

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Системна інженерія _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____ (підпис)
« 08 » квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Крутовий Андрій Русланович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка 3D-моделі системи переміщення робота з покращеними можливостями _____

Затверджена наказом по університету від 20.05.2024 р. № 478 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 24.06.2024 р. _____

3. Вихідні дані до роботи Інформація щодо математичних моделей оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ; план експерименту _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ, обґрунтування актуальності роботи; _____

4.2 Визначення мети, предмету та об'єкту розробки; _____

4.3 Аналіз літературних джерел; _____

4.3 Аналіз існуючих рішень оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ; _____

4.4 Розробка конструкцій робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях; _____

4.5 Проведення експериментальних досліджень робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях; _____

4.6 Висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність роботи, постановка задачі	22.04.24 – 30.04.24	виконано
2	Визначення мети, предмету та об'єкту розробки	01.05.24 – 08.05.24	виконано
3	Аналіз літературних джерел. Аналіз існуючих конструкцій	09.05.24 – 14.05.24	виконано
4	Аналіз існуючих рішень оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ	15.05.24 – 25.05.24	виконано
5	Розробка конструкцій робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях	26.05.24 – 30.05.24	виконано
6	Проведення експериментальних досліджень робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях	31.05.24 – 04.06.24	виконано
7	Подання роботи на перевірку автоматизованою системою щодо дотримання академічної доброчесності	05.06.24 – 09.06.24	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	10.06.24 – 13.06.24	виконано
	Подання роботи на рецензію	14.06.24 – 16.06.24	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.06.24 – 20.06.24	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	21.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 08.04.2024 р.

Студент _____ Крутовий А.Р.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Демська Н.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, Крутовий Андрій Русланович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

11.06.2024



Андрій КРУТОВИЙ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 52с., 2 табл., 31 рис., 1 дод., 18 джерел

3 D-МОДЕЛЬ, ЕКСПЕРИМЕНТ, ДАТЧИКИ, РОБОТОТЕХНІЧНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ

Мета роботи – розробка 3 D-моделей робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях з метою аналізу їх мобільності та прохідності на різних типах місцевості і в різних умовах експлуатації.

Об'єкт розробки – процес моделювання конструкції робототехнічних засобів за результатами оцінки параметрів мобільності.

Предмет розробки – мобільна платформа в колісній та в гусеничній конфігураціях.

В роботі проведений аналіз існуючих рішень оцінки якості характеристик мобільності та існуючих програмних та апаратних рішень вивчення потенційних характеристик мобільності робототехнічних платформ. Також розглянуті математичні моделі оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ.

На підставі аналізу, у середовищі 3D-моделювання, розроблені конструкції робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях.

У третьому розділі проведені експериментальні дослідження робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях: складено план експерименту; обрані для дослідження параметри; зібрано результати експерименту для роботи технічного засобу у колісному та гусеничному виконаннях. Проведена обробка даних.

ABSTRACT

Explanatory note: 52 p., 2 tabl., 31 pic., 1 applications, 18 sources.

3 D-MODEL, EXPERIMENT, SENSORS, ROBOTIC VEHICLE

The purpose of the work is to develop 3D-models of the robotic platform in wheeled and tracked configurations in order to analyze their mobility and passability on different types of terrain and under different operating conditions.

The object of development is the analysis of a set of mobility criteria, based on the development of 3D models and experimental samples, which would allow direct comparison of robotic vehicles in wheeled and tracked configurations.

The subject of development is a mobile platform in wheeled and tracked configurations.

The paper analyzes existing solutions for assessing the quality of mobility characteristics and existing software and hardware solutions for studying potential mobility characteristics of robotic platforms. Mathematical models for assessing the quality of mobility characteristics of robotic platforms are also considered.

Based on the analysis, in the 3D-modeling environment, the designs of the robotic platform in wheeled and tracked configurations were developed.

In the third chapter, experimental studies of the robotic platform in wheeled and tracked configurations are carried out: the experiment plan is drawn up; parameters selected for research; the results of the experiment for the robotic technical means in wheeled and tracked versions have been collected. Data processing has been carried out.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ.....	7
1 Аналіз існуючих рішень оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ	9
1.1 Аналіз існуючих програмних та апаратних рішень вивчення потенційних характеристик мобільності робототехнічних платформ	9
1.2 Аналіз математичних моделей оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ.....	11
2 Розробка конструкцій робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях.....	16
3 Проведення експериментальних досліджень робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях	27
3.1 План експерименту	27
3.2 Параметри, обрані для дослідження	27
3.3 Результати експерименту для колісного виконання	30
3.4 Результати експерименту для гусеничного виконання.....	37
3.5 Обробка даних	38
4 Охорона праці.....	47
Висновки	50
Перелік джерел посилання	51
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	54

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ІМ – індекс мобільності;

МДЕ – метод дискретних елементів;

МММ – матриця показників мобільності;

МСЕ – метод скінченних елементів;

РТЗ – роботизований транспортний засіб;

СВП – саморобних вибухових пристроїв;

СІ – конусний індекс;

ТМБ – теорія мобільності Беккера;

ШІМ – широтно-імпульсної модуляції;

GUI – графічним інтерфейсом користувача;

NRMM – Non-Road Mobile Machinery;

РС – сервоімпульсів радіоуправління;

VCI – індекс конусності транспортного засобу.

ВСТУП

Немає сумнівів, що в майбутньому мобільні роботи технічні платформи будуть відігравати все більшу роль у виконанні завдань, які є небезпечними, монотонними або неможливими для виконання пілотованим транспортним засобом. Тому стає очевидною необхідність більш фундаментального розуміння мобільності цих транспортних засобів. Прийняті на сьогоднішній день стандарти мобільності були розроблені для великих, важких транспортних засобів, і ще не визначено, чи можна описати за допомогою цих стандартів транспортні засоби роботизованого масштабу [1].

Дослідники працювали над характеристикою мобільності робототехнічних пересувних засобів з кінця 50-х років минулого сторіччя, але основна частина цих досліджень була спрямована на великі колісні та гусеничні транспортні засоби [2]. Зі збільшенням використання малих легких роботизованих транспортних засобів раніше прийняті конвенції для великих транспортних засобів повинні бути переглянуті з новим акцентом на зменшення розмірів роботизованих транспортних засобів.

Досі не було проведено всебічного порівняльного аналізу, який би досліджував переваги кожної конфігурації для конкретної місії або операційного середовища. В даній роботі розглядаються параметри транспортних засобів, що представляють інтерес, і робиться спроба кількісно і якісно порівняти кожну конфігурацію транспортного засобу за певних сценаріїв експлуатації, а також розробити системний підхід, який може бути використаний для вибору транспортного засобу, що найкраще підходить для певного набору умов експлуатації [1, 2].

Таким чином, метою роботи буде – розробка 3D-моделі робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях з метою аналізу їх мобільності та прохідності на різних типах місцевості і в різних умовах експлуатації.

Об'єкт розробки – процес моделювання конструкції робототехнічних засобів за результатами оцінки параметрів мобільності.

Предмет розробки – мобільна платформа в колісній та в гусеничній конфігураціях.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан в оцінці мобільності транспортних засобів з особливим акцентом на дослідженнях, які були проведені для транспортних засобів робототехнічного класу;

- провести оцінку мобільності роботизованого транспортного засобу в колісній та гусеничній конфігураціях та вивчити переваги кожної конфігурації в різних умовах експлуатації;

- розробити 3 D-моделі робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях;

- надати кількісну та якісну оцінку порівняльного аналізу з метою розробки системного підходу, який може допомогти у виборі легкого роботизованого транспортного засобу для певної місії та/або середовища, а також для вдосконалення конструкції майбутніх роботів.

Пояснювальна записка виконано згідно з [3, 4].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК МОБІЛЬНОСТІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ

1.1 Аналіз існуючих програмних та апаратних рішень вивчення потенційних характеристик мобільності робототехнічних платформ

Еталонна модель мобільності Non-Road Mobile Machinery (NRMM) – це програмний інструмент, який був розроблений в 1970-х роках і призначений для аналізу і вивчення потенційних характеристик мобільності конкретного транспортного засобу на великій ділянці місцевості.

NRMM є одним з небагатьох програмних пакетів, спеціально розроблених для оцінки транспортних засобів в умовах поля бою, і є найбільш широко використовуваним [5].

Початкова робота над методом конусного індексу забезпечила основу для цього інструменту оцінки мобільності. NRMM використовує значення CI, а також багато інших вхідних даних, таких як перетин перешкод, динаміка транспортного засобу та здатність відштовхуватися від заростей [6].

Інструмент оцінки мобільності NRMM також включає суб'єктивні вхідні дані, такі як рівень зору водія та здатність водія, які можуть не застосовуватися до позашляховиків, що керуються дистанційно або автономно. Для позашляховиків рівень здібностей водія може бути замінений на вхідні дані, засновані на чутливості приладів або деградації датчиків [5].

Програмне забезпечення NRMM робить якісну оцінку на основі всіх даних, а потім, як правило, виводить відсоток спрацьовування або не спрацьовування, а також швидкість V90. Відсоток непрохідності являє собою частину місцевості, яка є непрохідною для транспортного засобу. Швидкість V90 – це кумулятивна швидкість на найгірших 90% ділянки місцевості [6].

NRMM був розроблений для важких транспортних засобів, зокрема для

транспортних засобів вагою від 1 до 70 тонн. Нещодавно були спроби застосувати ці класичні методи до малих легких транспортних засобів, а також розробити нові методи, які більше підходять для транспортних засобів цього класу.

У 2005 році була спроба застосувати інструмент мобільності NRMM до позашляховика, PackBot. PackBot – це позашляховик, розроблений компанією iRobot, який використовується армією для виконання різних місій. Деякі з цих місій включають спостереження, розвідку та дистанційне виявлення саморобних вибухових пристроїв (СВП) [7]. Це дозволяє солдатам виконувати свої завдання, не наражаючись безпосередньо на потенційно небезпечні ситуації.

PackBot (рис. 1.1) важить приблизно 45 фунтів з мінімальним дорожнім просвітом 2 дюйми. Це значно перевищує обмеження, для яких ця програма була розроблена. При спробі використовувати NRMM з таким маленьким транспортним засобом виникає проблема роздільної здатності рельєфу місцевості. Більш ранні версії програмного забезпечення NRMM навіть не передбачали перешкоди заввишки менше чотирьох дюймів [7].



Рисунок 1.1 – Робот PackBot

Основними причинами для визначення «не прохідності» були проблеми з рослинністю та об'їздом перешкод. Зменшення кількості об'їздів, однак, компенсується значно більшою маневреністю PackBot, частково завдяки його невеликим розмірам.

Незважаючи на свій потенціал, цей метод має кілька недоліків, таких як відсутність картографічної інформації про місцевість з відповідною точністю і відповідних вхідних даних, які б відповідали унікальним геометричним особливостям роботизованих транспортних засобів (РТЗ).

1.2 Аналіз математичних моделей оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ

Для того, щоб оцінити мобільність транспортного засобу, є кілька ключових параметрів, які дають чітке уявлення про його прохідність по бездоріжжю.

До таких параметрів відносяться: просідання РТЗ, тягове зусилля на дишлі, ковзання, розподіл тиску, індекс мобільності (ІМ) тощо.

Багато з цих параметрів були розраховані за допомогою аналітичних виразів або емпіричних залежностей, вперше сформульованих наприкінці 1950-х років [8, 9]. Ці співвідношення параметрів транспортних засобів були розроблені для важких транспортних засобів і не можуть адекватно розраховувати ці параметри для невеликих, легких транспортних засобів.

Оцінка рухливості транспортних засобів, що експлуатуються в умовах бездоріжжя, традиційно визначається трьома основними методами, які були розроблені з урахуванням особливостей важких транспортних засобів.

Перший метод – це теорія мобільності Беккера (ТМБ), яка є аналітичним інструментом, розробленим з використанням рівнянь Беккера для взаємодії транспортного засобу з ґрунтом [8, 9]. Модель ТМБ була створена для того, щоб дати першу загальну оцінку рухливості транспортних засобів. Це проста статична модель з одним ступенем свободи (1-DOF), яка

передбачає, що ґрунт є однорідним, а вплив навантаження є лінійним. Ця модель є аналітичною і має сім емпірично визначених властивостей міцності ґрунту, які необхідно визначити.

Другий метод – Конусний індекс (CI), є мірою характеристик рельєфу, які отримують за допомогою приладу, що називається конусним пенетрометром [10, 11]. Значення CI потім емпірично співвідносяться з характеристиками транспортного засобу в режимі «їхати/не їхати» за допомогою ряду співвідношень, які називаються індексом конусності транспортного засобу (VCI).

Останній тип методів для визначення характеристик позашляховика – це метод скінченних елементів (МСЕ) та метод дискретних елементів (МДЕ). Ці методи намагаються описати рухливість транспортного засобу і взаємодію з ґрунтом шляхом ідеалізації шини і ґрунту як сукупності скінченної кількості елементів. Ці обчислювальні методи досягли значного прогресу в точності та ефективності, і їх постійно використовують для більшої кількості застосувань [12]. Ці методи мають обмежене застосування при вивченні рухливості роботизованих масштабних транспортних засобів і виходять за рамки цього огляду літератури.

Останнім часом в електротехнічній спільноті з'явився поштовх відмовитися від моделювання динаміки заносу і розглядати складну взаємодію між ґрунтом і ходовою частиною як проблему управління. У цій сфері досягнуто певного успіху з адаптивними системами керування позашляховиками, які коригують траєкторію руху, спричинену неякісними моделями системи протидії заносу [13]. Цей напрямок досліджень має певні перспективи, але бракує експериментальних даних для підтвердження отриманих результатів.

На додаток до цих трьох традиційно використовуваних методів, нещодавно були розроблені деякі нові методи, які спрямовані на конкретний опис мобільності для малих, легких транспортних засобів.

Матриця показників мобільності (МММ) – це інструмент оцінки, який

вперше був розроблений Уорлі в 2007 році. Цей інструмент оцінки використовується для визначення найбільш важливих вимірюваних критеріїв мобільності для заданого набору критеріїв місії [14].

МММ – це інструмент, який дозволяє безпосередньо порівнювати транспортні засоби з різними конфігураціями ходової частини або платформами мобільності. Одне з основних припущень, яке робиться, полягає в тому, що всі транспортні засоби в пулі порівняння можуть відповідати мінімальним вимогам місії. Це означає, що якщо потрібен певний дорожній просвіт, то всі можливі транспортні засоби будуть відповідати цій базовій вимозі місії. Транспортні засоби безпосередньо порівнюються за допомогою функції індексації, яка дозволяє інтуїтивно зрозуміле і швидке порівняння.

Цей інструмент дуже гнучкий і може бути адаптований для кожної місії. Це дозволяє додавати або видаляти різні метрики відповідно до уподобань користувачів. Цей шаблон можна побачити на рисунку 1.2.

		Vehicle Parameters/Performance Measures																										
		Terrain Interaction Parameters				Geometry Parameters				Performance Parameters				Instrument Sensitivity Parameters														
		Tractive Effort/Soil Thrust	Compaction Resistance	Safe Weight	Sinkage	Slippage	Weight (Nominal)	Contact Area	Weight/Contact Area (High)	Ground Clearance	Payload Support Area	Length (Longitudinal)	Width (Lateral)	Height	Vehicle Speed Range (Low)	Vehicle Speed Range (High)	Turning Radius (Minimum)	Slope Climbing Capability	Slope Traversing Capability	Energy Consumption	Payload Capacity (High)	Tow Capacity/Drawbar Pull	Jumping Ability	Vibration	Temperature	Light	Impact	Moisture
Interaction	Terrain Characteristics and Mission Requirements	Tn																										
	Non - Disturbance of Terrain																											
	Non - Impact of Terrain																											
	Rough/Uneven Terrain																											
	Soft/Non - Cohesive Terrain																											
Geom.	Hard/Cohesive Terrain																											
	Water Hazards																											
	Confined Travel Path Area																											
Performance	Obstacle Avoidance																											
	Distance of Travel																											
	Confrontation/Evasion																											
	Discontinuous Movement																											
	Rescue/Recovery																											
	Agility																											
	Time Limitations																											
	Daytime/Nighttime Mission																											

Рисунок 1.2 – Шаблон матриці показників мобільності [15]

Для кожної групи параметрів транспортного засобу в МММ відведена окрема область. Параметри транспортного засобу об'єднані в наступні групи: параметри «транспортний засіб – місцевість», параметри геометрії транспортного засобу, параметри продуктивності транспортного засобу, параметри чутливості приладів транспортного засобу. Відповідні характеристики місцевості та критерії місії були організовані таким же чином. Як ви можете бачити на шаблоні, ці корелюючі характеристики легко ідентифікувати, оскільки всі групи мають кольорове кодування.

Перша група параметрів транспортного засобу – це параметри взаємодії транспортного засобу з місцевістю. Ці емпіричні співвідношення характеризують різні параметри взаємодії транспортного засобу з ґрунтом, такі як ковзання, просідання тощо. Характеристики ґрунту відіграють життєво важливу роль у визначенні багатьох з цих характеристик, і емпіричні залежності враховують ці властивості ґрунту. Приклад групування цих параметрів можна побачити на рисунку 1.3.

Terrain Characteristics and Mission Requirements		Vehicle-Terrain Param.: Interaction				
Interaction	T#	Tractive Effort/Sol Thrust (per veh.)	Compaction Resistance (per veh.)	Safe Weight	Sinkage	Slippage
Non-Disturbance Of Terrain		L	L	H	H	
Non-Impact of Terrain			L	H		
Rough/Uneven Terrain		H	L		L	L
Soft/Non-Cohesive Terrain		H	H	L	H	L
Hard/Cohesive Terrain		H	H	L	H	L

Рисунок 1.3 – Параметри «транспортний засіб – місцевість» з відповідними характеристиками рельєфу [15]

Геометричні параметри транспортного засобу складаються з показників характеристик ґрунту, а також характеристик робочої зони. Ці обмежувальні фактори можуть включати в себе розмір і кількість перешкод. Геометричні параметри транспортного засобу включають основні розміри транспортного засобу, такі як вага, дорожній просвіт, площа контакту тощо. Ці геометричні параметри пов'язані з характеристиками місцевості, такими як об'їзд перешкод, водні перешкоди або будь-якими іншими необхідними геометричними характеристиками місцевості.

Група параметрів роботи транспортного засобу – це розділ, до якого включені всі необхідні дії транспортного засобу.

Останній розділ – це параметри чутливості приладів апарату. Ця категорія використовується для опису будь-яких необхідних датчиків або чутливості датчиків, які потрібні для виконання операційних критеріїв місії. Ці параметри чутливості пов'язані з вимогами місії і повинні бути визначені користувачем, оскільки існує широкий спектр сенсорних рішень і діапазонів чутливості.

Щоб уникнути будь-яких зв'язків між характеристиками, в яких параметри транспортного засобу перетинаються, пріоритет надається тому параметру, який охоплює інший. Простим прикладом є зв'язок між тяговим зусиллям і вагою транспортного засобу.

Різні транспортні засоби оцінюються, і кожному з них присвоюється відносний бал. Цей відносний бал дозволяє проводити пряме та ефективне порівняння між великою кількістю транспортних засобів.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ РОБО ТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ В КОЛІСНІЙ ТА В ГУСЕНИЧНІЙ КОНФІГУРАЦІЯХ

Основні показники РТЗ були зібрані до початку тестування. Цей РТЗ має диференціальне рульове керування в обох конфігураціях ходової частини. У колісній конфігурації транспортний засіб має шість коліс, а в гусеничній – 6 зірочок, які з'єднуються з гусеницями.

Основні розміри транспортного засобу показані на рис. 2.1–2.4.

У колісній конфігурації машина має довжину 500.564 мм і ширину 547 мм. Діаметр коліс становить 150.566 мм, загальна висота – 139.7 мм, а дорожній просвіт – 57.15 мм. Ширина шин становить 63.5 мм, що залишає 342.9 мм між колесами. Висота протектора коліс становить приблизно 5.715 мм. Кожне колесо транспортного засобу має незалежну підвіску. Ця система підвіски є дуже простою і складається з набору підвісних пружин і демпферного блоку, з'єданого з поворотним важелем колеса. Ця підвіска має номінальний діапазон ходу приблизно 25.4 мм.

РТЗ важить приблизно 7.25 кг. Пружини в системі підвіски дуже жорсткі, як для ваги РТЗ, і їх корисність ще належить з'ясувати. Шини на транспортному засобі виготовлені з гуми і є нежорсткими.

Шини спеціально розроблені для невеликих транспортних засобів і не накачуються. Шини зберігають свою форму завдяки жорсткості гуми, з якої вони виготовлені.

Це дозволяє шинам бути нежорсткими, при цьому не утримувати повітря і не потребувати підкачки. Цей тип шин і системи підвіски можна побачити на багатьох невеликих безпілотних апаратах, що використовуються сьогодні.

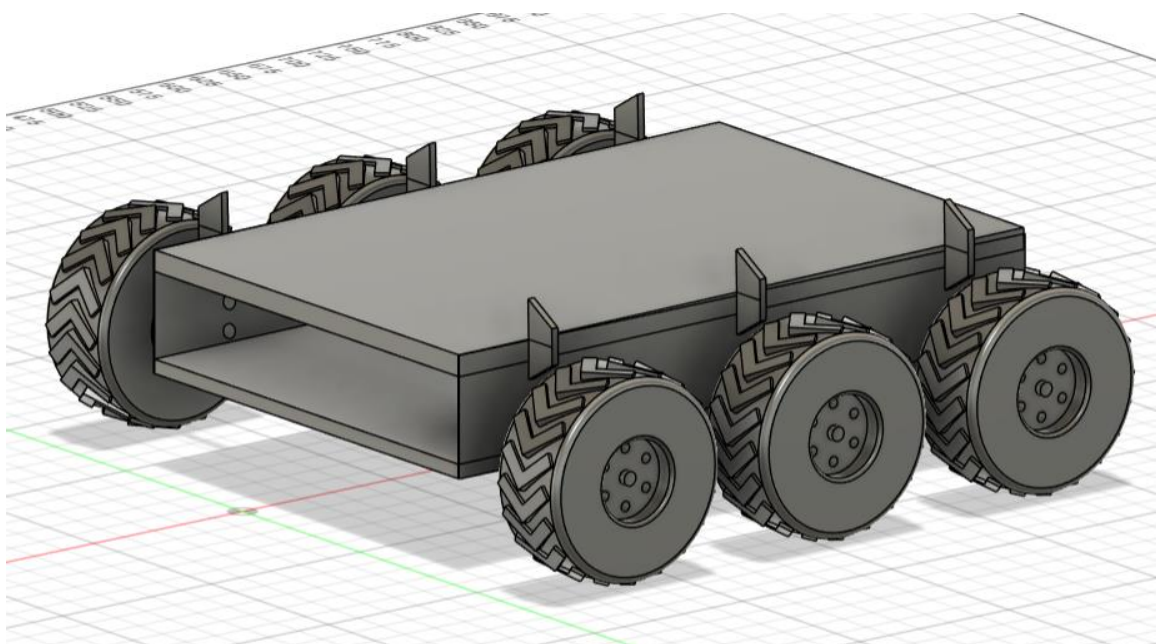


Рисунок 2.1 – 3D-модель колісного РТЗ

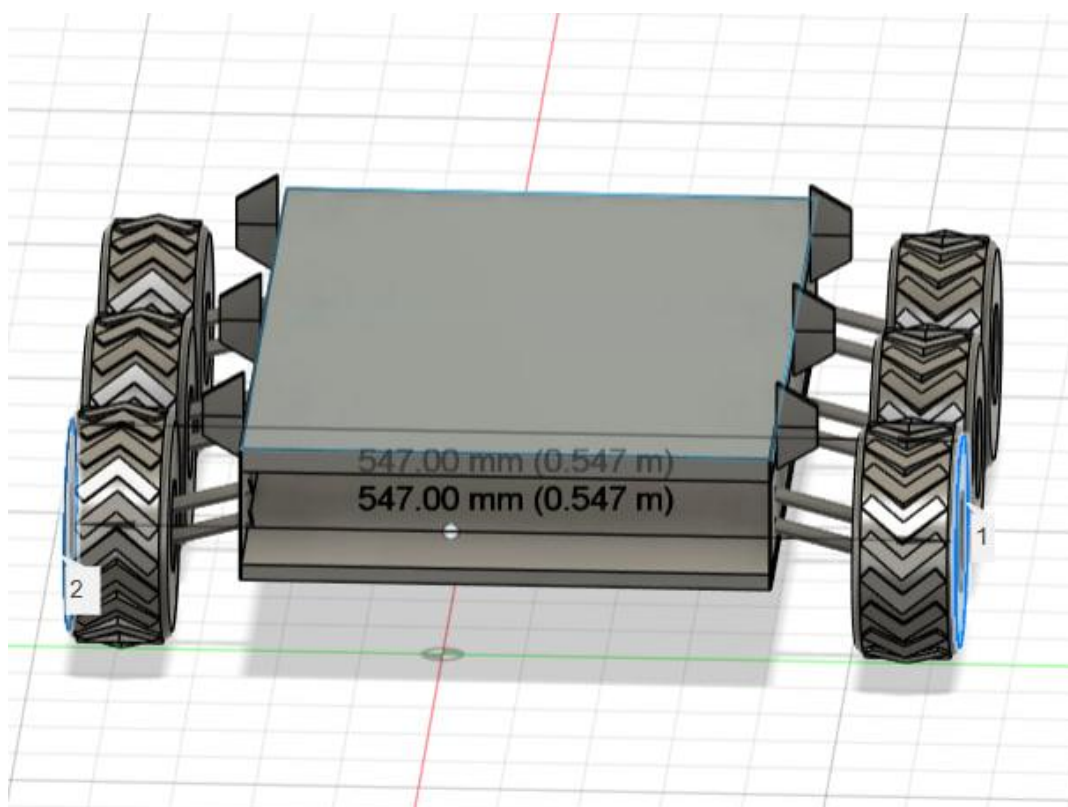


Рисунок 2.2 – Розміри колісного РТЗ по ширині

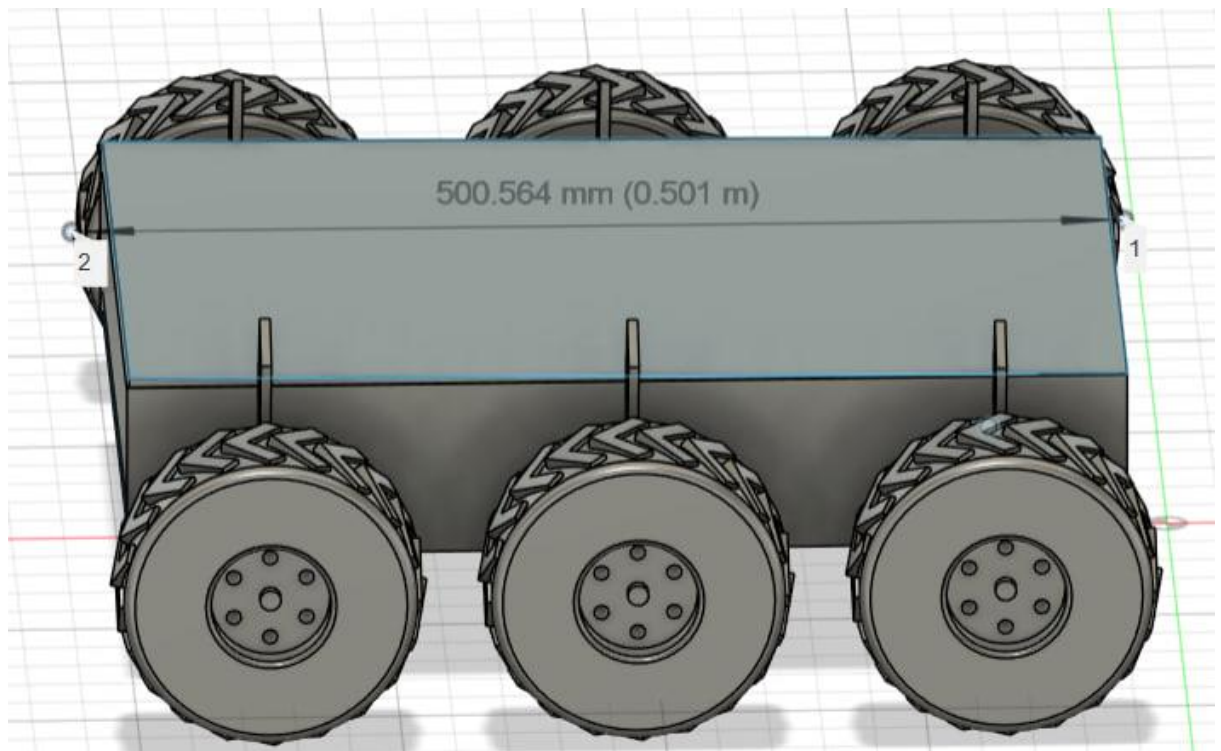


Рисунок 2.3 – Розміри колісного РТЗ по довжині

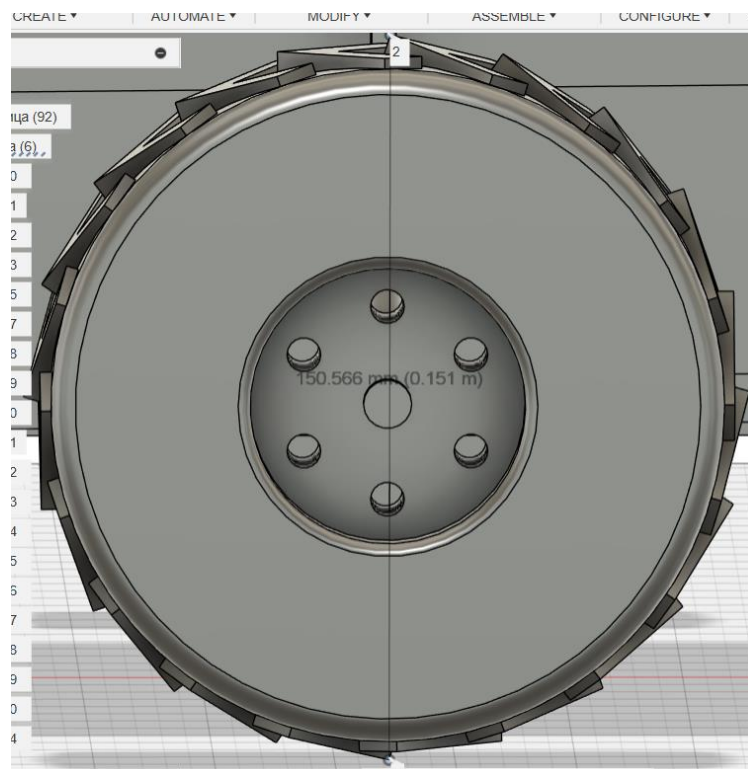


Рисунок 2.4 – Розміри колісного РТЗ по висоті

Після завершення випробувань на колісному ході РТЗ перетворюється на гусеничний. Основні показники для гусеничної конфігурації були зібрані до початку випробувань. Перетворення між колісною та гусеничною конфігурацією було здійснено таким чином, щоб зберегти якомога більше критичних розмірів.

Розміри гусеничного транспортного засобу можна побачити на рисунках 2.5–2.8.

Гусеничний транспортний засіб має довжину 455.816 мм і ширину 515.0 мм. Діаметр зірочки становить 103.191 мм, загальна висота – 127.0 мм, а дорожній провіт – 50.8 мм. Ширина колії становить 50.8 мм, залишаючи 317.5 мм між колесами. Висота протектора коліс становить приблизно 0.3175 мм. У гусеничному варіанті машина має загальну вагу 7.47 кг. У гусеничній конфігурації РТЗ має такий самий діапазон ходу підвіски.

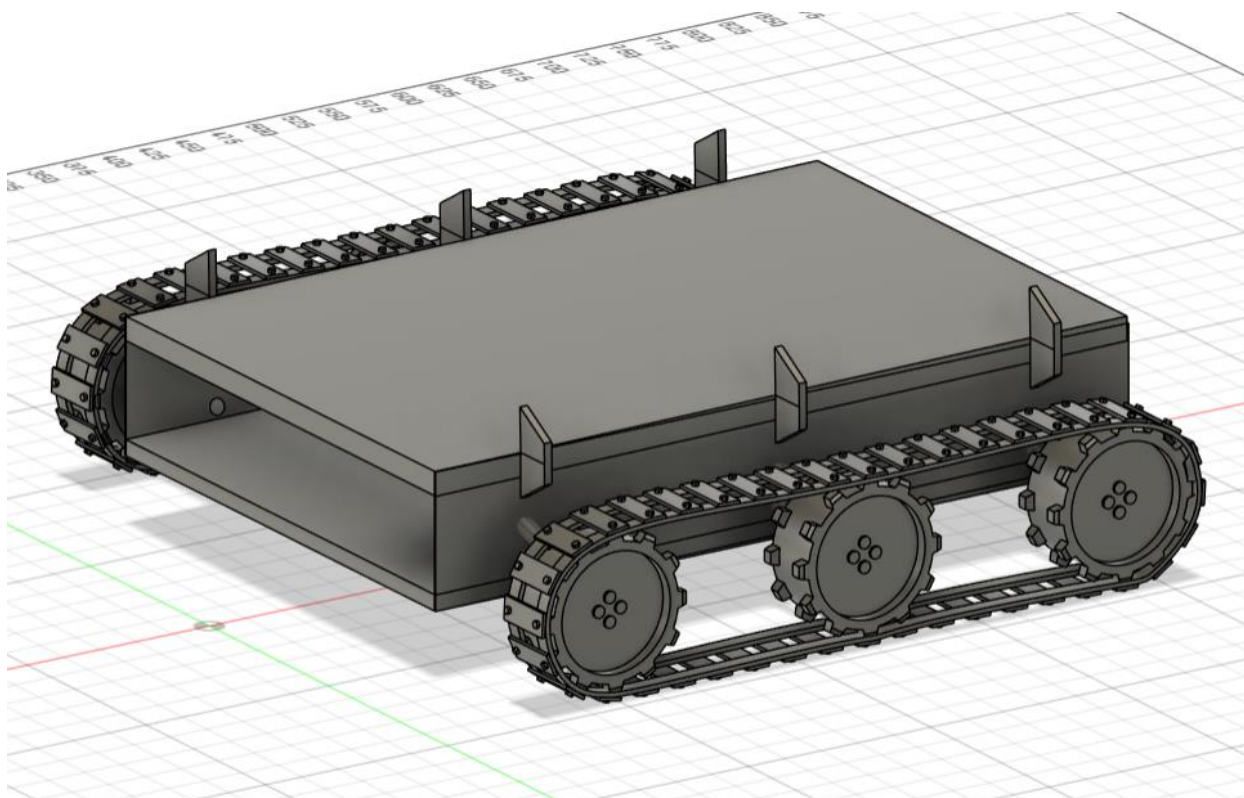


Рисунок 2.5 – 3D модель РТЗ у гусеничному виконанні

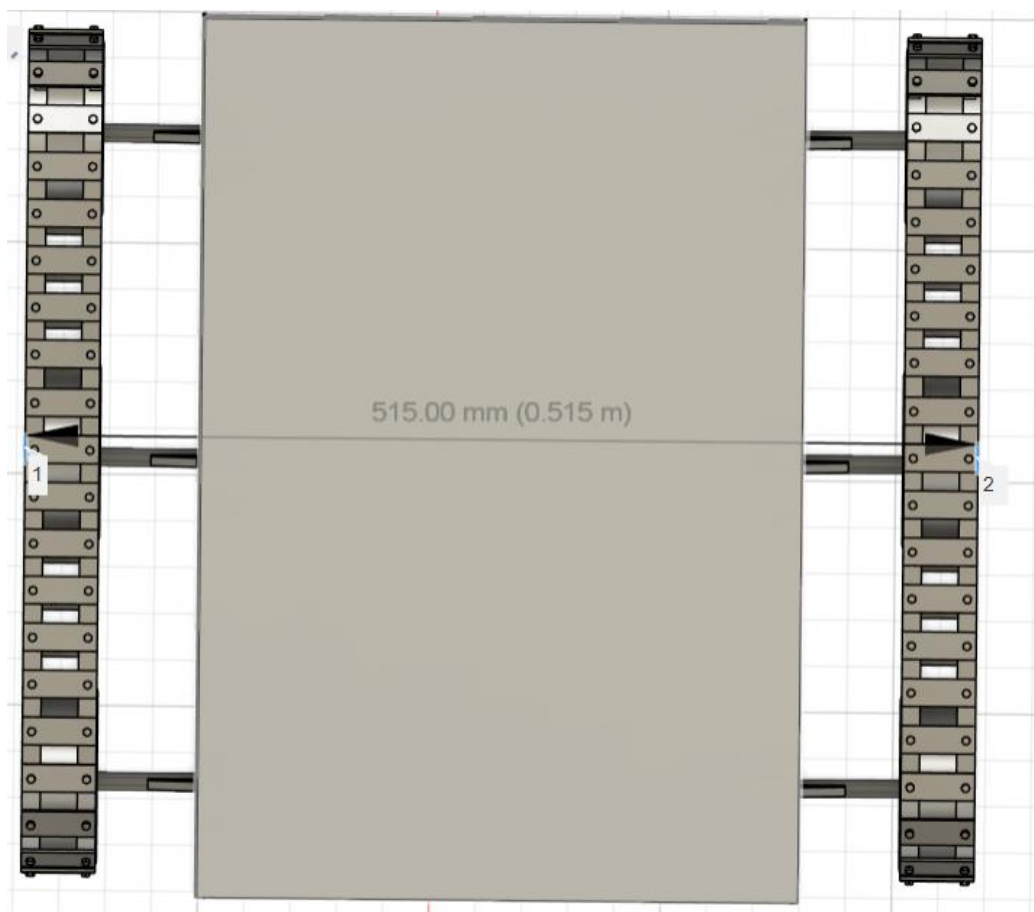


Рисунок 2.6 – Розміри гусеничного РТЗ по ширині

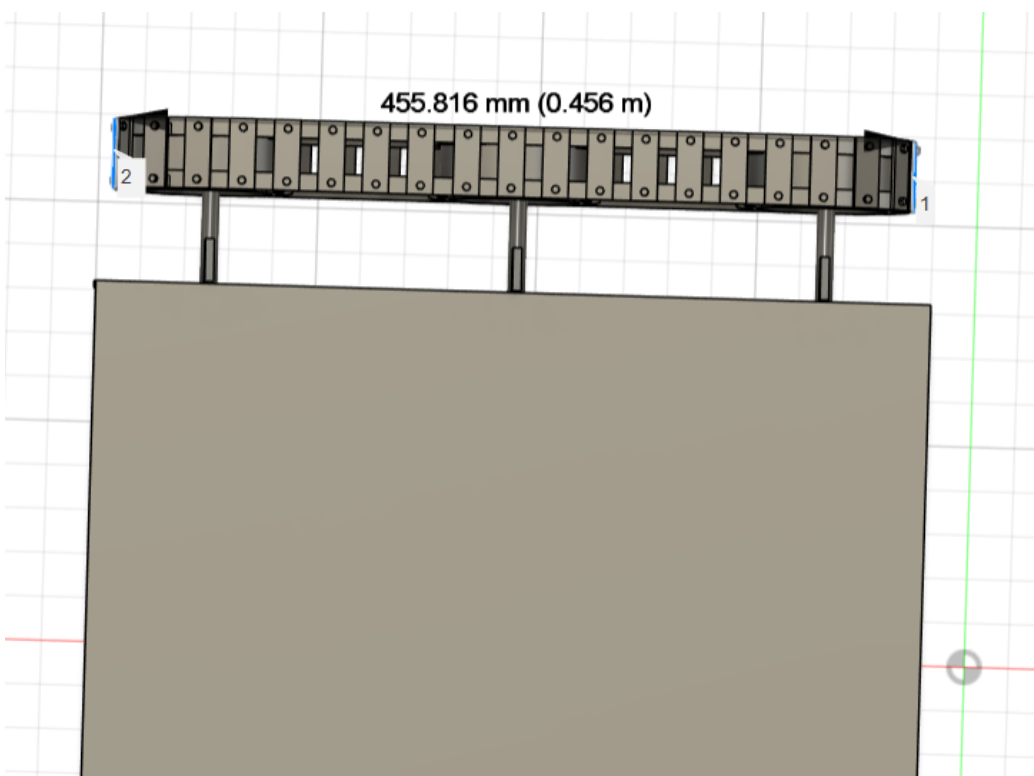


Рисунок 2.7 – Розміри гусеничного РТЗ по довжині

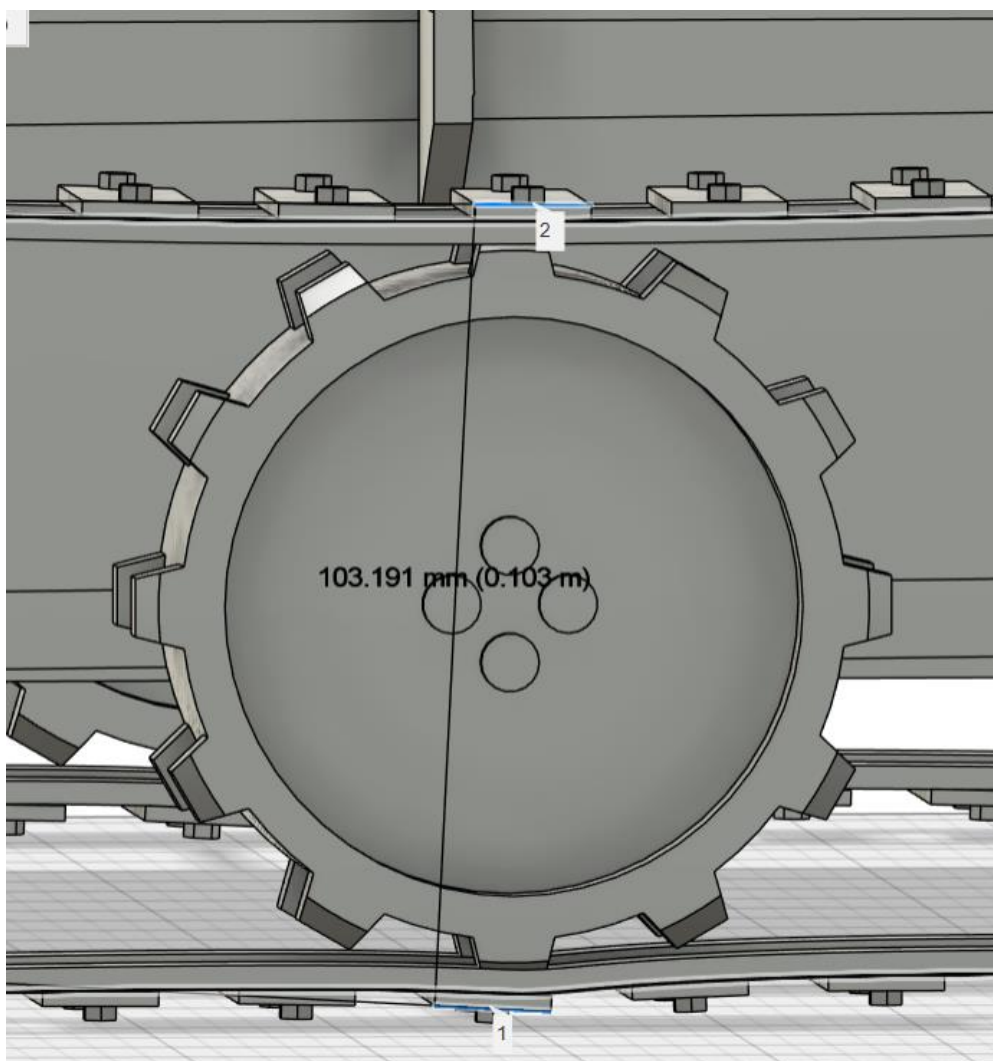


Рисунок 2.8 – Розміри гусеничного РТЗ по висоті

Як вже згадувалося раніше, машина має диференційоване керування як у колісній, так і в гусеничній конфігурації. Кожна сторона транспортного засобу приводиться в рух власним двигуном постійного струму з індивідуальним керуванням. Таке розташування полегшує роботу системи диференціального керування.

Організація силової системи РТЗ дозволяє подавати крутний момент на всі шість коліс одночасно. Двигун постійного струму механічно з'єднаний з кожною ведучою зірочкою за допомогою приводного ремня. Цей ремінь має товщину приблизно 2.03 мм і виготовляється компанією Mitsubishi Belting LTD.

Mitsubishi Belting LTD – японська компанія, яка спеціалізується на

виробництві різноманітних ременів приводних систем. Систему трансмісії транспортних засобів можна побачити на рисунку 2.9.

Привід транспортних засобів живиться від чотирьох нікель-метал-гідридних акумуляторних батарей, що перезаряджаються. Ці батареї розраховані на 3400 мАг і забезпечують приблизно 7,2 вольт. Ці батареї є комерційними готовими деталями і виробляються компанією Ovonic Battery Company, яка нещодавно була придбана корпорацією BASF.

Була зроблена спроба знайти інформацію про виробника двигунів постійного струму транспортного засобу, але будь-які ідентифікаційні знаки були видалені попередніми студентами. Наклейки виробника на двигунах нерозбірливі, тому походження двигунів транспортних засобів залишається невідомим.

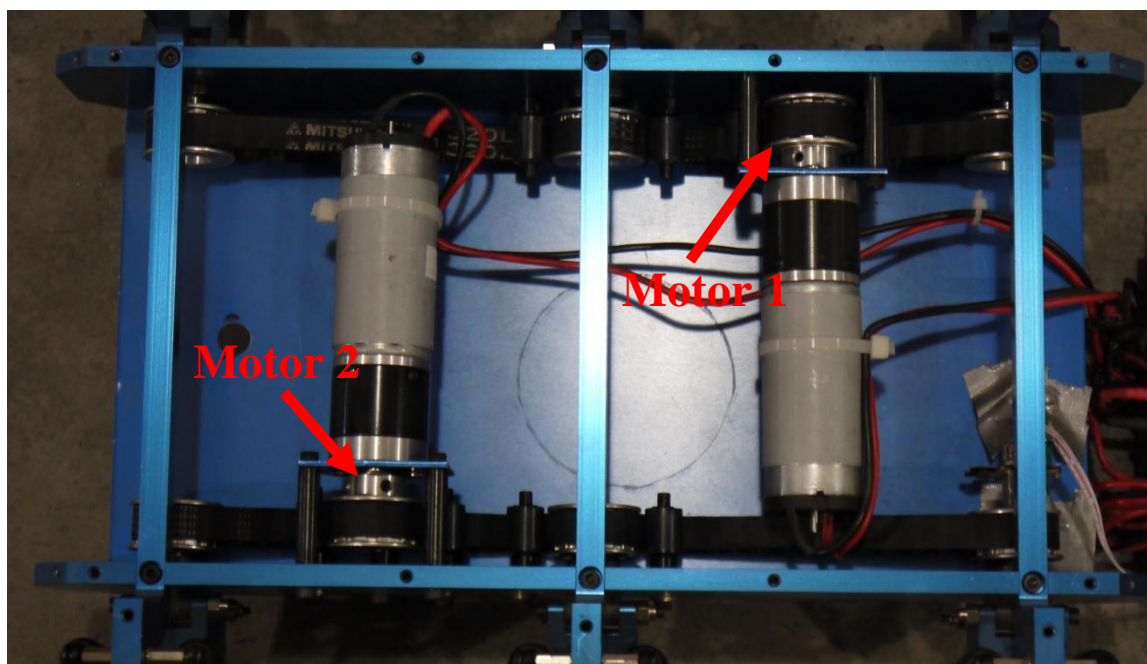


Рисунок 2.9 – Трансмісія тестового зразка

Двигунами РТЗ керує двомоторний контролер TReX Jr. Dual-Motor Controller виробництва Pololu Robotics and Electronics. Цей контролер є універсальним контролером двигуна, який розроблений спеціально для використання з малими та середніми роботами [16]. Цей контролер може

використовуватися для керування до трьох двигунів, два з яких можуть працювати в двонаправленому режимі, а один – в однонаправленому. Керуюча інформація для цих двигунів надходить через п'ять окремих вхідних каналів. Керування двигунами може здійснюватися за допомогою одного з трьох вхідних методів: сервоімпульсів радіоуправління (RC), аналогової напруги або асинхронного послідовного зв'язку (RS-232 або TTL).

У цьому прикладі контролер двигуна працює за допомогою послідовного зв'язку для отримання керуючих входів і виведення інформації про двигун. Контролер двигуна отримує команди послідовного входу і відповідно збільшує або зменшує напругу на відповідних каналах. Це збільшення або зменшення напруги визначає напрямок і швидкість двигунів постійного струму. Контролер двигуна TReX Jr [16] показано на рис. 2.10.

У цьому прикладі живлення, що подається на двигуни, контролюється контролером двигуна за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

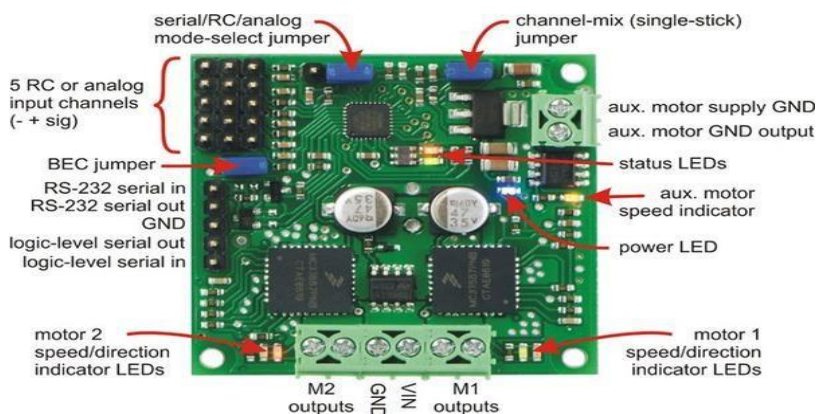


Рисунок 2.10 – Контролер двигуна TReX Jr [16]

ШІМ є відносно поширеним методом керування потужністю, що подається на електродвигун. Принцип роботи досить простий і полягає в тому, що джерело живлення вмикається і вимикається з дуже високою швидкістю, щоб контролювати середню напругу і струм, доступні двигуну [17].

Чим довше джерело живлення увімкнене порівняно з вимкненим, тим вищі середні напруга та струм. Проміжок часу, протягом якого джерело живлення увімкнене протягом певного періоду часу, називається робочим циклом. Коефіцієнт використання, що дорівнює 100%, означає, що джерело живлення повністю увімкнене. Цей принцип описується наступним рівнянням,

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_{\{0\}}^{\{T\}} f(t) dt \quad (2.1)$$

де \bar{y} – представляє середнє значення функції форми сигналу, $f(t)$.

Якщо $f(t)$ це форма імпульсного сигналу зі значенням або U_{min} або U_{max} і ці величини мають тривалість D , то (2.2) можна розкласти у вигляді:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_{\{0\}}^{\{DT\}} U_{max} dt + \int_{\{DT\}}^{\{T\}} U_{min} dt \right) \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) можна ще більше спростити залежно від застосування. Завдяки своїй простоті ШІМ має багато переваг як метод керування двигуном.

Деякі з цих переваг – це низькі втрати потужності і простота використання в ситуаціях цифрового керування. Приклад техніки ШІМ можна побачити на рисунку 2.11.

У цьому прикладі ШІМ використовується для генерації сигналу змінного струму, але принцип роботи такий самий, як і при використанні ШІМ для керування двигуном постійного струму. На рисунку нижче V позначає міжфазні імпульси напруги, а V – результуючу осцилограму щільності потоку.

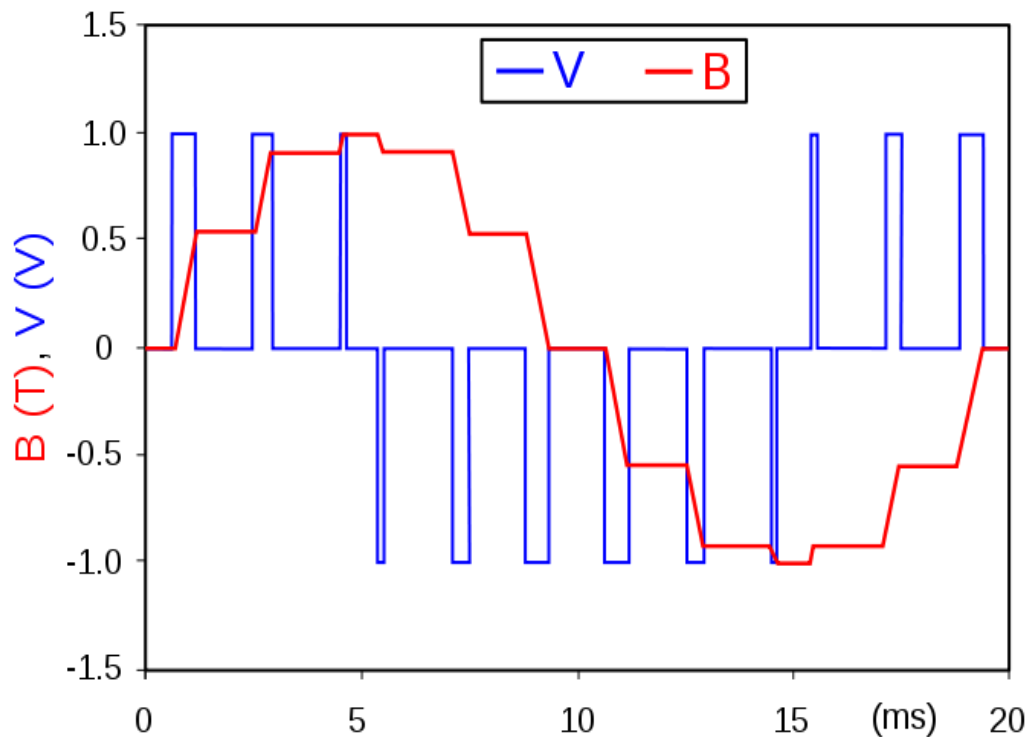


Рисунок 2.11 – ШІМ використовується для формування сигналу керування двигуном змінного струму

Контролер двигуна виготовляється з відповідним графічним інтерфейсом користувача (GUI). Цей графічний інтерфейс дозволяє безпосередньо керувати кожним двигуном, а також низкою інших параметрів. Це дуже корисно, оскільки користувач може встановлювати обмеження струму, прискорення, частоти ШІМ тощо. Для цього кейсу я залишив всі налаштування незмінними, як і у попередніх студентів, що використовували цей транспортний засіб. Таке рішення було прийнято через недостатнє знання характеристик двигуна.

Приклад графічного інтерфейсу показано на рисунку 2.12. Графічний інтерфейс дозволяє отримувати команди двигуна через комп'ютер на контролер двигуна і передавати їх за допомогою бездротової системи зв'язку X-Bee-PRO. Контролер двигуна отримує команди через цю програму контролера, яка запускається з комп'ютера.

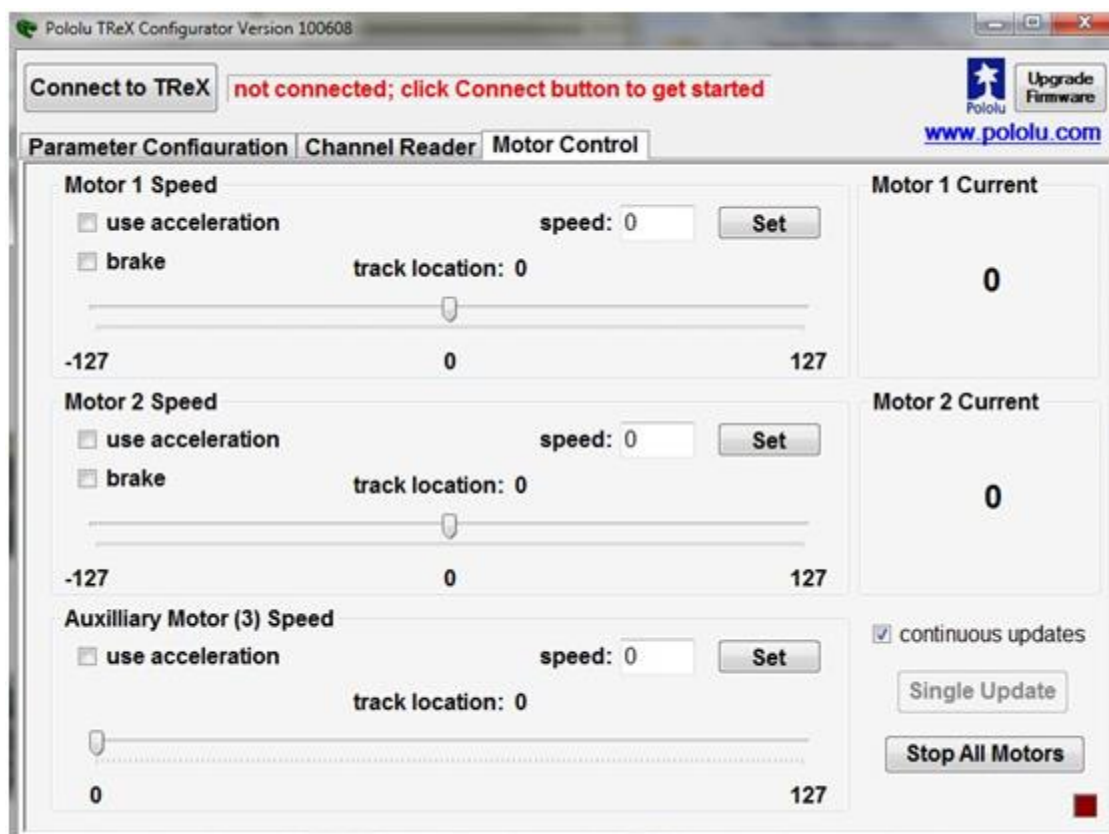


Рисунок 2.12 – Графічний інтерфейс контролера двигуна TReX Jr

X-Bee-PRO – це OEM радіочастотний модуль, який дозволяє користувачам здійснювати бездротовий зв'язок між різними пристроями. Ці модулі розроблені відповідно до стандартів IEEE 802.15.4. Цей бездротовий комунікаційний пристрій взаємодіє безпосередньо з комп'ютером і забезпечує прямий зв'язок з контролером двигуна транспортного засобу. Радіус дії бездротового зв'язку становить приблизно 300'. X-Bee-PRO може передавати дані зі швидкістю 115200 біт/с, але для цього дослідження швидкість передачі даних була встановлена на рівні 9600 біт/с, щоб запобігти відставанню комп'ютера від надто високої швидкості передачі даних.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ В КОЛІСНІЙ ТА В ГУСЕНИЧНІЙ КОНФІГУРАЦІЯХ

3.1 План експерименту

На першому етапі експерименту необхідно дослідити кілька параметрів транспортного засобу, включаючи тягове зусилля, ковзання, індекс рухливості, відношення тиску до просідання, швидкість транспортного засобу, енергоспоживання, вагу і площу контакту.

Транспортний засіб необхідно протестувати для вісімнадцяти різних сценаріїв, включаючи: рівну тверду поверхню, похилу тверду поверхню, рівний м'який ґрунт, похилий м'який ґрунт, нерівний випадковий рослинний рельєф, об'їзд 1,5-дюймової перешкоди, об'їзд 1-дюймової перешкоди і, нарешті, об'їзд перешкоди з трикутною шиною.

На другому етапі, після завершення випробувань робота в колісній конфігурації, машина була переобладнана в гусеничну конфігурацію, після чого були проведені ті ж самі випробування. Після завершення випробувань було проведено кількісний та якісний аналіз, щоб допомогти розробити набір рекомендацій, які будуть використані при виборі транспортного засобу для певного набору умов експлуатації та навколишнього середовища.

3.2 Параметри, обрані для дослідження

Після ретельного і повного огляду літератури та сучасного стану в оцінці мобільності транспортних засобів, для дослідження в цьому дослідженні було обрано декілька параметрів транспортних засобів. Ці параметри були обрані, оскільки вважалося, що вони дають повну і точну картину характеристик мобільності транспортного засобу. Ці показники

ефективності транспортних засобів мали на меті дати якомога повнішу картину, зберігаючи при цьому реалістичні рамки цього проекту.

Параметри, зібрані в цьому дослідженні, включають тягове зусилля на дишлі, ковзання, просідання, споживання струму, швидкість транспортного засобу, крен, ривання і тиск на ґрунт. Ці параметри були зібрані за допомогою набору датчиків, встановлених на транспортному засобі.

Залежно від умов експлуатації, просідання РТЗ може бути важливим параметром. Для позашляховиків просідання транспортного засобу є ключовим параметром і може суттєво впливати на загальну мобільність.

Останніми обраними параметрами, які вважаються класичними параметрами мобільності транспортного засобу, є ковзання ходової частини та швидкість транспортного засобу. Проковзування ходової частини транспортного засобу може мати величезний вплив на характеристики мобільності.

Проковзування транспортного засобу є предметом дослідження вже досить давно і може бути пов'язане з численними факторами умов експлуатації, такими як дизайн шини або протектора, характеристики рельєфу, швидкість транспортного засобу та багатьма іншими [1].

Оскільки швидкість транспортного засобу безпосередньо пов'язана з ковзанням і є параметром, включеним майже в усі дослідження мобільності транспортних засобів, її було включено до аналізу. Швидкість транспортного засобу може бути корисною для характеристики характеристик мобільності транспортного засобу і, як правило, є параметром, що становить інтерес. Якщо швидкість транспортного засобу зазвичай легко виміряти, то ковзання транспортного засобу виміряти досить складно, і для важких транспортних засобів було використано кілька різних методів, але ковзання коліс ще не було виміряно безпосередньо для роботизованих транспортних засобів.

Наявні експериментальні дані для важких транспортних засобів свідчать про те, що максимальне тягове зусилля становить від 15% до 20%. Проковзування для колісних і гусеничних транспортних засобів

характеризується дещо по-різному, і відмінності в характеристиках мобільності між цими двома ходовими частинами представляють великий інтерес і дають цінну інформацію про характеристики мобільності кожної ходової частини. Всі згадані фактори вплинули на рішення включити цей параметр ефективності в це тематичне дослідження.

Останнім параметром, який було обрано для включення в це дослідження, є крен і рискання транспортного засобу. Ці терміни були розроблені для опису динаміки польоту, але тут вони застосовуються для опису руху позашляховика, коли він рухається непідготовленою місцевістю. Крен зазвичай визначається як обертання вздовж осі X, а рискання – як обертання вздовж осі Z. Знання орієнтації транспортного засобу дозволить співвіднести інші параметри транспортного засобу з його положенням. Це буде корисно при порівнянні швидкості руху та споживання струму.

Схему осей обертання відносно тестового РТЗ можна побачити на рисунку 3.1. Через потенційні можливості, отримані завдяки включенню орієнтації транспортного засобу в це тематичне дослідження, вона була визнана параметром, що представляє інтерес.

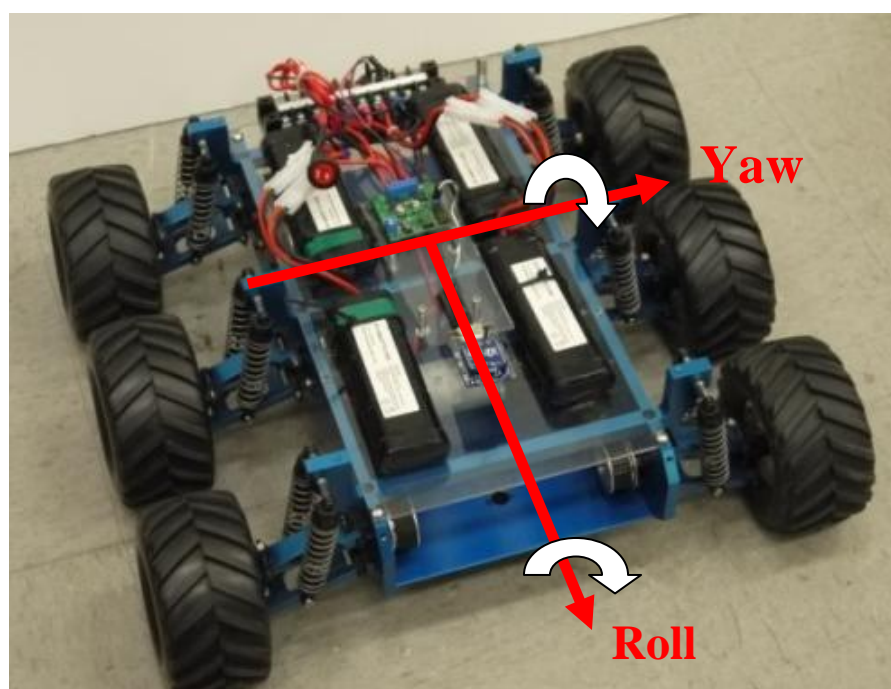


Рисунок 3.1 – Осі обертання та крену

Всі ці параметри будуть вимірюватися за допомогою набору бортових датчиків і датчиків, вбудованих у випробувальне середовище. Метод вимірювання цих параметрів обговорюється в розділі 3.3.

3.3 Результати експерименту для колісного виконання

Більшість сценаріїв відбувалися або на твердій поверхні, або на піщано-мулистому суглинку. Машину випробовували на рівних поверхнях, похилих поверхнях і в ситуаціях об'їзду перешкод. Короткий опис сценаріїв випробувань, які були використані, можна побачити в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Короткий опис сценаріїв тестування

Умови тестування	Піщаний мулистий суглинок	Жорстка поверхня	Випадковий (рослинність)
Рівна поверхня	+	+	+
Похила поверхня	+	+	+
Перешкода з одного боку	рейка 38.1 мм рейка 25.4 мм трикутна рейка	рейка 38.1 мм рейка 25.4 мм трикутна рейка	–
Перешкода з обидвох сторін	рейка 38.1 мм рейка 25.4 мм трикутна рейка	рейка 38.1 мм рейка 25.4 мм трикутна рейка	–

Незважаючи на значний обсяг випробувань, всі сценарії були необхідні для проведення повного аналізу. Сценарії, в яких випробовувався транспортний засіб за відсутності перешкод, включені в це тематичне дослідження: рівна тверда поверхня, рівний піщаний суглинок, похила тверда поверхня, похилий піщаний суглинок, випадкова нерівна поверхня з рослинністю.

Всі ці сценарії були протестовані на різних швидкостях:

- об'їзд рейки 38.1 мм з однієї сторони ходової частини;
- об'їзд рейки 38.1 мм з обох сторін ходової частини;

- об'їзд рейки 25.4 мм з однієї сторони ходової частини;
- об'їзд рейки 25.4 мм з обох сторін ходової частини;
- об'їзд трикутної рейки однією стороною ходової частини та об'їзд трикутної рейки обома сторонами ходової частини.

Приклади цих сценаріїв можна побачити на рис. 3.2 – 3.3.

Як зазначалося раніше, були включені різні сценарії об'їзду перешкоди. Ці перешкоди були протестовані з однією ходовою передачею, а потім з обома ходовими передачами, що перетинають перешкоду.

На рисунку 3.2 ви можете побачити, як тестовий РТЗ долає перешкоду з однією ходовою частиною. На рисунку 3.3 РТЗ долає ту ж саму перешкоду, але з обома ходовими колесами.

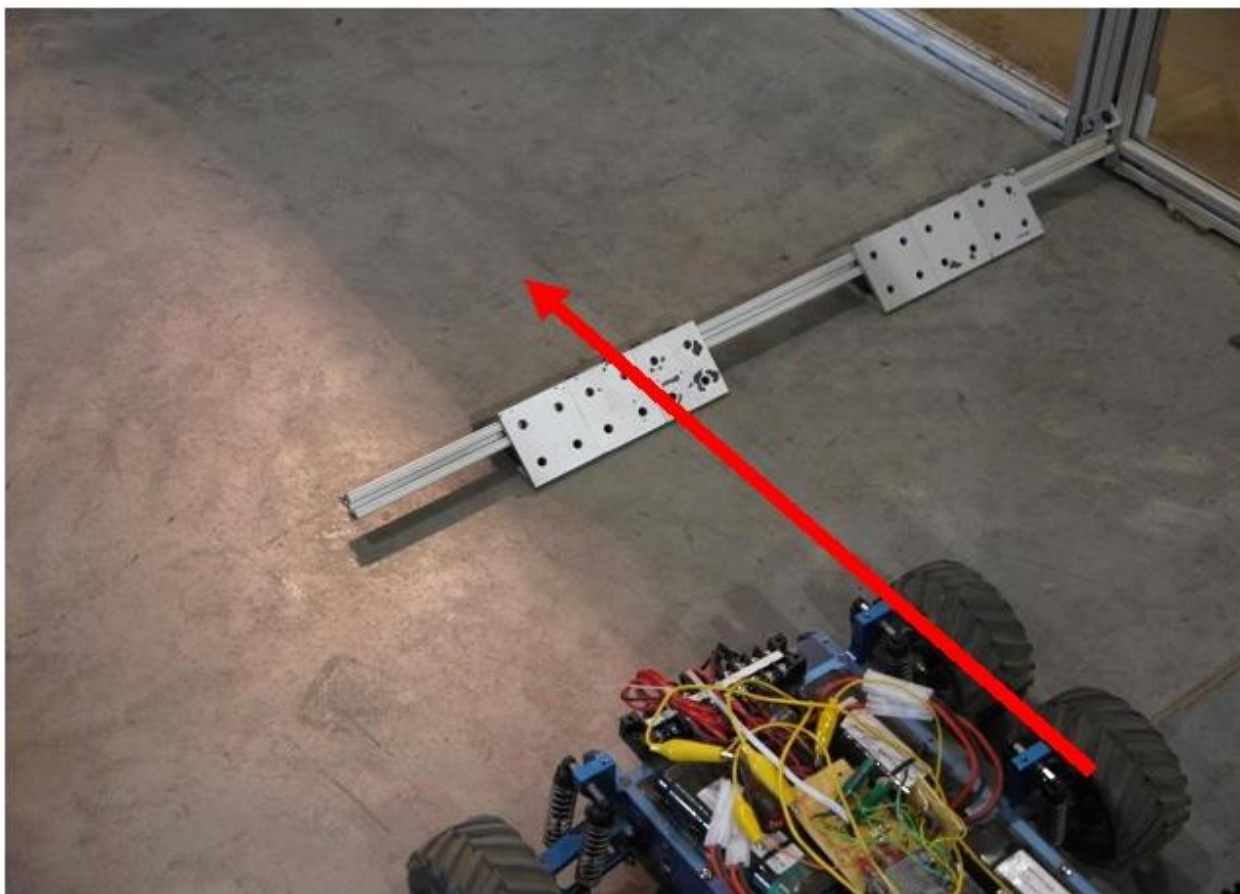


Рисунок 3.2 – Випробувальний макет об'їжджає перешкоду з однією ходовою частиною

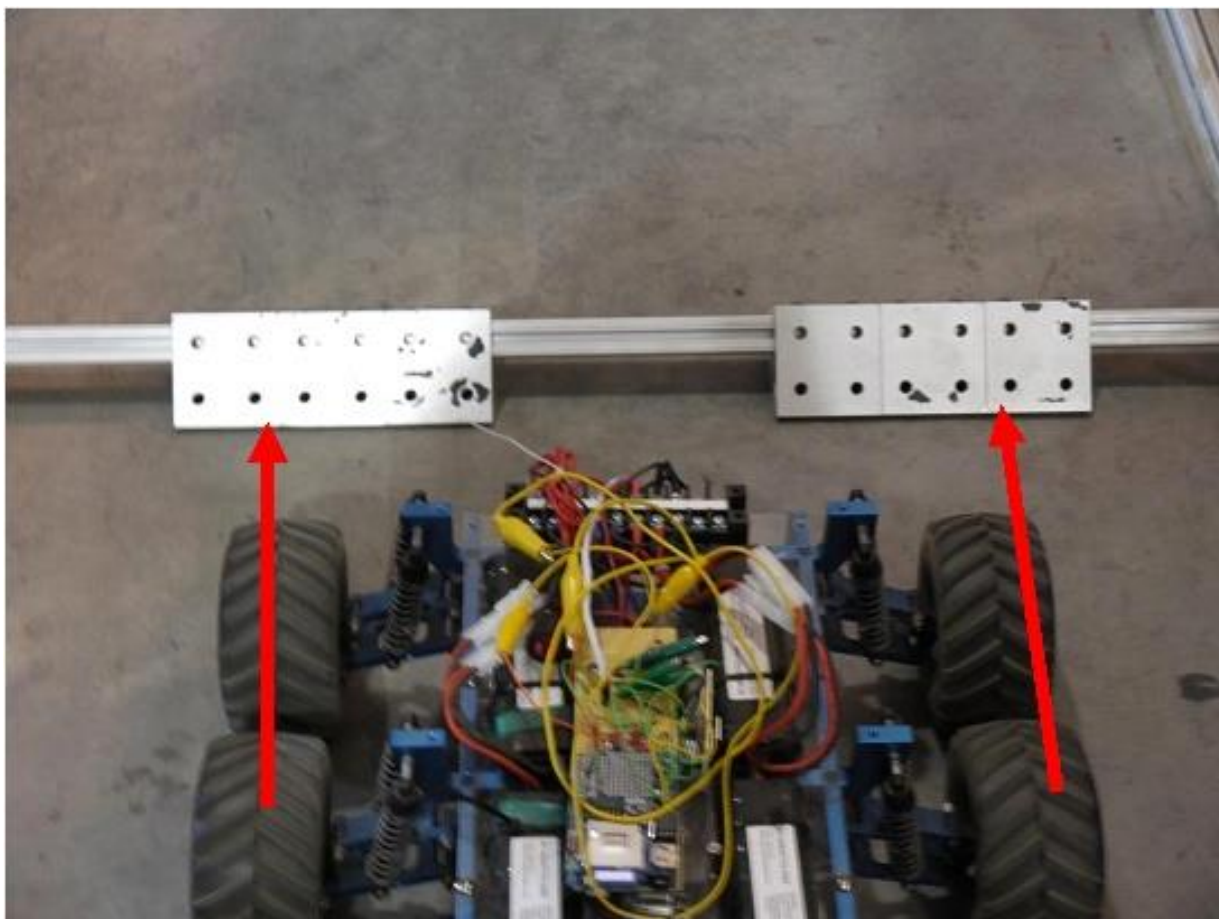


Рисунок 3.3 – Випробувальний макет долає перешкоду обома ходовими колесами

У різних тестах на переговори з перешкодами використовувалися три різні перешкоди. Ці перешкоди включають: рейка 38.1 мм, рейка 25.4 мм і трикутна планка. Обидві перешкоди з квадратних рейок мають приблизну довжину 431.8 мм.

Трикутна перешкода, що використовувалася для цих тестів, мала висоту приблизно 58.166 мм, ширину 58.166 мм і довжину основи 106.426 мм. На кожній стороні ходової частини закріплено по три трикутні перешкоди в ряд з проміжком у шість дюймів між кожним набором перешкод.

Процедура запуску як у колісній, так і в гусеничній конфігурації була ідентичною. Транспортний засіб дистанційно керується з комп'ютера за допомогою програми, що входить до складу контролера двигуна

транспортного засобу. За допомогою програми можна керувати напрямком руху та швидкістю транспортного засобу.

Транспортний засіб зупиняли і відключали живлення від двигунів, коли транспортний засіб досягав кінця випробувальної поверхні або якщо транспортний засіб натрапляв на перешкоду, яку він не міг подолати. Якщо транспортний засіб не міг подолати перешкоду, живлення відключалося приблизно через 10 секунд або якщо було абсолютно ясно, що об'єкт знерухомлений.

Після пробного пробігу дані збиралися таким же чином, а ґрунт перевірявся за допомогою конусного пенетрометра, щоб переконатися, що умови ґрунту залишалися незмінними протягом усього дослідження (рис. 3.4). Після завершення пробігу дані, зібрані за допомогою бортової системи збору даних, були передані на комп'ютер. Система збору даних зберігає інформацію на SD-карті. Зібрані дані переносяться на комп'ютер і швидко переглядаються, щоб переконатися у відсутності аномалій або розбіжностей.



Рисунок 3.4 – Місця вимірювання просідання

Були зібрані такі параметри платформи: просідання, тягове зусилля на дишлі, швидкість РТЗ, споживання струму та орієнтація РТЗ. Ці параметри дозволили провести й інші прямі порівняння.

Транспортний засіб у своїй колісній конфігурації був здатний долати більшість перешкод, але було кілька перешкод, які транспортний засіб не зміг об'їхати.

Транспортний засіб тестувався в сценаріях об'їзду перешкод з 50%, 75% і 95% доступної потужності.

Якщо машина не могла об'їхати перешкоду на жодному з цих рівнів потужності, її тестували на 100% потужності, щоб зробити остаточне порівняння здатності роботів долати певні перешкоди.

Якщо машина долала перешкоду на одному з трьох нижчих рівнів потужності, то вона не тестувалася в цьому сценарії об'їзду перешкоди на 100% потужності.

Під час тестування виявилось, що основним обмежувальним фактором РТЗ була його загальна потужність. Багато перешкод, які РТЗ не зміг подолати, схоже, були пов'язані з недостатньою потужністю. Однією з таких перешкод, зокрема, є похила поверхня на піщаному суглинку.

Машина наближалася до перешкоди і починала підніматися по схилу, але не могла подолати перешкоду через брак потужності. Це явище пояснюється нестачею потужності, оскільки транспортний засіб не втрачає зчеплення з дорогою під час руху по схилу.

На рисунку 3.5 показано приблизне положення, в якому транспортний засіб може знерухомитися.



Рисунок 3.5 – РТЗ у колісному виконанні на похилому піщано-мулистому суглинку

Ще одна суттєва різниця в мобільності спостерігалася при порівнянні результатів об'їзду перешкод для РТЗ на твердій поверхні та на піщаному суглинку. Транспортний засіб не міг об'їжджати ті ж самі перешкоди на піщаному суглинку з однаковою швидкістю. Для випадків: 1,5-дюймової перешкоди обома ходовими колесами, 1-дюймової перешкоди однією стороною ходових коліс та 1-дюймової перешкоди обома ходовими колесами, були помітні та повторювані відмінності.

РТЗ не зміг подолати ці перешкоди на 50% потужності на піщаному суглинку, тоді як на твердому покритті він успішно подолав перешкоди. Це пояснюється тим, що транспортний засіб відчуває більший опір руху на піщано-мулистому суглинку через занурення.

Просідання транспортного засобу збільшує опір руху, оскільки транспортний засіб повинен зміщувати ґрунт перед ходовою частиною та/або ущільнювати ґрунт під транспортним засобом для того, щоб рухатися вперед. Це спричиняє збільшення опору руху і впливає на швидкість транспортного засобу.

У цих трьох випадках транспортний засіб не міг підтримувати достатньо високу швидкість для подолання цих перешкод.

На рис. 3.6 та рис. 3.7 ви можете побачити послідовність подій, коли транспортний засіб стає нерухомим на трикутній перешкоді у вигляді колії, намагаючись подолати цю перешкоду однією стороною ходової частини.

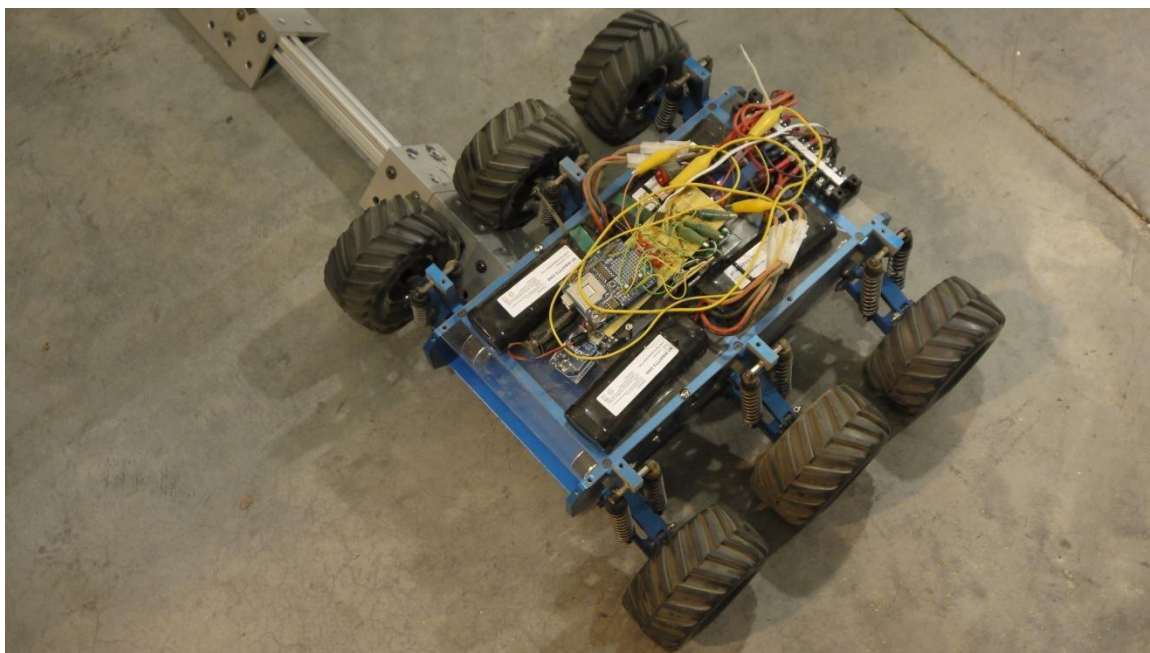


Рисунок 3.6 – Перше колесо РТЗ долає перешкоду

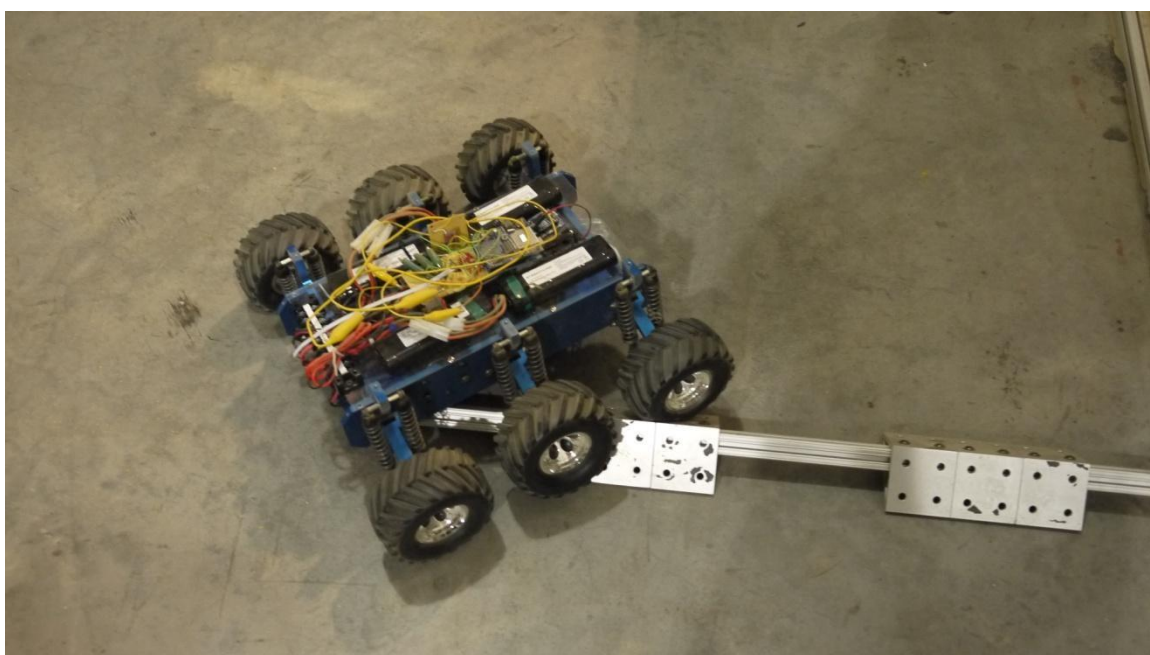


Рисунок 3.7 – РТЗ починає обертатися і швидко знерухомлюється

3.4 Результати експерименту для гусеничного виконання

Під час проведення випробувань на гусеничному ході були зроблені деякі початкові спостереження. Транспортний засіб у гусеничній конфігурації відчував значно більший внутрішній опір руху через гусеничну ходову частину. При русі РТЗ в колісній конфігурації по твердій поверхні на 50% потужності, РТЗ міг долати деякі перешкоди. У гусеничній конфігурації транспортний засіб не мав би достатнього крутного моменту при 50% потужності, щоб викликати рух. Це було першим і найбільш очевидним початковим спостереженням.

Гусеничний транспортний засіб продемонстрував в цілому більшу мобільність. Гусенична машина з легкістю долала всі перешкоди, єдиним винятком була похила поверхня на піщаному суглинку. Під час випробувань на колесах машина не змогла подолати трикутну перешкоду однією стороною ходової частини, тому що машина втрачала зчеплення з дорогою і розверталася. Цього не сталося з РТЗ у гусеничній конфігурації. Транспортний засіб дуже ефективно подолав трикутну перешкоду і не продемонстрував жодної тенденції до обертання. Це можна пояснити додатковим зчепленням і плавучістю РТЗ.

Транспортний засіб у такій конфігурації жодного разу не розірвав зчеплення з перешкодою і зберігав достатнє зчеплення, що дозволило йому з легкістю виконати випробування на перешкоду.

На рисунку 3.8 транспортний засіб долає трикутну перешкоду у вигляді шипів. Це додаткове зчеплення і плавучість також дозволили гусеничному транспортному засобу долати перешкоди на меншій швидкості. Це може бути цінною характеристикою, яка вплине на енергоефективність транспортних засобів.

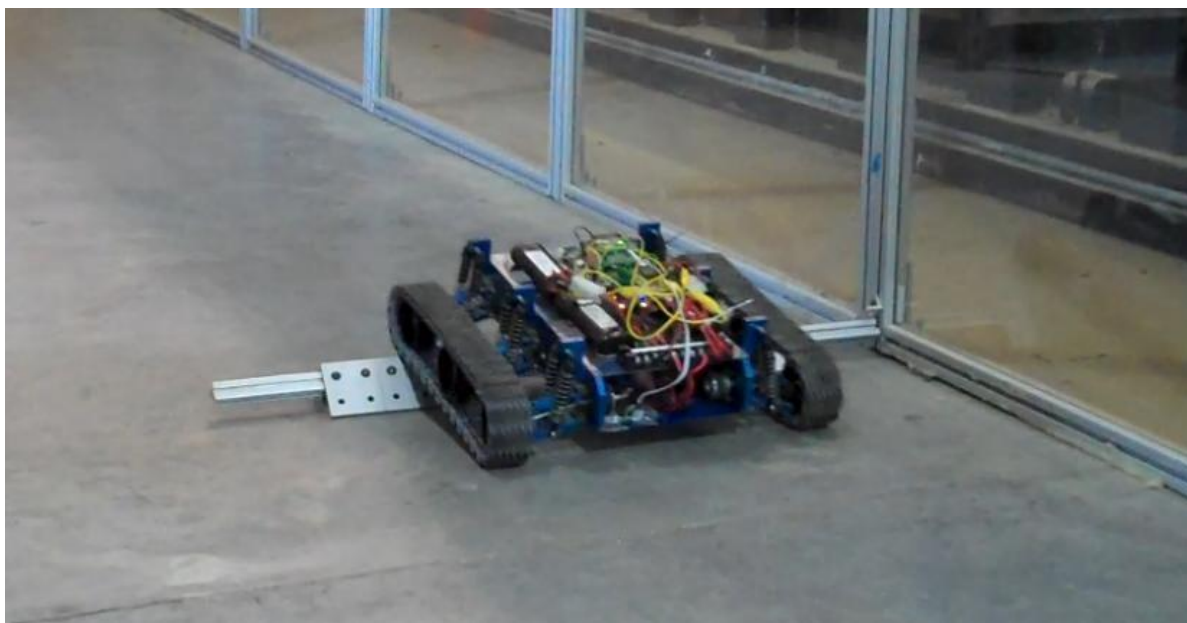


Рисунок 3.8 – Гусеничний РТЗ об'їжджає трикутну перешкоду

3.5 Обробка даних

Результати випробувань на просідання для колісного транспортного засобу наведено на рисунку 3.9, а результати для гусеничного транспортного засобу – на рисунку 3.10.

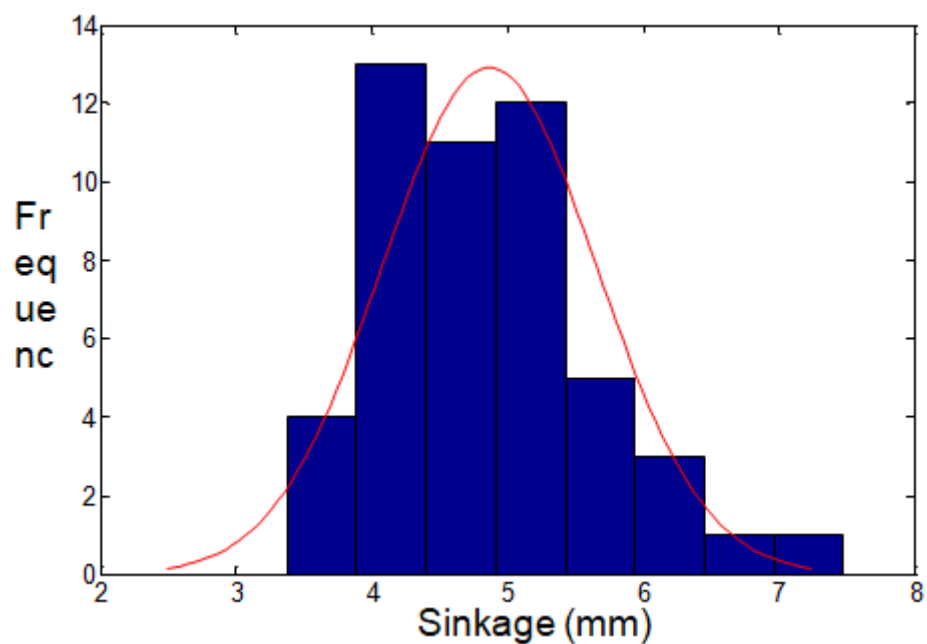


Рисунок 3.9 – Результати просідання коліс

Результати занурення були відображені у форматі гістограми для точного представлення розподілу вимірювань.

Для того, щоб зробити деякі висновки про те, наскільки нормальними є розподіли вимірювань, було застосовано нормальну підгонку кривої.

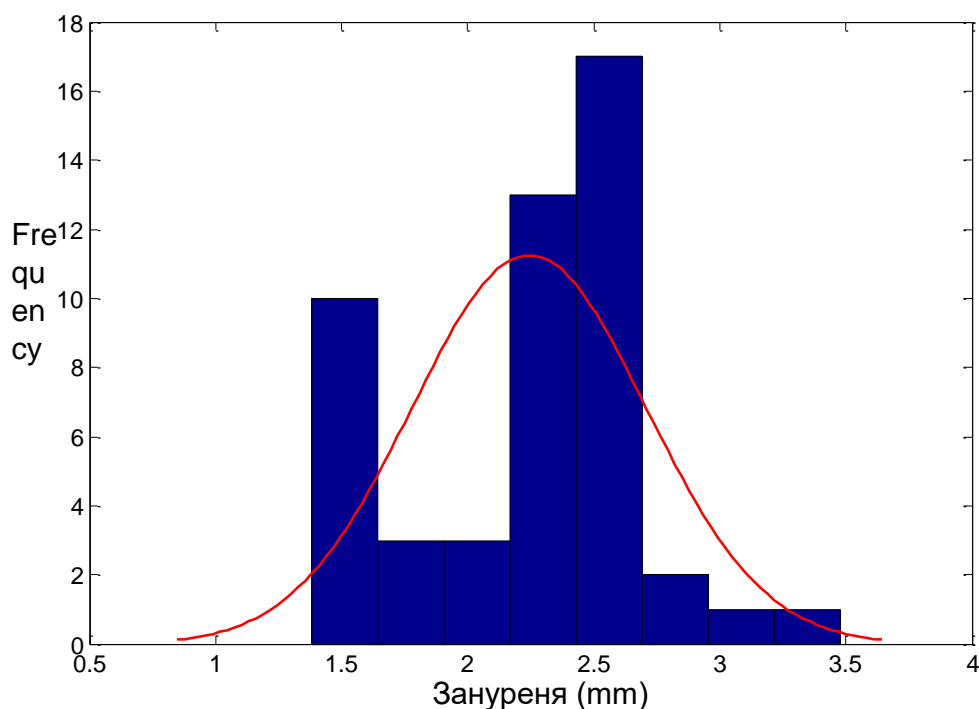


Рисунок 3.10 – Результати відстежуваного просідання конфігурації

Під час випробувань колісний транспортний засіб мав помітно більшу величину просідання. Середнє значення просідання колісної машини становило 4,868 мм, а гусеничної машини – 2,244 мм. Очікувано, що колісний транспортний засіб буде мати більшу просадку, оскільки його навантаження розподіляється на меншу площу контакту з дорожнім покриттям. Нормальне навантаження гусеничного транспортного засобу розподіляється по всій довжині ходової частини транспортного засобу і, отже, має менший тиск на ґрунт, що призводить до меншого просідання.

Випробування на ущільнення ґрунту було використано для порівняння умов, а результати випробувань конусним пенетрометром показані нижче на рисунках 3.11 – 3.13.

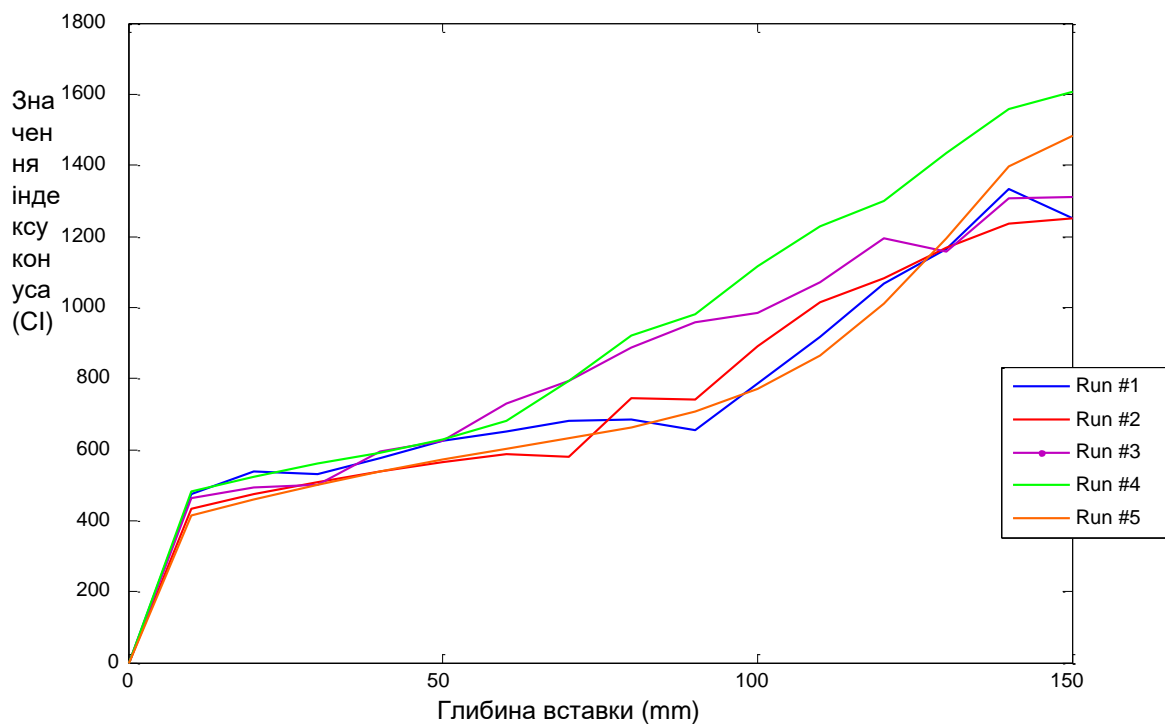


Рисунок 3.11 – Дані індексу конусності для випробувань на колесах

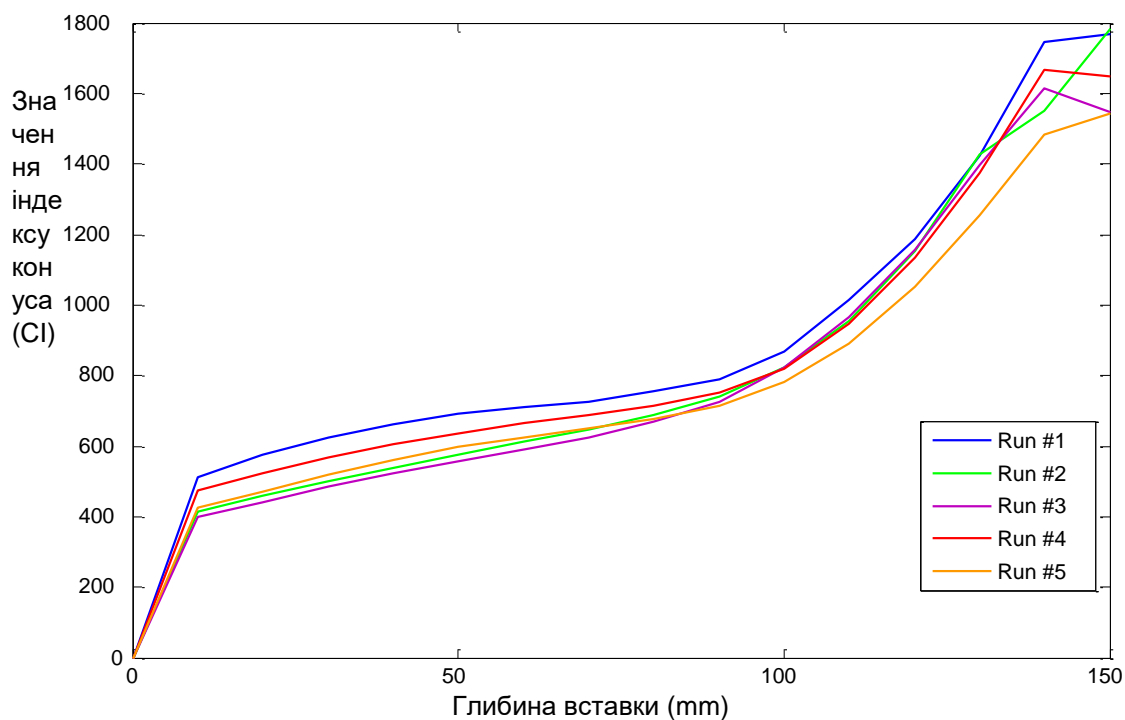


Рисунок 3.12 – Дані індексу конуса для відстежуваного тестування

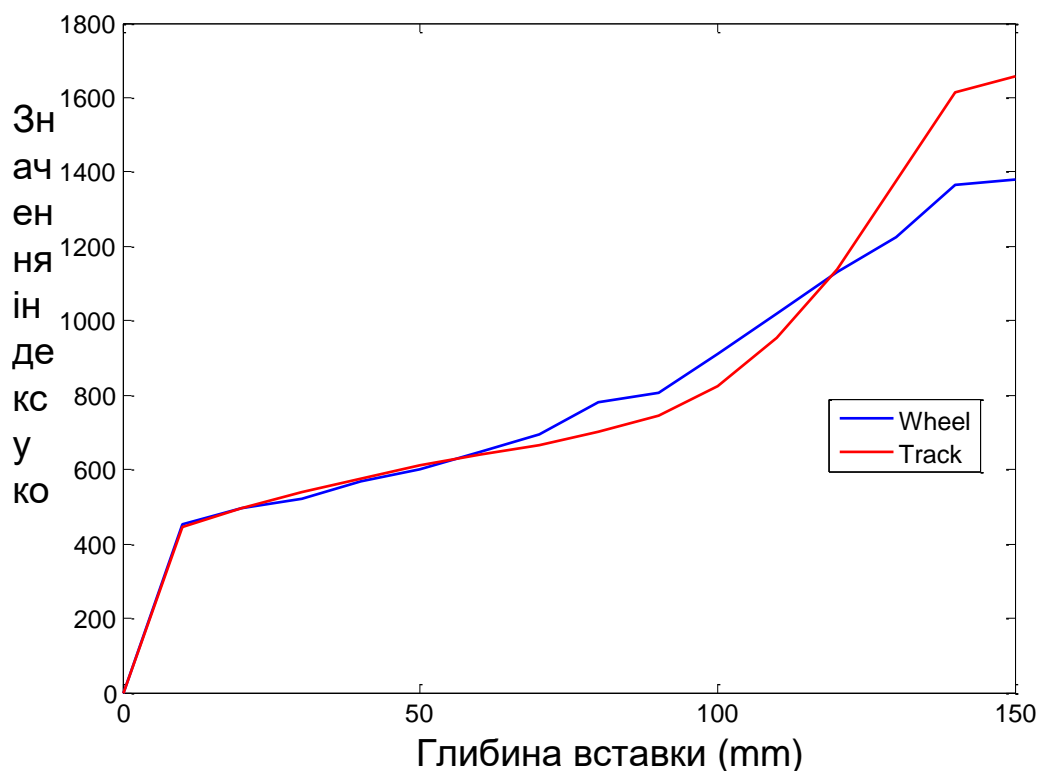


Рисунок 3.13 – Усереднені дані конусного індексу

На рисунку 3.11 показані дані індексу конусності для випробувань коліс. Кожна лінія графіка представляє усереднені дані індексу конусності для кожного окремого випробування. Після кожного випробування проводилося загалом від 8 до 10 вимірювань індексу конусності.

На рисунку 3.12 показано дані індексу конусності для випробувань гусеничного транспортного засобу. Порівнюючи результати, можна побачити, що ґрунтові умови дуже схожі, і результати просідання можна безпосередньо порівняти. Для подальшого аналізу даних СІ було порівняно усереднені дані з усього набору випробувань колісних і гусеничних транспортних засобів (рис. 3.13).

Усереднені набори даних виглядають майже ідентичними. Це дуже обнадіює і підтверджує, що процедура підготовки ґрунту адекватно відтворює умови ґрунту для кожного випробування. Процедура підготовки ґрунту використовується для всіх випробувань, які проводилися на піщано-супіщаному випробувальному майданчику.

Гусеничний транспортний засіб працює в сталому режимі протягом

декількох коротких періодів часу, а потім вступає в контакт з перешкодою. Існує велика помітна зона, в якій струм значно падає. Це пов'язано з тим, що транспортний засіб рухається вгору по перешкоді до середини, після чого центр ваги зміщується вперед, і транспортний засіб нахилиється вперед. Це і є причиною короткочасного падіння струму, оскільки сила тяжіння переносить транспортний засіб через об'єкт. Цю послідовність подій можна побачити на рис. 3.14 і рис. 3.15.

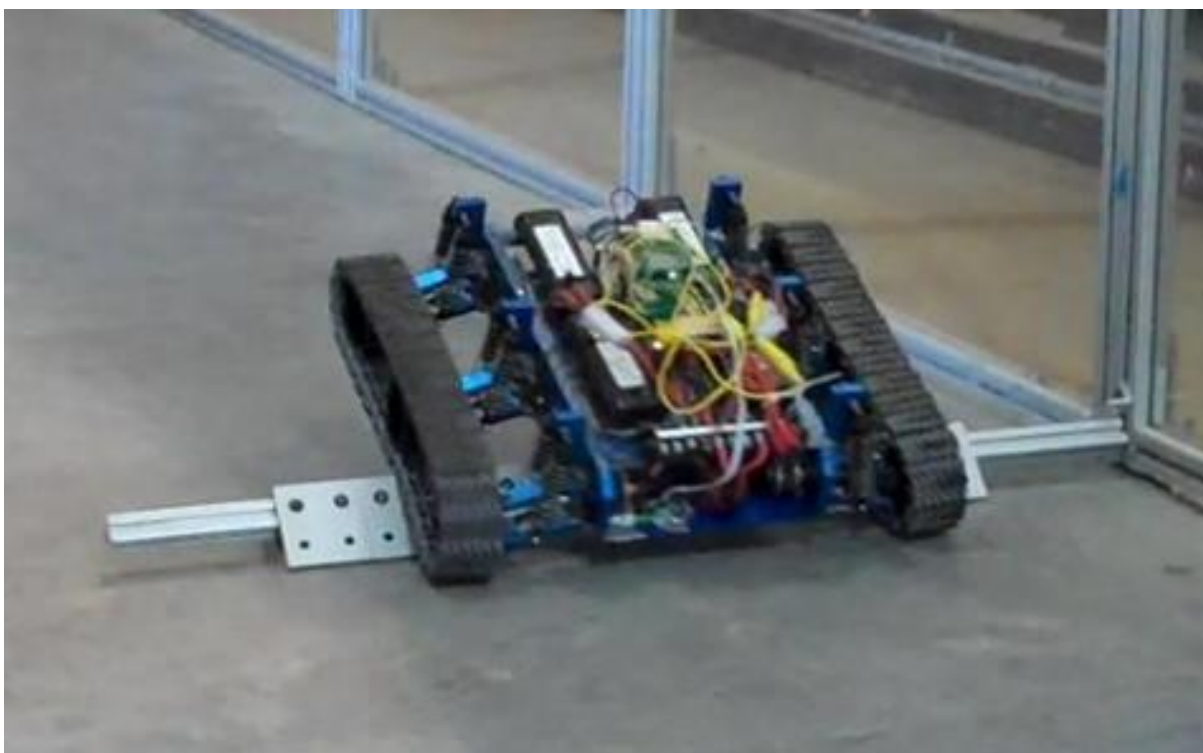


Рисунок 3.14 – Гусеничний транспортний засіб починає перетинати перешкоду

Під час цього значного падіння потужності було також багато коротких сплесків. Вважається, що це пов'язано з силою вібрації, яка індукується, коли транспортний засіб знаходиться в гусеничній конфігурації. До моменту плавної роботи колісного транспортного засобу, коли ділянки гусениці прогинаються над приводними зірочками, виникає значна кількість вібрації. Інший аспект, який слід враховувати, полягає в тому, що під час стаціонарного руху вперед зі швидкістю приблизно 2 милі/год гусеничний

транспортний засіб споживає приблизно 18,4 Вт.

Після того, як транспортний засіб перетинає об'єкт, потужність повертається до свого стаціонарного значення, доки живлення транспортного засобу не буде відключено.

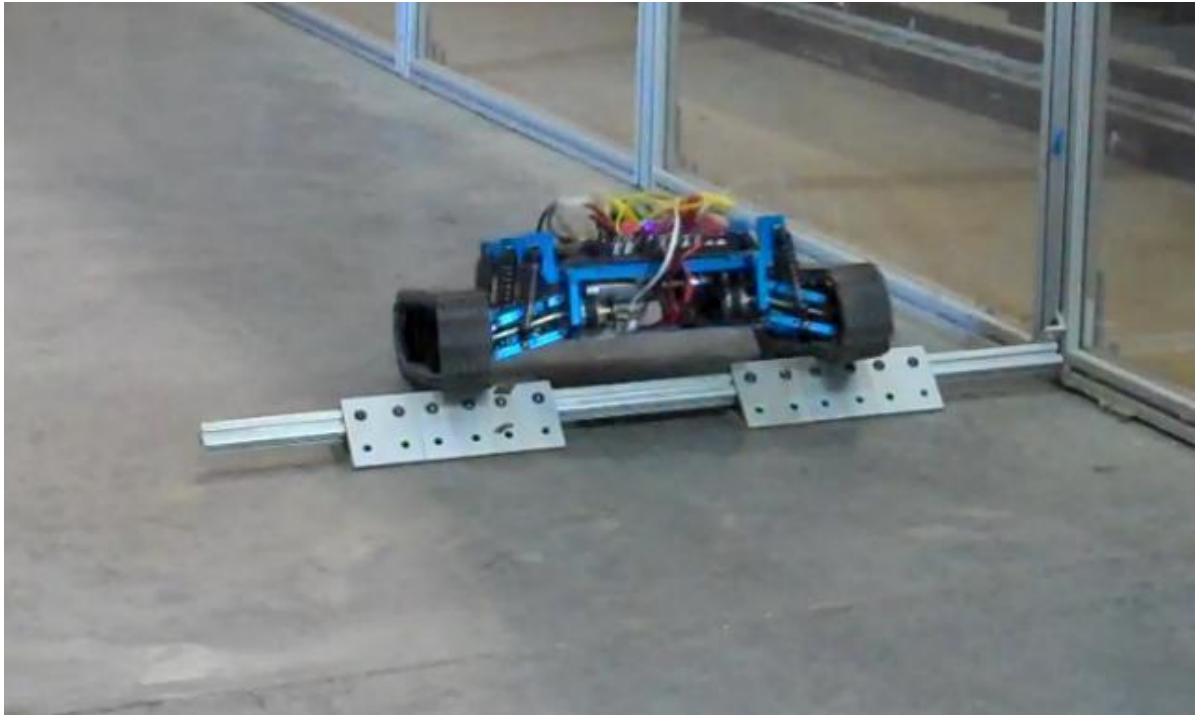


Рисунок 3.15 – Зміщення центру ваги гусеничного транспортного засобу

Профіль потужності колісного транспортного засобу під час подолання 1,5-дюймової перешкоди з обома ходовими колесами показаний на рис. 3.16 і демонструє деякі цікаві тенденції.

Перша тенденція, яка простежується в профілі потужності колісного транспортного засобу, – це дуже коротке падіння потужності, коли транспортний засіб стикається з перешкодою. Коли колісний транспортний засіб долає перешкоди, він демонструє зовсім іншу характеристику прохідності. Колісний транспортний засіб підтримував досить рівну орієнтацію під час об'їзду перешкод, і не було великого зсуву, який спостерігався для гусеничного транспортного засобу. Оскільки падіння потужності для колісного транспортного засобу є таким коротким, важко

визначити, чи є незначні стрибки, які спостерігаються для профілю гусеничного транспортного засобу. Загальна робота транспортного засобу в колісній конфігурації була набагато плавнішою, з набагато меншою вібрацією.

Після подолання перешкоди колісний транспортний засіб дуже швидко повертається до свого стаціонарного рівня потужності, рухаючись вперед зі швидкістю 2 миль/год. Останнє спостереження, яке було зроблено, полягає в тому, що під час роботи в стаціонарному режимі зі швидкістю приблизно 2 миль/год колісний транспортний засіб має рівень потужності 13,7 Вт.

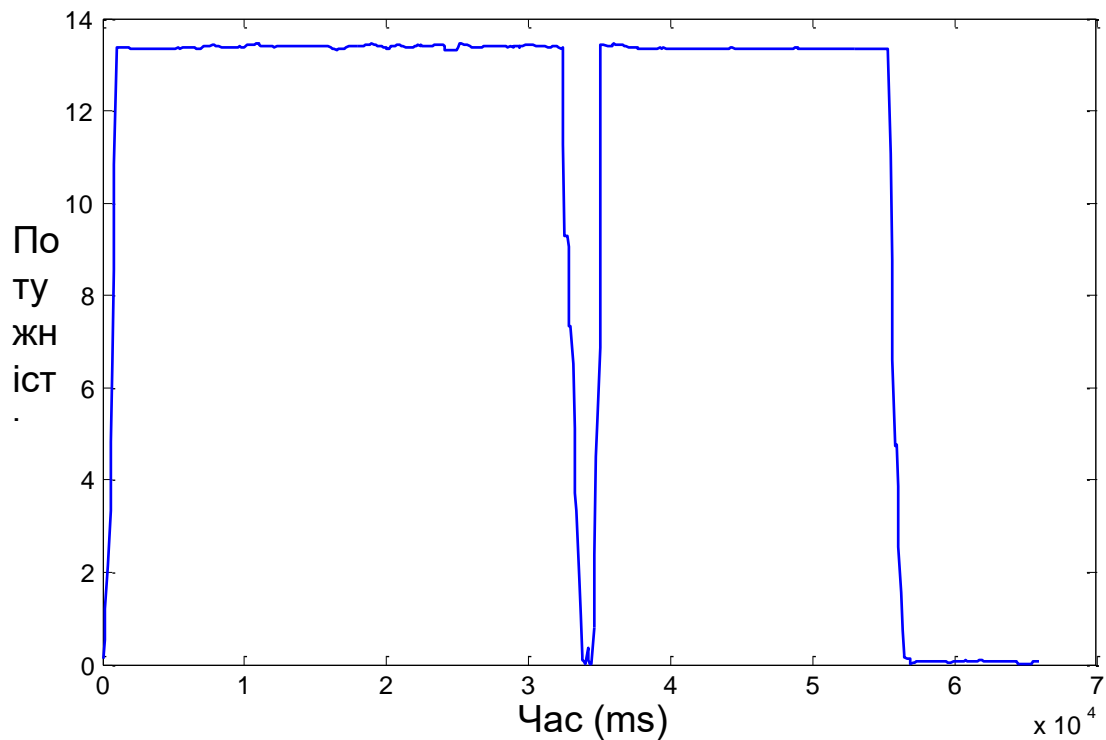


Рисунок 3.16 – Профіль потужності колісного транспортного засобу під час подолання перешкоди висотою 1,5 дюйма

Порівнюючи профілі потужності колісного та гусеничного транспортного засобу під час роботи в майже ідентичних ситуаціях, можна зробити деякі висновки. Перший і найбільш очевидний висновок полягає в тому, що гусеничний транспортний засіб потребує більшої потужності при роботі з такою ж швидкістю, як і колісний. Це спостереження було

послідовним у всіх тестах. Це пов'язано з тим, що гусеничний транспортний засіб відчуває вищий рівень внутрішнього опору через ходову частину. Інше спостереження, пов'язане з цим ефектом, полягає в тому, що гусеничному транспортному засобу потрібно більше часу, щоб досягти стаціонарного значення потужності. Це призводить до дещо повільнішого розгону до стаціонарного стану. Це також можна пояснити вищим внутрішнім опором руху гусеничного транспортного засобу.

Останній пункт для порівняння – максимальна швидкість транспортних засобів. Під час усіх сценаріїв тестування максимальна швидкість транспортних засобів контролювалася за допомогою поворотного датчика. У випадку з максимальною швидкістю транспортного засобу, вона обмежена потужністю двигунів. На максимальну швидкість також впливає опір руху транспортного засобу через внутрішній опір та опір через ущільнення ґрунту. У всіх випадках транспортний засіб у колісній конфігурації мав вищу максимальну швидкість. Це було пов'язано з тим, що колісна конфігурація мала набагато менший внутрішній опір. У таблиці 3.2 наведено середню максимальну швидкість для піщано-мулистого суглинку та твердого покриття.

Таблиця 3.2 – Середні максимальні робочі швидкості

Конфігурація	Піщаний суглинок	Жорстка поверхня
На колесах	4.354 mph	5.213 mph
Гусениця	3.986 mph	4.567 mph

Порівняння максимальної швидкості було зроблено для випадку, коли транспортний засіб працював у сталому режимі при прямолінійному русі. Максимальна швидкість була проаналізована як для піщаного суглинку, так і для твердого покриття.

Ця відмінність є ще одним аспектом, який може впливати на рішення щодо вибору транспортного засобу для певних умов експлуатації. Якщо

максимальна швидкість РТЗ є важливим параметром, то колісна конфігурація може бути більш привабливою.

Проаналізувавши енергетичний профіль, можна сказати, що колісний транспортний засіб має вищу максимальну швидкість і буде більш енергоефективним, ніж гусеничний транспортний засіб, що працює з такою ж швидкістю.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Охорона праці при роботі за ПК

При роботі за ПК необхідно дотримуватися вимог ДСТУ 7239:2011 "Ергономіка робочих місць та умов праці" та ДСТУ EN 9241-5:2014 "Ергономічні вимоги до роботи з відео дисплейними терміналами (VDT)". Робоче місце повинно бути організовано так, щоб мінімізувати фізичне навантаження на користувача. Монітор слід розташовувати на відстані 50-70 см від очей, його верхній край повинен бути на рівні очей або трохи нижче. Монітор повинен мати можливість регулювання висоти та кута нахилу для забезпечення комфортного положення голови та шиї. Клавіатура повинна бути розташована на відстані 10-15 см від краю столу, а миша – на одному рівні з клавіатурою для зменшення напруги на кисті рук. Робоче місце повинно бути добре освітленим, щоб уникнути відблисків на екрані та знизити навантаження на очі. Рекомендується використовувати непряме освітлення та антивідблискові екрани.

4.2 Аналіз небезпек і шкідливих факторів

Основними небезпеками при роботі за ПК є статична поза, тривала напруга очей, неправильне освітлення, електромагнітне випромінювання та недостатня вентиляція. Статична поза може призвести до проблем з хребтом, м'язової напруги та порушень кровообігу. Тривала напруга очей може викликати зорове стомлення, сухість очей та погіршення зору. Неправильне освітлення може спричинити дискомфорт та зорове перенапруження. ПК та інші електронні пристрої генерують електромагнітні поля, що можуть мати негативний вплив на здоров'я при тривалому впливі. Погане повітря може призвести до зниження концентрації, головного болю та загального дискомфорту.

4.3 Заходи з охорони праці

Для забезпечення безпеки та здоров'я працівників необхідно впроваджувати ергономічну організацію робочого місця, правильне налаштування обладнання та дотримання режиму праці та відпочинку. Відповідно до ДСТУ ISO 9241-6:1998, працівникам рекомендується проводити 5-10 хвилинні перерви кожні 50-60 хвилин роботи за ПК. Роботодавець повинен забезпечити відповідне навчання з охорони праці та надати працівникам інформаційні матеріали про шкідливі фактори та заходи профілактики.

4.4 Пожежна безпека

Відповідно до ДБН В.2.5-56:2014 "Системи протипожежного захисту", робочі місця повинні бути обладнані первинними засобами пожежогасіння, такими як вогнегасники. Електричні розетки і кабелі повинні регулярно перевірятися на наявність пошкоджень. Необхідно дотримуватися правил експлуатації електроприладів та уникати перевантаження електричної мережі. У разі виявлення диму або запаху горіння, працівники повинні негайно залишити приміщення і повідомити відповідні служби.

4.5 Висновки

Дотримання вимог охорони праці при роботі за ПК є необхідною умовою збереження здоров'я працівників. Впровадження ергономічних стандартів, регулярні перерви, правильне освітлення та вентиляція допомагають мінімізувати шкідливий вплив на організм. Пожежна безпека також має важливе значення, і повинна бути забезпечена відповідно до національних стандартів. Виконання цих вимог сприятиме підвищенню продуктивності праці та загальному покращенню умов роботи, що, в свою

чергу, позитивно вплине на фізичний та психологічний стан працівників.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз предметної області та останніх досліджень, визначено актуальність роботи.

Було визначено та деталізовано мету та задачі проекту, написано технічне завдання та проведено планування робіт.

В роботі проведений аналіз існуючих рішень оцінки якості характеристик мобільності та існуючих програмних та апаратних рішень вивчення потенційних характеристик мобільності робототехнічних платформ. Також розглянуті математичні моделі оцінки якості характеристик мобільності робототехнічних платформ.

На підставі аналізу, у середовищі 3D-моделювання, розроблені конструкції робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях.

У третьому розділі проведені експериментальні дослідження робототехнічної платформи в колісній та в гусеничній конфігураціях: складено план експерименту; обрані для дослідження параметри; зібрано результати експерименту для роботи технічного засобу у колісному та гусеничному виконаннях. Проведена обробка даних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Струтинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні робототехнічні комплекси: Монографія. Житомир: ПП «Рута», 2023 . 524 с
2. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – 64 с.
4. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
5. Lončarević, Š., Ilinčić, P., Šagi, G., & Lulić, Z. (2022). Problems and directions in creating a national non-road mobile machinery emission inventory: a critical review. *Sustainability*, 14(6), 3471.
6. Liu, X. J., Su, B., Yao, Y. A., Liu, C. H., & Zhou, L. (2021). The technology development direction analysis of the small portable unmanned ground platform. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1721, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
7. Jung, Y. H., Cho, D. H., Hong, J. W., Han, S. H., Cho, S. B., Shin, D. Y., Kim, S. S. (2022). Development of Multi-Sensor Module Mounted Mobile Robot for Disaster Field Investigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 1103-1108.
8. Machado, T., Malheiro, T., Monteiro, S., Erlhagen, W., & Bicho, E. (2019). Attractor dynamics approach to joint transportation by autonomous robots:

theory, implementation and validation on the factory floor. *Autonomous Robots*, 43, 589-610

9. Bekker, M.G., *Introduction to terrain-vehicle systems*. 1969, Ann Arbor: University of Michigan Press.

10. Tian, S., Luo, X., Ren, L., & Xiao, C. (2021). Active steering control strategy for rail vehicle based on minimum wear number. *Vehicle System Dynamics*, 59(8), 1256-1281.

11. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Боднар М. Ф. (2019) Оцінка тягово-швидкісних характеристик військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям методами імітаційного моделювання. *Weapons and military equipment*, 3(23)/2019, 46-62.

12. Чуприна, В. М. (2019). Моделювання капсули бронев автомобіля для оцінки міцності при випробуваннях. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 2(2), 158-165.

13. Цмоць, І. Г., Теслюк, В. В., & Ваврук, І. Є. (2014). Архітектура та модель управління рухом мобільної робототехнічної системи. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Інформаційні системи та мережі*, (783), 242-251.

14. Kokhan, V. (2023). Методологічний підхід до вибору військової автомобільної техніки. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, (27), 89-95.

15. Heesik Jang et al. "A Review : Technological Trends and Development Direction of Pipeline Robot Systems". In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (2022), pp. 1– 20. issn: 1573-0409. doi: 10.1007/s10846-022-01669-2. url: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01669-2>

16. TReX Jr. Dual-Motor Controller <https://www.pololu.com/product/767>

17. Невлюдов І. Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 240 с.

18. Salman, N. D., Pillinger, G., Hanon, M. M., & Kiss, P. (2020). Design and performance evaluation of bevameter equipment. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 14(6), JAMDSM0084-JAMDSM0084.

18. Becker, F., Minchenya, V., Zeidis, I., & Zimmermann, K. (2021, September). Modeling and dynamical simulation of vibration-driven robots. In *56th Internat. Scientific Colloquium Innovation in Mechanical Engineering: Shaping the Future*.