факультет
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології хімічних виробництв»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ЖУЧЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Чередниченку Віктору Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота

керівник проекту Сазонов Артем Юрійович, доцент, к.т.н
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № 2024-с

2. Термін подання студентом проекту 14 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту: опір обмотки якоря серводвигуна $0,667\text{Ом}$; індуктивність обмотки якоря $0,425 \cdot 10^{-3}\text{Гн}$; коефіцієнт пропорційності електричного поля $0,3$; керуюча напруга $4,8 \dots 8,4\text{В}$; коефіцієнт енкадера $0,293$, момент сили валу двигуна $0 \dots 2,3\text{кг}\cdot\text{см}$, коефіцієнт тертя $0,2$, момент інерції $0,01\text{кг}\cdot\text{м}^2$, швидкість $0 \dots 100\text{ л/хв}$.

4. Зміст пояснювальної записки аналіз поняття «крокуючий робот». огляд існуючих рішень, розробка кінематичної моделі, математичне моделювання сервомотру, синтез та дослідження системи керування, збір прототипу крокуючого робота, розробка меню управління та алгоритму стабілізації платформи, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) кінематичні схеми крокуючого робота (для прямої і зворотної задачі кінематики), електрична схема сервомотору.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун А. І., ст. викл., к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз технологічних рішень існуючих крокуючих роботів	14.02.2023	
2	Проектування кінематики крокуючого робота	4.03.2023	
3	Математичне моделювання статичної моделі робота	25.03.2023	
4	Математичне моделювання динамічної моделі робота	3.04.2023	
5	Синтез та дослідження системи керування роботом	16.04.2023	
6	Розробка алгоритму стабілізації платформи робота	20.04.2023	
7	Розробка меню керування	25.04.2023	
8	Охорона праці	27.04.2023	

Студент

(підпис)

В.І. Чередниченко

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

А. Ю. Сазонов

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з наступних елементів: пояснювальна записка – 81 сторінка, 2 додатки, 20 літературних джерел та 1 власна публікація

В дипломному проекті проаналізовано існуючі рішення у сфері крокуючих роботі. Розроблено кінематичну модель чотириноного крокуючого робота. Виконано математичне моделювання статичного та динамічного режимів сервомотору у програмному середовищі Matlab та його модулі Simulink. Виконано синтез та дослідження впливу систем керування з П, ПІ та ПІД-регуляторами на динамічні показники сервомотору. Створено прототип крокуючого робота та написано алгоритм автоматичної стабілізації платформи робота і була розроблена web-сторіна, що виконує функцію меню керування.

Ключові слова: крокуючий робот, сервомотор, програмне забезпечення, математична модель, регулятор.

ABSTRACT

The diploma project consists of the following elements: explanatory note – 81 pages, 2 appendices, 20 literary sources and 1 own publication.

In the diploma project were analyzed the existing solutions in the field of four-legged walking robots were. A kinematic model of a four-legged walking robot has been developed. Mathematical modelling of static and dynamic modes for servomotor was performed in the Matlab software environment and its Simulink module. The synthesis and study of the influence of control systems with P, PI and PID controllers on the dynamic parameters of the servo motor were performed. A prototype of a walking robot was created, an algorithm for automatic control for the platform stability of the walking robot was written, and a web page, that performs the function of a control menu, has been developed.

Keywords: walking robot, servo motor, software, mathematical model, regulator.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Аналіз поняття «крокуючий робот». огляд існуючих рішень	10
1.1 Аналіз поняття «крокуючий робот»	10
1.2 Огляд існуючих рішень	11
2. Розробка кінематичної моделі.....	15
2.1 Пряма задача кінематики.....	15
2.2 Зворотна задача кінематики	23
3. Математичне моделювання крокуючого роботу.....	29
3.1 Моделювання станичного режиму	29
3.2 Моделювання динамічного режиму	33
4. Синтез та дослідження системи керування крокуючого робота	39
4.1 Синтез регуляторів за допомогою Matlab PID Tuner App	39
4.2 Синтез регуляторів за допомогою Response Optimizer.....	43
4.3 Підсумки по розділу.....	47
5. Перевірка працездатності запропонованих рішень	48
5.2 Розробка меню управління роботом.....	50
5.3 Розробка режиму автоматичної стабілізації платформи	52

					ДПЛА91.21.00.000ПЗ			
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Лат	Автоматизація процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота	Літ.	Анк.	Архівів
<i>Разроб.</i>		<i>Чередниченко В.І.</i>					6	81
<i>Перев.</i>		<i>Сазонов А.Ю.</i>				<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ІХФ, ТПЗА, ЛА-91</i>		
<i>Н.Контр.</i>								
<i>Затв.</i>		<i>Сазонов А.Ю.</i>						

6. Охорона праці	57
6.1 Вступ до розділу.....	57
6.2 Загальна характеристика об'єкту	57
6.3 Вибухова та пожежна безпека	59
6.4 Електробезпека.....	59
6.5 Мікроклімат.....	60
6.6 Висновки по розділу.....	61
Висновки.....	62
Список використаної літератури.....	63
Додаток 1. Лістинг алгоритму стабілізації платформи мовою С	66
Додаток 2. Лістинг web-сторінки меню управління мовою HTML	71

платформи крокуючого евакуаційного робота. Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. виконати огляд існуючих рішень кінематичних систем крокуючих роботів;
2. запропонувати та розробити кінематичну модель евакуаційного крокуючого робота здатного вільно рухатись по складному, нерівномірному ландшафту;
3. розробити математичну моделі крокуючого робота та провести дослідження її поведінки у статичному та динамічному режимах;
4. виконати синтез та вибір регулятора з подальшим дослідженням його впливу на заявлений об'єкт керування;
5. розробити алгоритм стабілізації верхньої платформи робота відносно глобальних координат у просторі.

Об'єктом дипломного проекту є процес евакуації потерпілого та переміщення крокуючого робота у неструктурованому середовищі.

Предметом дипломного проекту є стабільність платформи крокуючого робота у неструктурованому середовищі.

<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	9

Наведена схема дозволяє виконувати плавне переміщення крокуючими рухами у всіх напрямках і забезпечує можливість нахилу платформи, що дозволяє реалізувати режим її автоматичної стабілізації.

Розглянемо відмінності кінематичних моделей представлених роботів. Spot, HyQReal та Laikago приводять у дію суглоб 1-2 (або 2-2, враховуючи їх однаковість) за допомогою кривошипно-шатунного механізму, коли як ANYmal виконує цю дію звичайним електроприводом. Не дивлячись на певну комплексність реалізації першого варіанту (кривошипно-шатунного механізму), він пропонує більший момент сили з'єднання ланок, що у свою чергу позитивно впливає на стійкість і швидкість пересування робота.

Наведені приклади являються одними з найкращих реалізацій чотириногих крокуючих роботів. Як можна побачити, лише HyQReal та ANYmal наближено підходять для реалізації поставлених цілей, але має занадто високу вагу.

Отже, можна зробити висновки, що ніша середніх та легких евакуаційних роботів майже не заповнена. Таким чином і постає актуальність даного дипломного проекту – розробка евакуаційного роботу легкого або середнього класу здатного пересуватись і виконувати евакуаційні завдання на складному нерівномірному рельєфі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	14

2. РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

2.1 Пряма задача кінематики

Пряма задача кінематики завжди є необхідною, щоб виконати задачу обчислення координат остаточного положення кінцевої ланки робота (надалі, точка P; процедура її пошуку для кожної ноги ідентична, оскільки конструкції та приводи ніг однакові) у тривимірній глобальній системі координат на основі даних про кути повороту серводвигунів [5, 6]. Для нашого випадку пряма задача кінематики буде вирішена лише для однієї ноги робота, а потім застосована для всієї кінематичної моделі. Причина такого рішення – ідентичність та детермінованість, як одного самостійного об'єкту, кожної ноги крокуючого робота. Іншими словами, математична модель управління однією ногою буде уніфікованою.

Для початку, ведемо позначення системи координат для кожної ноги робота та позначимо шукані точки P (рис. 2.1).

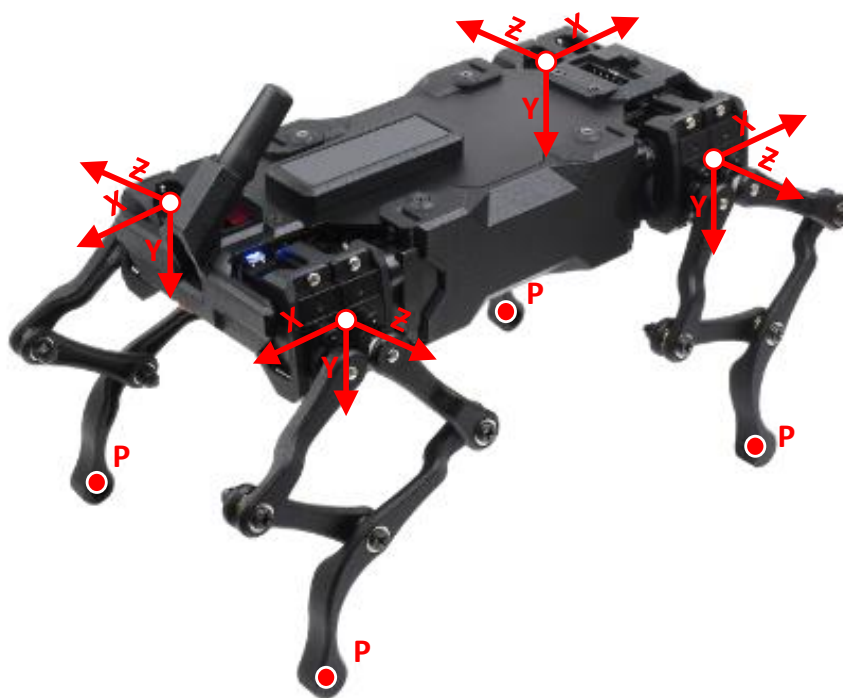


Рисунок 2.1. – системи координат ніг робота моделі WaveShare WAVEGO та шукані точки положень кінцевих ланок ніг P [7]

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат

ДПЛА91.21.00.000ПЗ

Маючи всі необхідні рисунки, перейдемо до створення матриць обертання для побудованої кінематичної схеми (рис. 2.3 та 2.4).

Почнемо зі з'єднання 0-1:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 & 0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \\ 0 & \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Перейдемо до з'єднання 0-2:

$$R_2^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 & 0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \\ 0 & \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Тепер обчислимо матрицю для з'єднання 1-3:

$$R_3^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Перейдемо до 2-4:

$$R_4^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Матриця обертання для 3-5:

$$R_5^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Далі, для з'єднання 4-5:

$$R_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

І нарешті 5-P:

$$R_P^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Для отримання матриць гомогенних перетворень окрім матриць обертань нам також необхідні вектори зміщень, отже знайдемо їх.

Перед початком розрахунку векторів зміщень, введемо позначення гіпотенузи у прямокутному трикутнику, що створений ланками o_1 та o_2 , ним стане літера h . Знайдемо її значення у загальному вигляді, скориставшись теоремою Піфагора:

І нарешті 5-Р:

$$H_P^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & \cos(\theta_5 + \epsilon) \cdot e \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & \sin(\theta_5 + \epsilon) \cdot e \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Для знаходження результуючої матриці гомогенних перетворень виконаємо почергове перемноження матриць окремих з'єднань у порядку, що визначає перетворення координат у загальній кінематичній моделі:

$$H_P^0 = H_1^0 \times H_3^1 \times H_5^3 \times H_2^0 \times H_4^2 \times H_5^4 \times H_P^5. \quad (2.28)$$

Результат математичних операцій у формулі (2.28) буде вкрай нерационально обчислювати, оскільки у програмному забезпеченні існуючих роботів (окрім деяких експериментальних зразків) задаються саме матриці з'єднань (як, наприклад, у формулі 2.21), а не остаточна матриця гомогенних перетворень.

2.2 Зворотна задача кінематики

Зворотна задача кінематики, як легко здогадатись з назви, є інвертованою версією прямої задачі кінематики де відбувається пошук параметрів положення сервомоторів (їхніх кутів повороту), у відповідних координатних системах, використовуючи координати кінцевого положення раніше детермінованої точки «Р» [5, 6]. Аналогічно прямій задачі кінематики, дана задача буде вирішена лише для однієї ноги крокуючого робота (причини однакові).

Класично, робимо ілюстрацію для проєкції кінематичної системи на координатну площину «ХУ» (рис. 2.8). Зворотна задача кінематики буде розв'язана графічним методом. Її результатом стануть залежності, що визначають поточні числові значення кутів $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ відповідно до значень координат x, y, z . Також, результати зворотної задачі кінематики можуть бути використані у прямій задачі кінематики для процесу знаходження координат кінцевого положення останньої ланки робота в залежності від числових значень кутів з'єднань.

Визначивши формулу кута $\angle F5P$, переходимо у трикутник «P5M». Кут $\angle F5M = \theta_3$, як внутрішні односторонні. Отже, $\angle P5M$ можна знайти наступним чином:

$$\angle P5M = \theta_3 - \angle F5P. \quad (2.48)$$

Трикутник «P5M» – прямокутний, значить l_6 і l_{10} будуть визначені наведеними співвідношеннями:

$$l_6 = \cos \angle P5M \cdot l_3 \quad (2.49)$$

$$l_{10} = \sin \angle P5M \cdot l_3 \quad (2.50)$$

Знайдемо довжину l_7 і l_9 :

$$l_7 = y - l_6 \quad (2.51)$$

$$l_9 = l_{10} + \frac{k}{2} - x \quad (2.52)$$

Переходимо до прямокутного трикутника «2Т5», де знаходимо l_8 :

$$l_8 = \sqrt{l_7^2 + l_9^2} \quad (2.53)$$

І одразу шукаємо кут $\angle T52$:

$$\tan \angle T52 = \frac{l_9}{l_7}; \quad (2.54)$$

Трикутник «2Т5» буде рівним трикутнику «2І5» і навпаки, бо вони є частиною прямокутника «2Т5І» та утворені його діагоналлю l_8 . Звідси слідує, $\angle T52 = \angle I25$.

На черзі трикутник «245», де відомі всі сторони. Використовуємо теорему косинусів, щоб знайти $\angle 425$:

$$b^2 = l_8^2 + a_1^2 - 2 \cdot l_8 \cdot a_1 \cos(\angle 425). \quad (2.55)$$

Звідки:

$$\cos(\angle 425) = \frac{l_8^2 + a_1^2 - b^2}{2 \cdot l_8 \cdot a_1}. \quad (2.56)$$

$$\angle 425 = \cos^{-1} \left(\frac{l_8^2 + a_1^2 - b^2}{2 \cdot l_8 \cdot a_1} \right). \quad (2.57)$$

З виразом для $\angle 425$ можна без зайвих зусиль обчислити кут θ_2 :

$$\theta_2 = \angle 425 - \angle I25. \quad (2.58)$$

У прямокутному трикутнику «4D2» знайдемо сторону довжиною l_{11} :

$$l_{11} = \sin \theta_2 \cdot a_1 \quad (2.59)$$

Визначимо довжину l_{12} :

$$l_{12} = l_{11} + l_9 \quad (2.60)$$

Розглянемо прямокутний трикутник «4H5». У ньому можна знайти кут θ_4 :

$$\sin \theta_4 = \frac{l_{12}}{b}; \quad (2.61)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{l_{12}}{b} \right). \quad (2.62)$$

Виконаємо надбудову «SQ», яка буде співнапрямлена з прямою «4S». За таких умов $\angle 45Q = 180^\circ$ і $\angle M5Q = \theta_4$, як внутрішні односторонні. Пригадаємо, що $\angle F5M = \theta_3$, як внутрішні односторонні. З урахування зазначеної у абзаці інформації, кут θ_5 можна обчислити таким чином:

$$\theta_5 = 180^\circ - (\theta_3 + \theta_4) + \theta_3 = 180^\circ - \theta_4; \quad (2.63)$$

Всі кути, що належать площині «XY» кінематичної моделі ноги робота, знайдені тому переходимо до площини «ZY» (рис. 2.10).

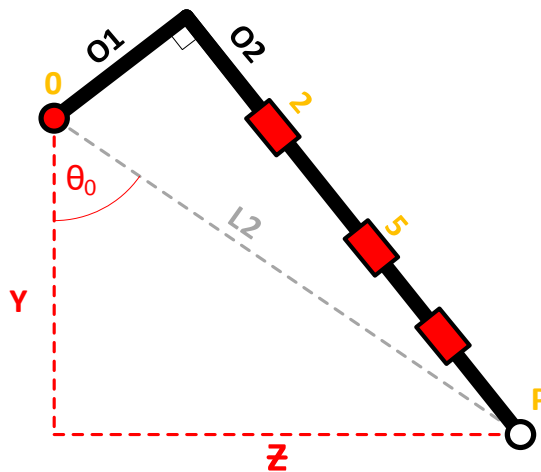


Рисунок 2.10. – проекція кінематичної моделі однієї ноги робота на площину «ZY»

Кут θ_0 знаходимо завдяки наступній формулі:

$$\tan \theta_0 = \frac{y}{z}; \quad (2.64)$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{z} \right). \quad (2.65)$$

Максимальний момент сили валу серводвигуна представлений у позначенні, що не відповідає системі SI. Якщо виконати перетворення у зазначену систему, T_{max} буде рівний 0,22555294999999997 Н·м. Тому для усунення похибки конвертація буде проведена у програмному забезпеченні.

Наведемо структурну схему сервомотора для представлення можливих каналів керування (рис. 3.1).

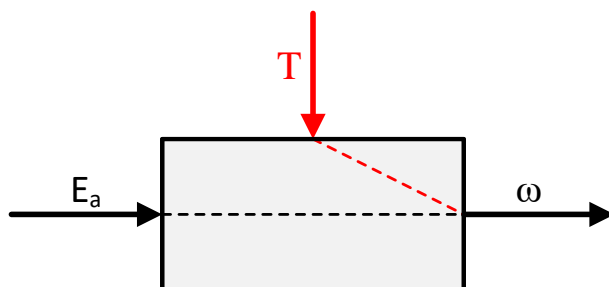


Рисунок 3.1. – структурна схема сервомотору

Маючи числові значення технологічних параметрів та структурну схему, складемо рівняння статики для опису відповідного режиму. Оскільки кут повороту та, відповідно, точність позиціонування прив'язані до інших елементів робота, а решта параметрів, окрім впливу моменту на швидкість, не несуть цінності для керування, розглянемо, в першу чергу, залежність між кутовою швидкістю ω та керуючою напругою E_a , тобто функцію $\omega = f(E_a)$.

В даному випадку, головним *вхідним параметром* (сигналом керування, або керуючою дією), буде вважатись керуюча напруга E_a , а *вихідним* (керованою величиною) буде кутова швидкість обертання ω .

В результаті маємо наступний канал керування: «керуюча напруга E_a » → «швидкість обертання ω ». В подальшому буде використовуватись скорочене найменування « $E_a \rightarrow \omega$ ».

Складемо рівняння статики для функції $\omega = f(E_a)$. Щоб виконати поставлену задачу створимо пропорцію, яка має відповідати співвідношенню між максимальними і мінімальними значеннями параметрів, що входять до функції:

$$\frac{E_{a\max} - E_a}{E_a - E_{a\min}} = \frac{\omega_{\max} - \omega}{\omega - \omega_{\min}} \quad (3.1)$$

Для спрощення подальших розрахунків повернемося до таблиці (3.1), де візьмемо значення ω_{min} і одразу підставимо його у формулу (3.1). Отже, рівняння (3.1) набуває наступного вигляду:

$$\frac{E_{a_{max}} - E_a}{E_a - E_{a_{min}}} = \frac{\omega_{max} - \omega}{\omega}. \quad (3.2)$$

З (3.2) виражаємо функціональну залежність $\omega = f(E_a)$:

$$\omega = \omega_{max} \cdot \left(\frac{E_a - E_{a_{min}}}{E_{a_{max}} - E_{a_{min}}} \right). \quad (3.3)$$

Виконаємо розрахунок альтернативної варіації (3.3), де не буде враховано спрощення, що передувало (3.1.2):

$$\omega = \frac{\omega_{max} \cdot (E_a - E_{a_{min}}) + \omega_{min} \cdot (E_{a_{max}} - E_a)}{E_{a_{max}} - E_{a_{min}}}. \quad (3.4)$$

Функцію $\omega = f(E_a)$ отримано, отже можна переходити до побудови графіку статичної характеристики (рис. 3.2). Формулу (3.4) буде використано для перевірки правильності розрахунків.

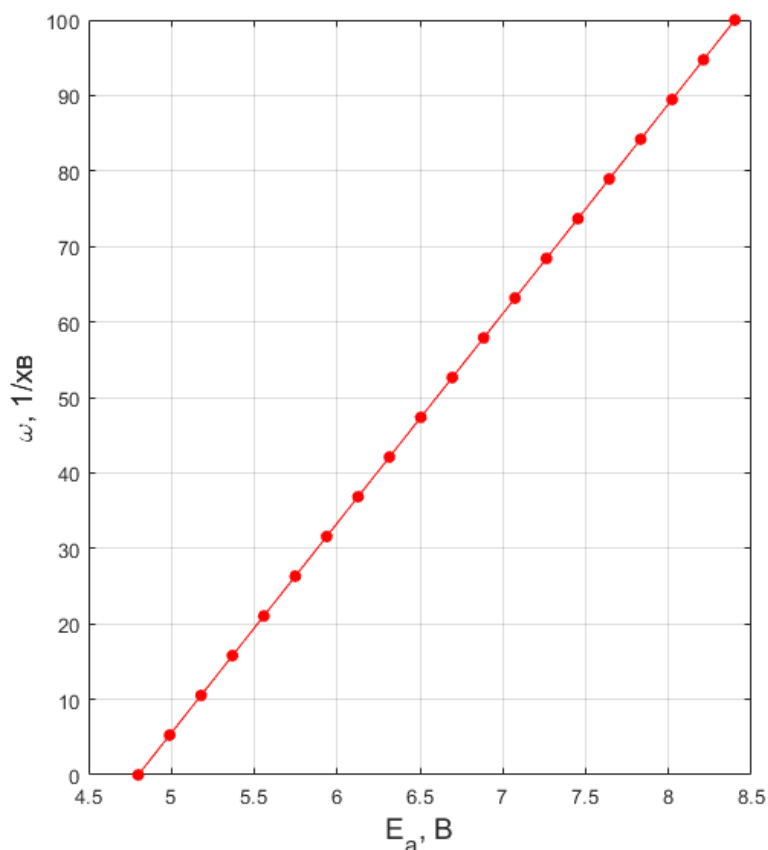


Рисунок 3.2. – статична характеристика серводвигуна за каналом « $E_a \rightarrow \omega$ »

Запишемо альтернативний вигляд (3.11):

$$T_m = T + J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B_0 \cdot \omega, \quad (3.13)$$

де J – момент інерції якоря; B_0 – коефіцієнт тертя; T – крутний момент валу двигуна.

Виконаємо перетворення Лапласа для рівнянь (3.9), (3.10) і (3.11):

$$E_b(s) = k_a \cdot \omega(s); \quad (3.14)$$

$$E_a(s) - E_b(s) = I_a(s) \cdot (s \cdot L_a + R_a); \quad (3.15)$$

$$T_m(s) = k_e \cdot I_a(s). \quad (3.16)$$

Підставимо в (3.15) функцію (3.14) і виражаємо $I_a(s)$:

$$I_a(s) = \frac{E_a(s) - k_a \cdot \omega(s)}{s \cdot L_a + R_a}. \quad (3.17)$$

Наступним кроком необхідно зробити перетворення Лапласа для рівняння (3.13):

$$T_m(s) - T(s) = \omega(s) \cdot (s \cdot J + B_0). \quad (3.18)$$

З (3.18) за допомогою підстановки у неї (3.16) та перетворень потрібно отримати функцію для $\omega(s)$:

$$\omega(s) = \frac{k_e \cdot I_a(s) - T(s)}{s \cdot J + B_0}. \quad (3.19)$$

Узагальнимо передатні функції, що характеризують процеси у серводвигуні за каналом « $E_a \rightarrow \omega$ »:

$$W_1(s) = \frac{I_a(s)}{E_a(s) - E_b(s)} = \frac{1}{s \cdot L_a + R_a}; \quad (3.20)$$

$$W_2(s) = \frac{T_m(s)}{I_a(s)} = k_e; \quad (3.21)$$

$$W_3(s) = \frac{\omega(s)}{T_m(s) - T(s)} = \frac{1}{s \cdot J + B_0}; \quad (3.22)$$

$$W_4(s) = \frac{E_b(s)}{\omega(s)} = k_a. \quad (3.23)$$

Тепер ми маємо всі необхідні передатні функції і можемо отримати результуючу:

$$W(s) = \frac{W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_4(s)} = \frac{k_e}{(s \cdot L_a + R_a) \cdot (s \cdot J + B_0) + k_e \cdot k_a}. \quad (3.24)$$

Запишемо числові значення всіх констант (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Константи сервомотору у динамічному режимі

№ п\п	Назва параметру	Умовне позначення	Одиниці вимірювання	Числове значення
1	Опір обмотки якоря	R_a	Ом	0,667
2	Індуктивність обмотки якоря	L_a	Гн	$0,425 \cdot 10^{-3}$
3	Коефіцієнт пропорційності електричного поля	k_a	–	0,3
4	Керуюча напруга	E_a	В	8,4
5	Коефіцієнт енкодера	k_e	–	0,293
6	Момент сили валу серводвигуна	T	кг·см	2,3
7	Коефіцієнт тертя	B	–	0,2
8	Момент Інерції	J	кг·м ²	0,01

В подальшому, ми будемо проводити дослідження передатної функції серводвигуна у програмному середовищі Matlab Simulink. З цих причин саме там і створимо необхідну схему (рис. 3.5).

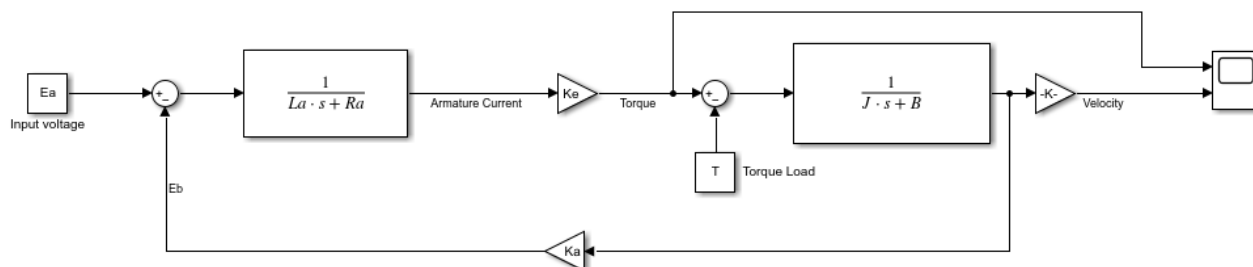


Рисунок 3.5. – схема передатної функції сервомотору у середовищі Matlab Simulink

На графіку (3.6) видно, що перехідний процес протікає плавно, а транспортне запізнення складає близько 0,187 с, що є прийнятним, але не ідеальним результатом для сервомотору. З цих причин, у наступному розділі буде проведено синтез системи керування для мінімізації транспортного запізнення.

					ДПЛА91.21.00.000ПЗ	38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

4. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КРОКУЮЧОГО РОБОТА

У попередньому розділі було зазначено, що перехідна характеристика сервомотору має транспортне запізнення величиною у 0,187 с. В даному розділі буде проведено синтез системи керування, тобто вибір та налаштування регулятора, та дослідження її якості.

Враховуючи певну комплексність передатної функції сервомотору у подальших дослідах буде розглянуто вплив П, ПІ та ПІД регуляторів на неї. Для названих регуляторів було обрані наступні методи синтезу: Matlab PID Tuner і Matlab та Response Optimizer.

Зауважимо, перерегулювання має бути відсутнє, або мінімізоване до значення, яким можна знехтувати, бо скачки керованої величини можуть викликати нестабільність під час позиціонування робота у просторі.

4.1 Синтез регуляторів за допомогою Matlab PID Tuner App

Модуль PID Tuner у програмному середовищі Matlab виконує автоматичне налаштування І, П, ПІ та ПІД регуляторів в залежності від критеріїв, що задані користувачем.

Розпочнемо з П-регулятора. Спочатку потрібно додати блок PID Controller у нашу систему (рис. 4.1). Також, перенесемо деякі ланки у підсистему, щоб зменшити розмір основної схеми.

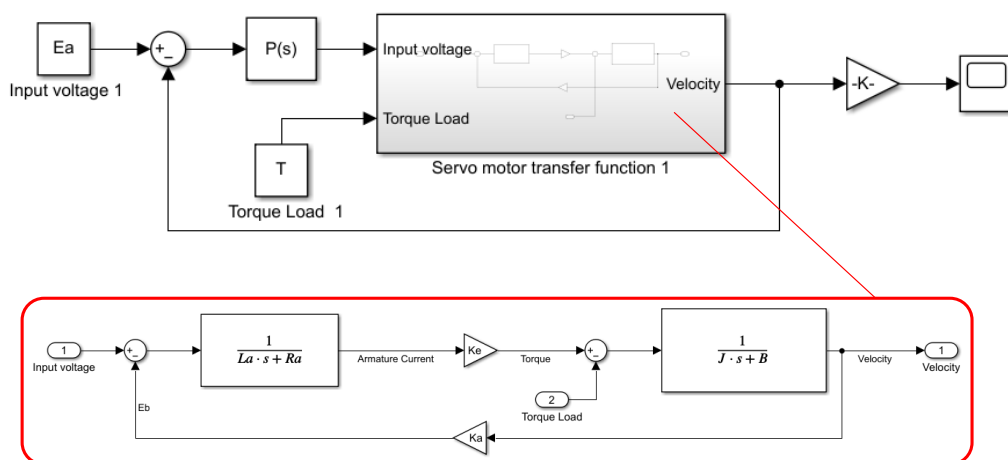


Рисунок 4.1. – схема передатної функції сервомотору з блоком PID Controller у середовищі Matlab Simulink

Потім, подвійним натисканням лівої кнопки миші по блоку PID Controller викликаємо його меню властивостей, де обираємо потрібний нам регулятор і натискаємо кнопку Tune для переходу в Matlab PID Tuner. У ньому, за допомогою верхніх повзунків, вручну налаштуємо бажану транспортну затримку та степінь перерегулювання (рис 4.2).

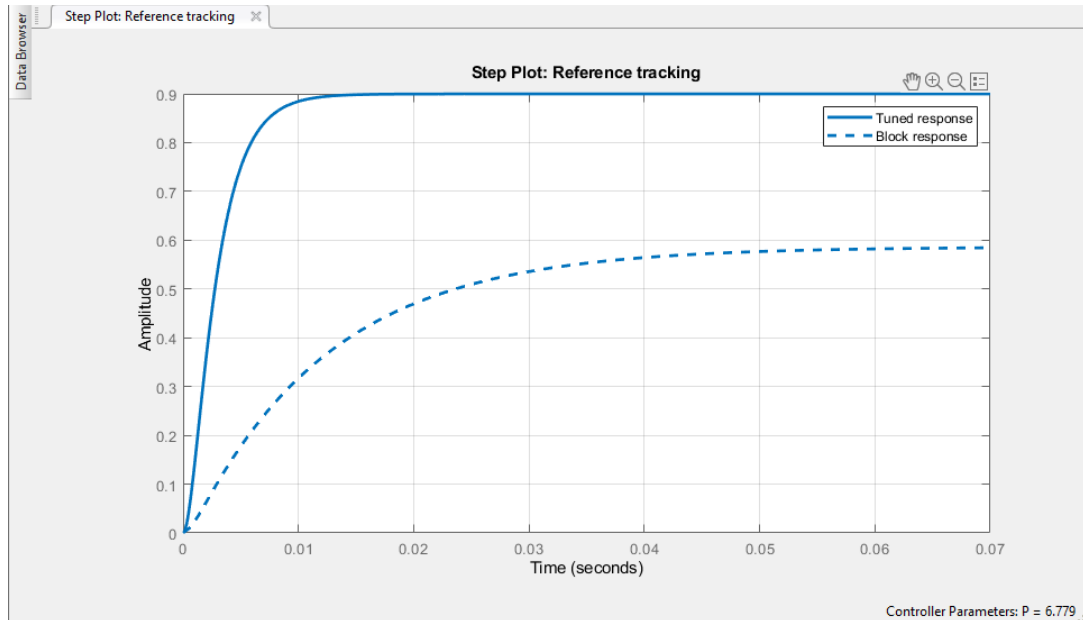


Рисунок 4.2. – синтез та налаштування П-регулятора у модулі PID Tune

Під час налаштування було отримано числове значення пропорційної складової П-регулятора $P = 6,77910946431613$. Інші результати синтезу будуть розглянуті у підсумковій таблиці розділу разом з показниками інших регуляторів. Це зроблено для зручності порівняння отриманих параметрів та для покращення їх сприйняття.

Перехідна характеристика об'єкту керування з П-регулятором та відповідні графіки для інших регуляторів будуть наведені після синтезу всіх регуляторів.

Перед синтезом інших регуляторів перебудуємо схему у Simulink так, щоб графічні виводи перехідних характеристик по керованій величині передавались на один блок візуалізації (спостереження) Scope (рис. 4.3). Аналогічно рисунку 4.1, введемо підсистеми. Це дозволить значно зменшити розмір загальної схеми та збільшить читабельність позначень на рисунку. Варто зауважити, кожна з підсистем ідентична представлений раніше (рис. 4.1.) і всі вони містять однакові значення, що задані заздалегідь визначеними константами.

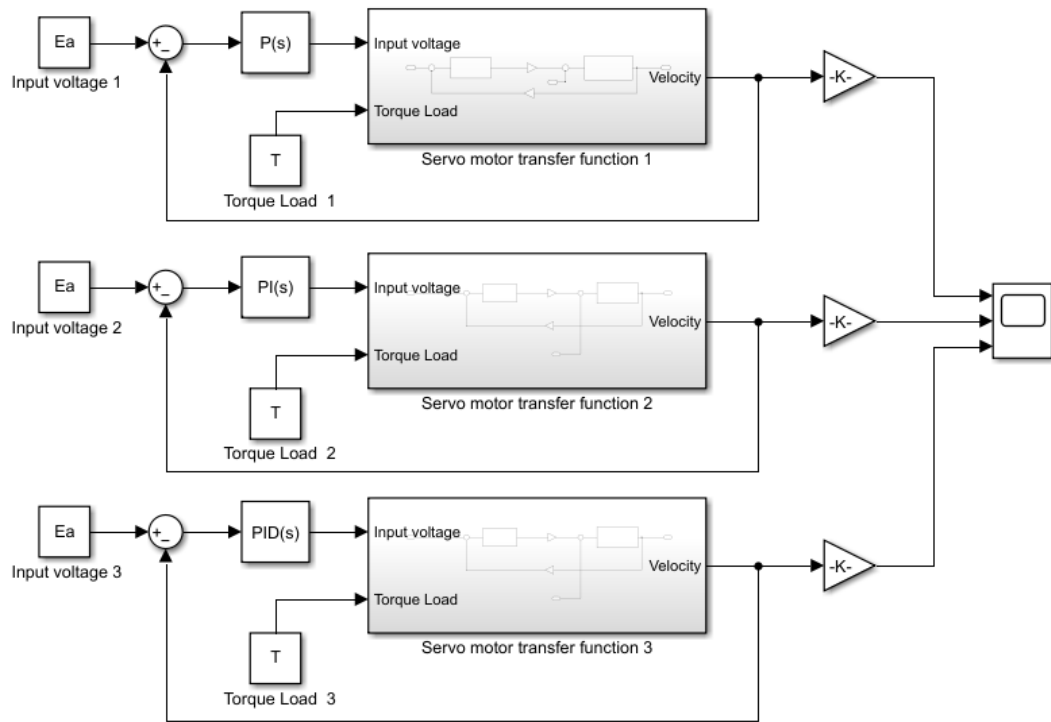


Рисунок 4.3. – перебудована схема передатної функції у середовищі Matlab Simulink
 Перейдемо до синтезу ПІ-регулятора (рис. 4.4).

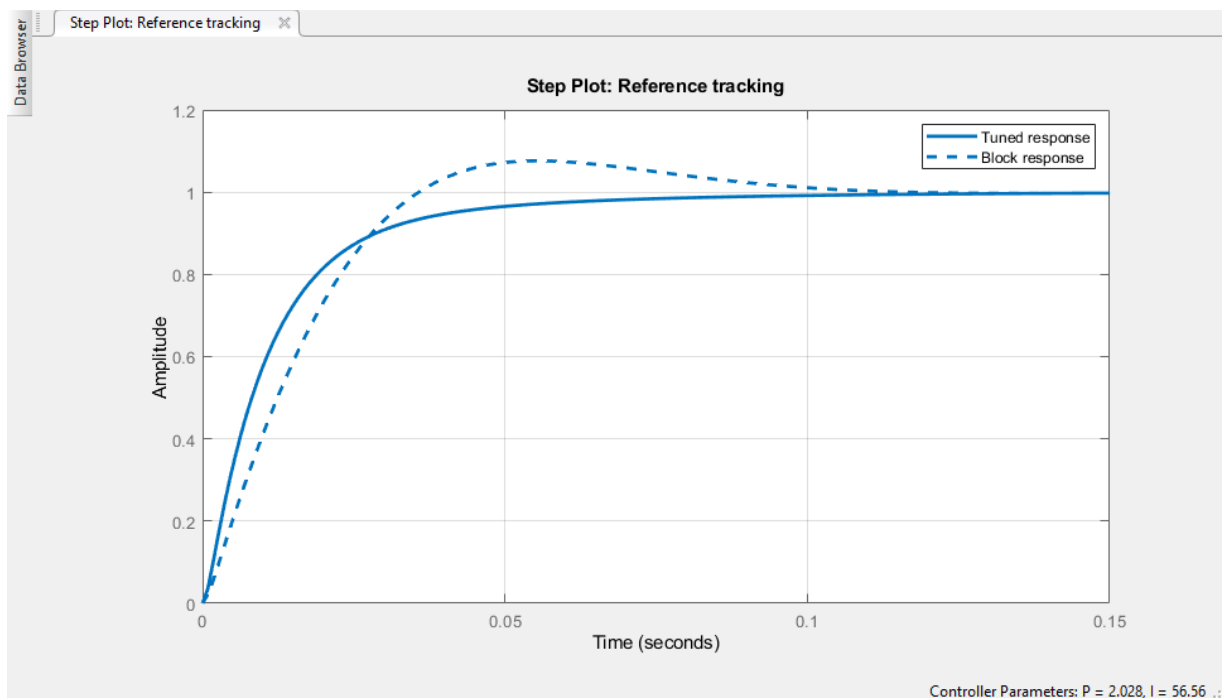


Рисунок 4.4. – синтез та налаштування ПІ-регулятора у модулі PID Tune

Після синтезу та налаштування одержано наступні значення для складових ПІ-регулятора: $P = 2,02760093859877, I = 56,5588307166696$. Ідентично до П-регулятора, не наведені результати синтезу будуть розглянуті у підсумковій таблиці розділу разом з показниками інших регуляторів.

І нарешті синтезуємо ПІД-регулятор (рис. 4.5)

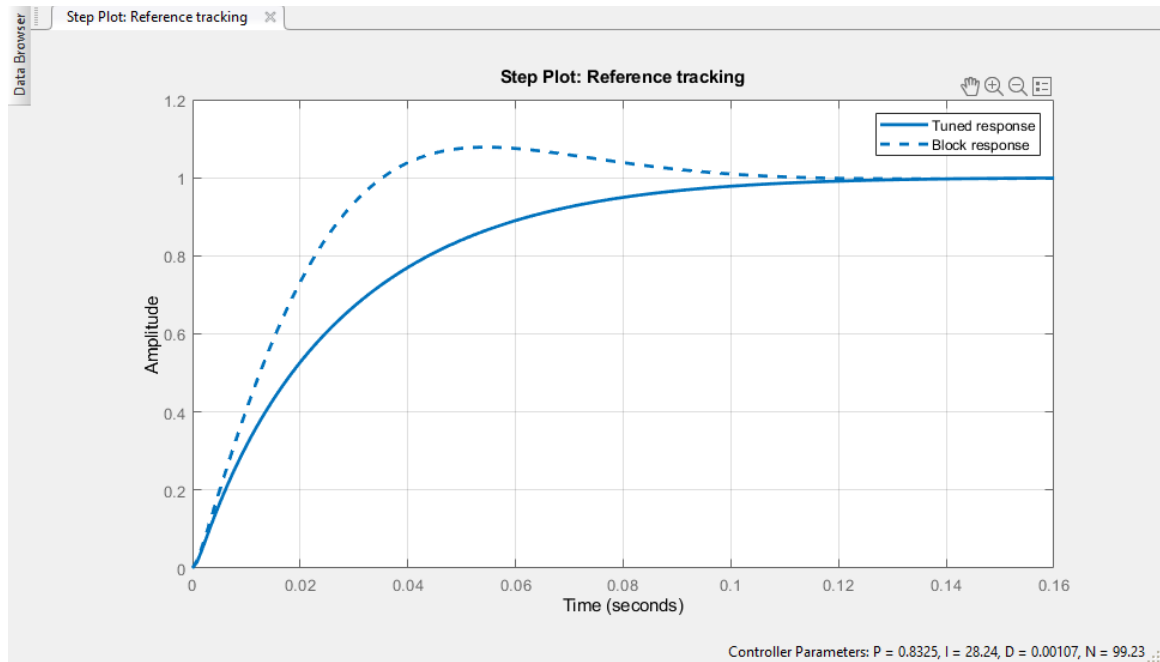


Рисунок 4.5. – синтез та налаштування ПІД-регулятора у модулі PID Tune

Синтезований ПІД-регулятор має наступні числові значення складових:

$$P = 0,83249548811386, I = 28,2412410983922, D = 0,00106964643024321.$$

Так як всі регулятори синтезовано, розглянемо отримані графіки перехідних характеристик (рис. 4.6) та створимо підсумкову таблицю (4.1) й проаналізуємо отримані результати.

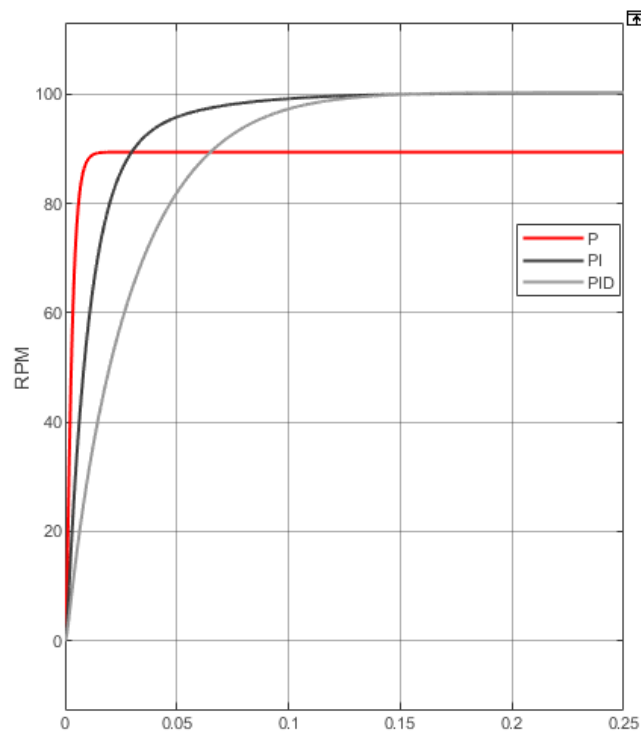


Рисунок 4.6. – перехідні характеристики регуляторів синтезованих за допомогою PID Tune

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат

Таблиця 4.1. Результати синтезу регуляторів

Тип регулятора	Передатна функція	Перерегулювання	Час перехідного процесу
П-регулятор	$W_P = P$	0 %	0,024 с
ПІ-регулятор	$W_{PI} = P + \frac{I}{S}$	0 %	0,189 с
ПІД-регулятор	$W_{PID} = P + \frac{I}{S} + D \cdot S$	0 %	0,172 с

Порівняння результатів та вибір регулятора буде проведено після виконання синтезу альтернативним методом. Тому не зволікаючи переходимо до наступного підпункту розділу.

4.2 Синтез регуляторів за допомогою Response Optimizer

Модуль Response Optimizer, у програмному середовищі Matlab, виконує пошук оптимальної перехідної характеристики, в межах заданих користувачем, шляхом ітераційного підбору складових регулятора.

Щоб розпочати роботу з модулем потрібно, для початку, створити блок Check Step Response Characteristics на лінії вихідного сигналу передатної функції (рис. 4.7). Наявна підсистема та така ж на рисунку 4.1 – однакові.

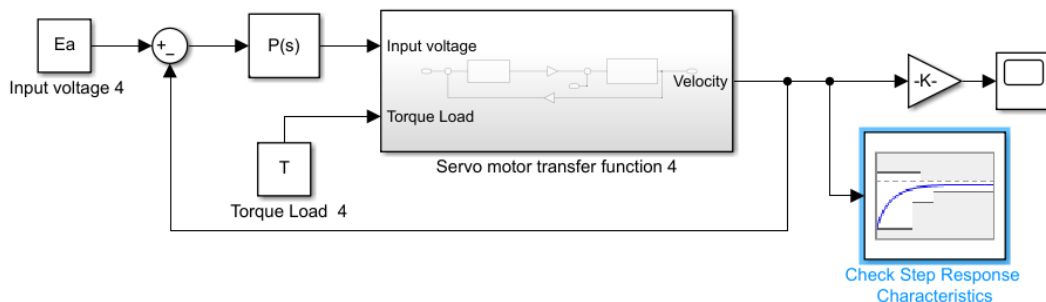


Рисунок 4.7. – схема передатної функції сервомотору з блоком Check Step Response Characteristics у середовищі Matlab Simulink

Наступним кроком, мають бути створені змінні, з довільними початковими значеннями, що відповідатимуть складовим регуляторів. Потім, вони мають бути записані у блок PID Controller (рис. 4.8).

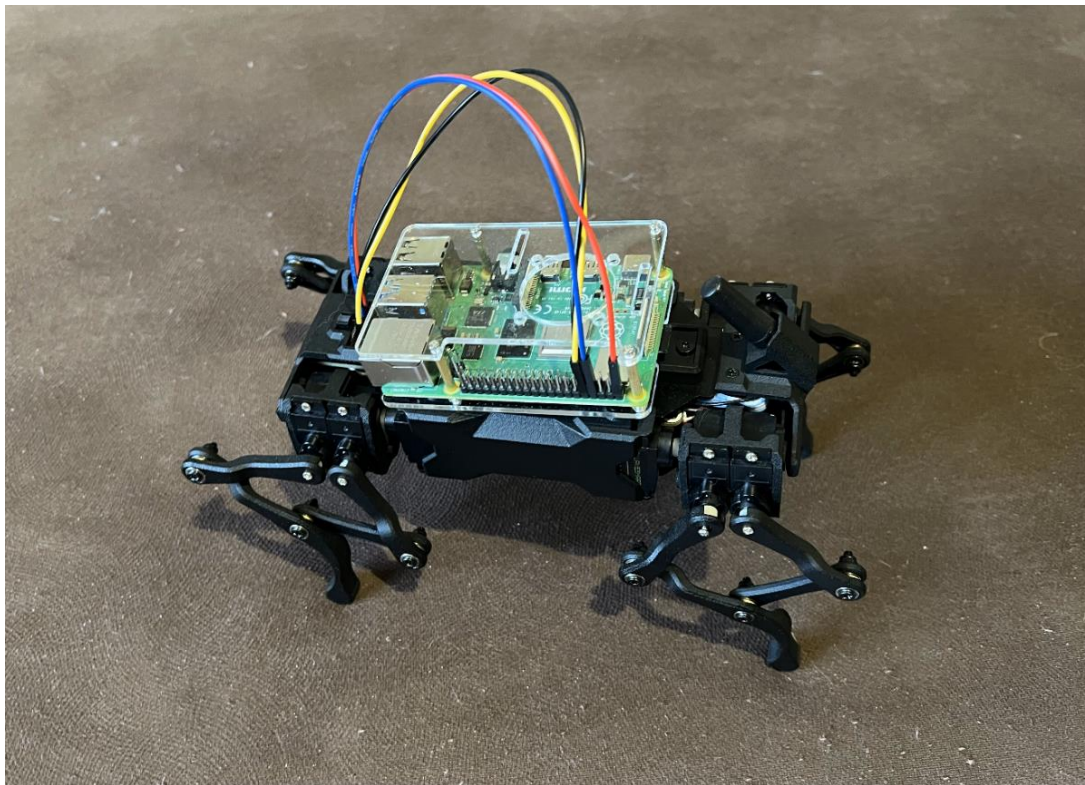


Рисунок 5.2. – зібраний прототип крокуючого робота з встановленим на нього міні-комп'ютером Raspberry PI 4 Model B

Прототип крокуючого робота також обладнаний камерою (рис. 5.3) для візуальної навігації (власної, чи оператора) у навколишньому середовищі.

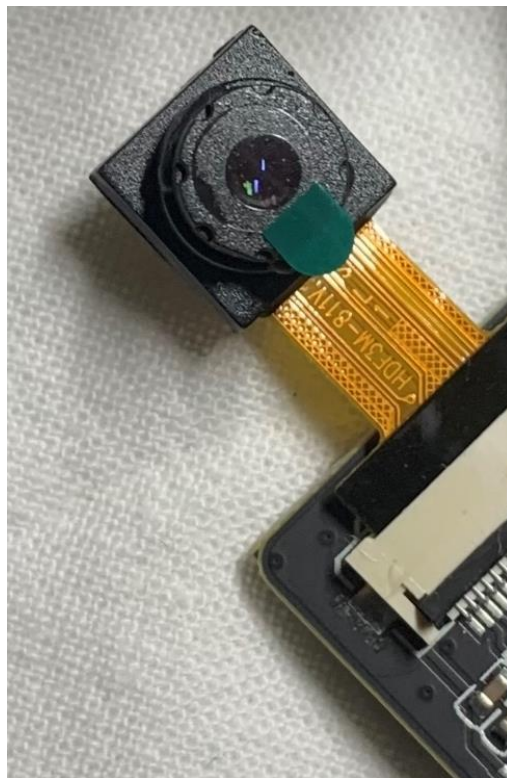


Рисунок 5.3. – камера прототипу крокуючого робота

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат

ДПЛА91.21.00.000ПЗ

Як джерело живлення робот використовує два літій-іонні акумулятори типу 18650 (рис. 5.4), що забезпечують автономну роботу прототипу.



Рисунок 5.4. – акумулятори моделі 18650, що забезпечують живлення робота

5.2 Розробка меню управління роботом

Велика кількість робіт потребує режимів ручного дистанційного керування і даний екземпляр не виключення.

Так як, прототип використовує WI-FI сигнал частотою 2.4 Гц було прийнято рішення по створенню web-сторінки на якій реалізується меню дистанційного керування крокуючим роботом. Щоб підключитись до неї, потрібно під'єднатись до WI-FI мережі робота і, використовуючи web-браузер, набрати ір-адресу 192.168.4.1.

Дана web-сторінка була розроблена на мові програмування HTML з використанням каскадних таблиць стилів CSS (див. додаток 1). В якості середовища розробки (IDE) було обрано Visual Studio Code.

Керування виконано наступним чином: до кожної з кнопки, що розташована на web-сторінці, прив'язано посилання на функцію, що знаходиться у файлі де прописаний алгоритм керування роботом, та тип аргументу, що їй передається. Таким чином при натисканні кнопки викликається певний режим руху робота. Аналогічним чином працює трансляція зображення з камери робота.

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	50

Задля покращення зручності та естетичного вигляду, під час написання web-сторінки меню керування були застосовані таблиць стилів CSS, що дозволило досягнути результату, який наведено на рисунку 5.5.

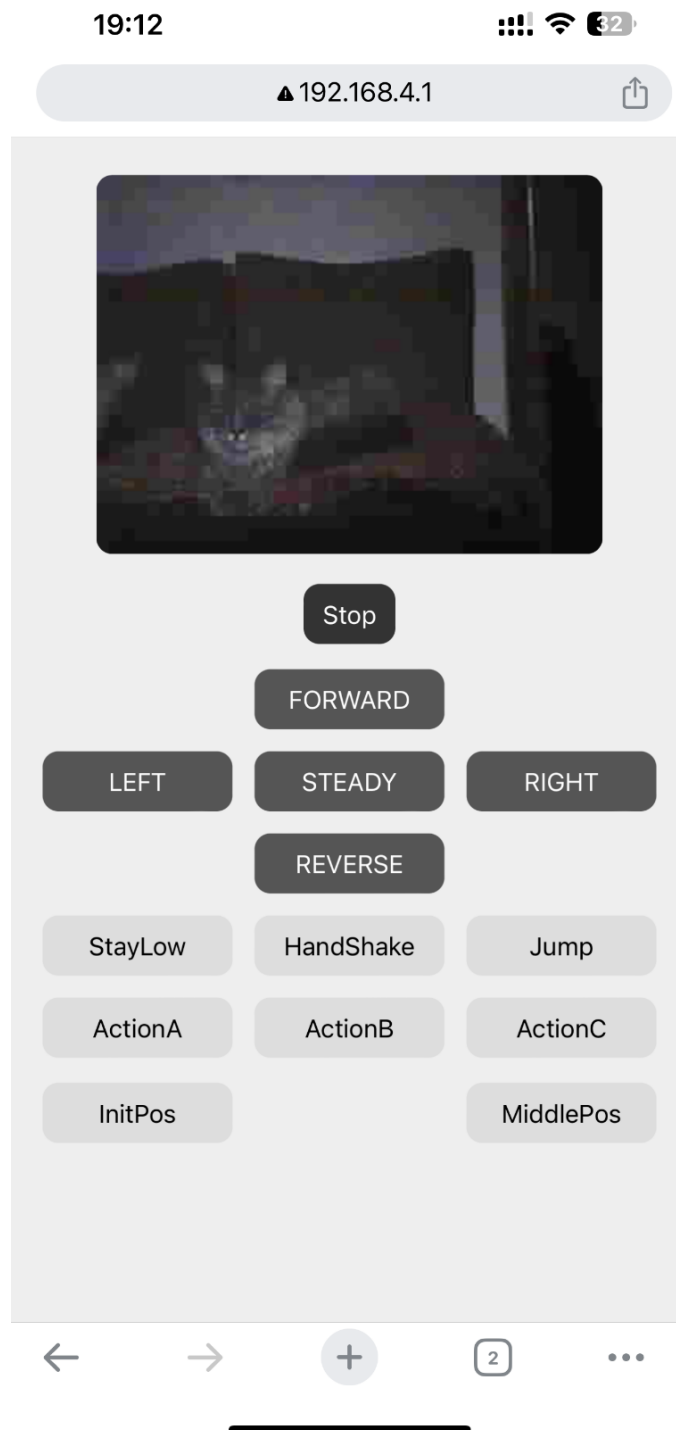


Рисунок 5.5. – зовнішній вигляд меню керування роботом

Кнопка Stop вимикає зображення з камери і, за неактивної трансляції, її текст змінюється на Start. Щоб поновити відтворення зображення з камери необхідно натиснути на, як не дивно, Start.

Кнопки LEFT, RIGHT, FORWARD і REVERSE за натискання і утримання змушують робота рухатись вліво, вправо, вперед і назад відповідно.

StayLow, HandShake, Jump відповідають за активацію унікальних дій – присідання з подальшим переходом до підняття на певну висоту і поверненням у початкове положення, помах лапкою та стрибок.

ActionA, ActionB, ActionC – кнопки для відтворення інших створених власноруч режимів (використовуються для тестування певних рухів).

InitPos і Middle Pos – випрямлення ніг та поворот всіх сервомоторів, що відповідають за нахил ніг, на кут (у загальній системі координат робота) 0° та 90° , відповідно.

Кнопка STEADY – режим автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота. Детальніше про її функціонал буде у наступному пункті розділу.

5.3 Розробка режиму автоматичної стабілізації платформи

На мові програмування C було створено алгоритм для автоматичної стабілізації верхньої платформи крокуючого робота (див. додаток 2). Під час його активації викликається функція, що зчитує дані про глобальну позицію робота («нульові координати», які відповідають положенню платформи робота паралельно до площини, на якій він стоїть) та значення поточної позиції (координати, що відповідають поточному положенню платформи робота). Далі, ці дані віднімаються і отримується значення зміщення, на яке необхідно скорегувати положення робота. Потім, воно передається у функцію, що відповідає кінематичній моделі, яка у свою чергу розраховує нове положення робота, що відповідає нульовим координатам.

Два приклади роботи даного режиму наведено на рисунках 5.6, 5.7, 5.8 і 5.9, 5.10, 5.11, відповідно. На рисунках видно як крокуючий робот змінює кут нахилу та висоту положення ніг, щоб утримати свою верхню платформу паралельно до площини підлоги.

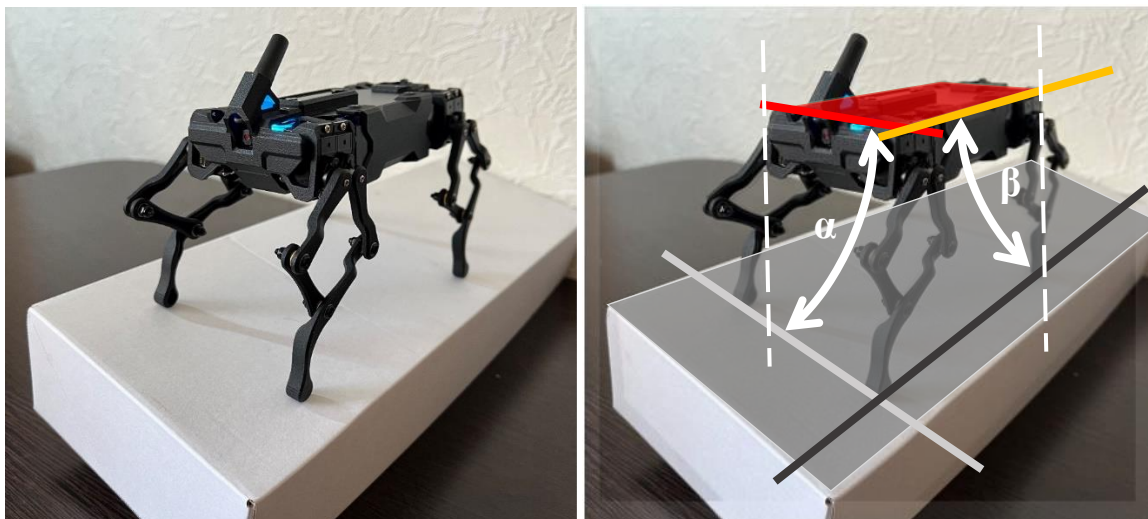


Рисунок 5.6. – перший приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (ізометричний вид)

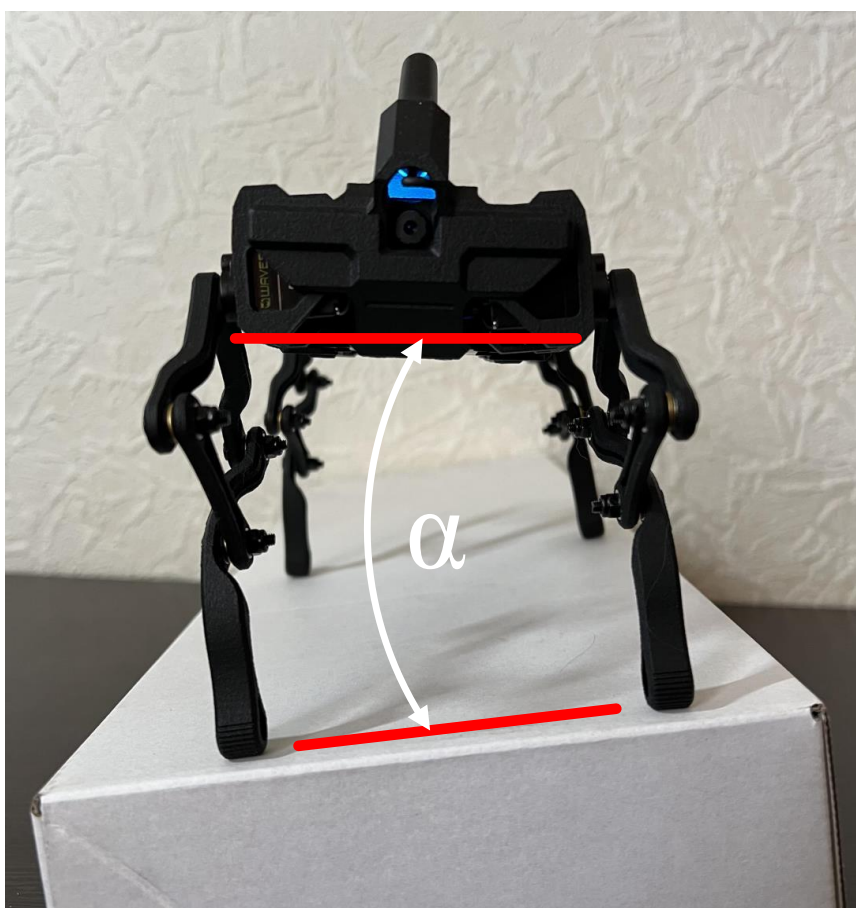


Рисунок 5.7. – перший приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (вид спереду)

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат



Рисунок 5.8. – перший приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (вид збоку)





Рисунок 5.9. – другий приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (ізометричний вид)



Рисунок 5.10. – другий приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (вид ззаду)

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат

ДПЛА91.21.00.000ПЗ

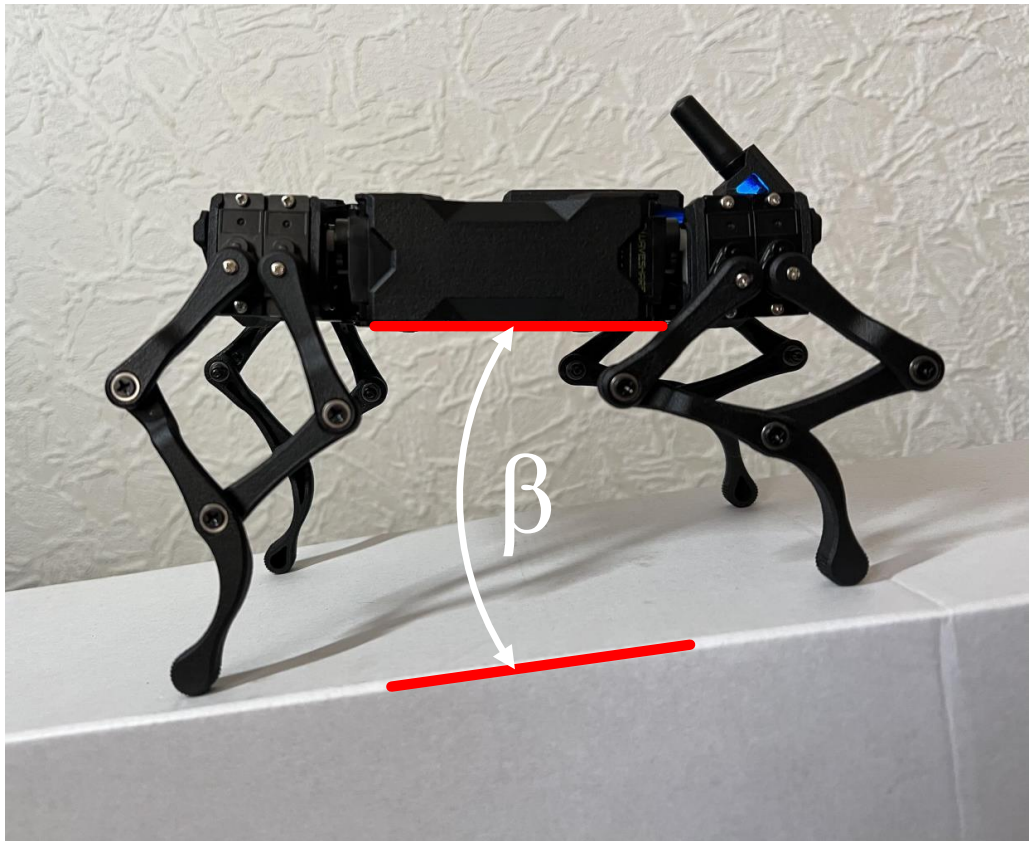


Рисунок 5.11. – другий приклад роботи режиму автоматичної стабілізації платформи крокуючого робота (вид збоку)

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Вступ до розділу

Відповідно до закону України «Про охорону праці», будь-яке підприємство повинне забезпечити своїх співробітників належним захистом від низки факторів, які можуть спричинити негативний вплив на їх здоров'я або смерть. З цих причин, створення та дотримання правил охорони праці є виключно обов'язковим для будь-яких підприємств.

Відповідно до теми дипломного проекту: «Автоматизація процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота», процес керування роботом, а отже його сервомоторами, здійснюється оператором за допомогою дистанційного керування з комп'ютера чи смартфона. Місцем експлуатації і тестування крокуючого робота, на даний час, є лабораторія площею 40 м² та об'ємом 120 м³. У ній також присутні 8 комп'ютерів, що живляться від мережі під напругою 220 В з частотою 50 Гц.

Сам робот є масштабним прототипом, і виступає як практичне середовище для відпрацювання процесу керування стабільністю його верхньої платформи.

6.2 Загальна характеристика об'єкту

Крокуючий робот (рис. 6.1), в стандартному положенні ніг, має наступні розміри: довжина корпусу 172,50 мм, ширина 65,53 мм висота 134,50 мм, висота корпусу 37,6 мм, кліренс 96,9 мм.



Рисунок 6.1. – зібрана модель крокуючого робота

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	57

Керування роботом відбувається за кімнатної температури яка варіюється в межах 22...23 °С в холодний період року і 23...25 °С в теплий період року, вологість становить 53...41 % в обидва періоди. Швидкість руху повітря в межах 0,1 м/с. Необхідно виконати перевірку мікроклімату у приміщенні лабораторії на відповідність загальним вимогам.

Робот живиться від двох літій-іонних акумуляторів моделі LGGBMH11865 (рисунок 6.2.) з номінальною напругою 3,67 В та силою струму за нормальних умов 1550 мА. Робочий діапазон температур для даної моделі акумуляторів становить 0...45 °С під час процесу зарядки та -20...60 °С під час розрядження. Окрім цього, за вимогами виробника температури зберігання, після першої активації акумулятора мають наступні діапазони: -20...60 °С після одного місяця використання, -20...45 °С після трьох місяців використання, -20...20 °С після одного року використання. На даний час, триває четвертий місяць використання акумуляторів. Отже, необхідно забезпечити правильні температурні умови для безпечного використання робота. Також, потрібно запобігти прямому контакту працівників з його електронними компонентами (проводка, плати, тощо) оскільки це може нашкодити як людині, що порушила правила, так і самому роботу.



Рисунок 6.2. – акумулятори моделі LGGBMH11865

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	58

Повертаючись до інформації з розділу 6.1, можна зробити висновки, що показники вологості та температурних діапазонів, для обох періодів року, відповідають зазначеним. Можна зробити висновок, що мікроклімат у лабораторії відповідає нормам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

6.6 Висновки по розділу

Враховуючи інформацію представлену в пунктах 6.4, 6.5 та 6.6 приміщення лабораторії придатне для безпечної експлуатації персоналом, оскільки всі фактори ризику, описані раніше, знаходяться у задовільних межах, що визначені загальнодержавними нормами охорони праці відповідно до наступних нормативних документів: ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», ПУЕ 2021 «Правила улаштування електроустановок», ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

					ДПЛА91.21.00.000ПЗ	61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ВИСНОВКИ

Відповідно до поставленої мети дипломного проекту було розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для системи автоматизації процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота, яке, у свою чергу, може бути застосоване для підвищення ефективності виконання евакуаційних заходів на місцевостях зі складним або неструктурованим рельєфом.

Розроблене алгоритмічне і програмне забезпечення дозволяє масштабованому прототипу крокуючого здійснювати автоматичне вирівнювання платформи в залежності від відхилення відносно глобальних координат простора. Іншими словами, воно (програмне забезпечення) виконує стабілізацію платформи на одному рівні, що відповідає паралельному розташуванню відносно початкової позиції площини робота, шляхом автоматичної зміни положення основних ланок ніг крокуючого робота.

Отже, за умови використання даного алгоритмічного та програмного забезпечення на практиці може бути досягнуто стабільне і комфортне положення для постраждалого, на верхній платформі евакуаційного крокуючого робота, під час проведення евакуаційних заходів на місцевостях зі складним або неструктурованим рельєфом.

					ДПЛА91.21.00.000ПЗ	62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- 19.Кубрак А.І., Обчислення частотних характеристик за системою звичайних диференціальних рівнянь : А.І. Кубрак, Д.О.Ковалюк, Б.В. Задворний. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – №1(15) .– 2016, ст. 132-135.
- 20.К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз’яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського Основи охорони праці [Текст]: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. К.: Основа, 2006 – 448 с.
- 21.Сазонов А.Ю., Чередниченко В.І., Черепанська І.Ю. (2022) Моделювання кінематики та статичних параметрів мобільного крокуючого евакуаційного робота. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 33 (72) № 4, 2022 – С. 121 – 128

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	ДПЛА91.21.00.000ПЗ	65


```
const startStream = () => {
  view.src = `${streamUrl}/stream`
  show(viewContainer)
  streamButton.innerHTML = 'Stop'
}

streamButton.onclick = () => {
  const streamEnabled = streamButton.innerHTML === 'Stop'
  if (streamEnabled) {
    stopStream()
  } else {
    startStream()
  }
}
});
</script>
</body>

</html>
)rawliteral";
```

<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ доквм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	<i>ДПЛА91.21.00.000ПЗ</i>	<i>81</i>