

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація такокомп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Шигері Володимир Олександровичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Комп'ютерно-інтегрована система керування колісним роботом/ Computer-integrated wheel robot control system

затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз технологічних процесів на об'єкті управління та характеристик колісних роботизованих систем.

1.1. Дослідження сучасних тенденцій розвитку та еволюції колісних роботизованих платформ.

1.2. Аналіз принципів побудови та функціонування автоматизованих систем керування колісними роботами.

2. Засоби автоматизованого контролю та регулювання параметрів руху колісного робота.

2.1. Аналіз технічних характеристик та функціональних можливостей сучасних колісних роботів.

2.2. Дослідження апаратних засобів системи керування наземним колісним роботизованим комплексом.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку колісних роботизованих систем та визначити перспективні напрями їх застосування.

2. Дослідити принципи побудови автоматизованих систем керування колісними роботами та оцінити особливості їх функціонування.

3. Виконати аналіз конструктивних рішень шасі та технічних засобів системи керування колісним роботом.

4. Розробити алгоритм керування рухом колісного робота та систему управління приводами.

5. Реалізувати математичну та імітаційну модель системи управління у середовищі MATLAB/Simulink.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Simulink модель колісного робота

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОБ'ЄКТІ УПРАВЛІННЯ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ	01.12.2025-15.01.2026	виконано
2	ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОЛІСНОГО РОБОТА	16.01.2026-15.03.2026	виконано
3	РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ	16.03.2026-30.04.2026	виконано
4.	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026-25.05.2026	виконано

Студент

Володимир ШИГЕРА

(підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доц. Петро ГУМЕННИЙ

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Шигера В.О. Комп'ютерно-інтегрована система керування колісним роботом/. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено комп'ютерно-інтегровану систему керування колісним роботом. Досліджено принципи побудови модульної архітектури колісних роботів. Проаналізовано сучасні підходи та компоненти для реалізації система керування колісним роботом.

ABSTRACT

Shyhera V.O. Computer-integrated control system for a wheeled robot/. – Manuscript.

Thesis for obtaining a Bachelor's degree in specialty 174 “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics,” educational and professional program “Automation and Computer-Integrated Technologies” – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work presents the development of a computer-integrated control system for a wheeled robot. The principles of designing a modular architecture of wheeled robots are investigated. Modern approaches and components for implementing a control system for a wheeled robot are analyzed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОБ’ЄКТІ УПРАВЛІННЯ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	12
1.1 Дослідження глобальних тенденції еволюції розвитку колісних роботизованих систем.....	12
1.2 Дослідження автоматизованої системи керування колісним роботом.....	18
1.3 Аналіз типів шасі колісних роботизованих платформ.....	26
2. 2. ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОЛІСНОГО РОБОТА.....	38
2.1 Аналіз технічних характеристик колісних роботів.....	38
2.2 Апаратні засоби системи керування наземним колісним роботизованим комплексом.....	44
2.3 Інформаційно-вимірювальні компоненти системи управління колісним роботом.....	56
3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ.....	63
3.1 Реалізація системи управління станом коліс та двигунами робота.....	63
3.2 Реалізація Matlab-Simulink системи управління та моделі колісного робота	69

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Шигера В.			Комп’ютерно- інтегрована система керування колісним	Літ.	Арк.
Перевір.		Гуменний П.В.					6
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42 ₄	
Н. Контр.		Заставний О.					
Затверд.		Сегін А.І.					

3.3 Моделювання та оцінка ефективності системи управління колісним роботом в умовах радіоперешкод високої інтенсивності.....	78
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95
Додаток А.....	99

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ –автоматизована система управління

МК – мікроконтролер

МР –мобільний робото

ТЦМ- точка центру маси

ТПЦМ- точка положення центру маси

СУ-система управління

АЦП- аналого-цифровий перетворювач

СТЗ- системи технічного зору

ІВК- інформаційно-вимірювальні компоненти

ШІМ- широтно-імпульсна модуляція

					ДП.АКТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток робототехніки характеризується стрімким зростанням попиту на автономні мобільні платформи, здатні виконувати широкий спектр завдань в умовах, небезпечних або недоступних для людини. В умовах повномасштабного вторгнення Російської Федерації на територію України, що розпочалося у лютому 2022 року, питання розробки та впровадження колісних роботизованих платформ набуло особливої стратегічної ваги. Досвід бойових дій переконливо демонструє, що автономні наземні роботи здатні суттєво знизити втрати особового складу, виконуючи завдання розвідки, розмінування, евакуації поранених, логістичного забезпечення та вогневої підтримки в зонах активних бойових дій.

Разом із тим, колісні роботи знаходять широке застосування і в цивільній сфері: при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, моніторингу критичної інфраструктури, охороні об'єктів, патрулюванні периметрів, а також у промисловості, сільському господарстві та медицині. Таким чином, розробка надійних, керованих і адаптивних колісних роботів є завданням подвійного призначення, що відповідає як нагальним оборонним потребам держави, так і перспективам повоєнного відновлення економіки України.

Ефективне функціонування колісних роботів неможливе без розробки сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем керування, які забезпечують автономність руху, точність маніпуляцій, стабільність роботи в умовах перешкод та надійну взаємодію з оператором. Впровадження таких систем потребує інтеграції методів теорії автоматичного керування, мікропроцесорних технологій, сенсорики та алгоритмів реального часу.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування колісного робота шляхом розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що забезпечує автономне та дистанційне виконання заданих завдань в умовах реального середовища.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдання кваліфікаційної роботи. Для досягнення поставленої мети у дипломній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку галузі мобільної робототехніки, зокрема колісних роботизованих платформ, а також визначити основні напрями їх застосування.
2. Дослідити існуючі типи шасі колісних роботів (differential drive, skid-steer, Ackermann, omnidirectional та гібридні платформи), проаналізувати їх конструктивні особливості, переваги та недоліки.
3. Виконати аналіз основних компонентів автоматизованої системи керування колісним роботом, зокрема апаратного забезпечення (сенсори, виконавчі механізми, обчислювальні модулі, системи зв'язку) та програмного забезпечення (алгоритми навігації, керування та обробки даних).
4. Розробити алгоритм керування рухом колісного робота з урахуванням обраної структури системи керування та типу платформи.
5. Реалізувати математичну модель руху колісного робота та на її основі створити імітаційну модель у середовищі MATLAB для дослідження динаміки та ефективності запропонованого алгоритму керування.
6. Провести аналіз результатів моделювання та оцінити ефективність розробленої системи керування за впливом до завад.

Об'єкт дослідження – процеси керування рухом і поведінкою колісного робота в статичних та динамічних умовах експлуатації.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби комп'ютерно-інтегрованого керування колісними роботизованими платформами.

Методи дослідження. У роботі використовуються методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання динаміки руху, а також методи розробки вбудованого програмного забезпечення для мікроконтролерних систем. Проведено огляд сучасних наукових джерел і технічних рішень у сфері робототехніки та систем керування рухомими платформами.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система керування може бути використана при проектуванні колісних роботизованих платформ як для цивільних, так і для оборонних застосувань. Запропоновані структурні рішення та алгоритми сприяють підвищенню автономності, надійності та точності функціонування робота, а також можуть слугувати основою для подальших досліджень у галузі мобільної робототехніки.

Апробація. / Шигера В.О. Комп'ютерно-інтегрована система керування колісним роботом/ В.О. Шигера, С.І. Миронюк, П.В. Гуменний // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. с.111-117.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОБ'ЄКТІ УПРАВЛІННЯ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Дослідження глобальних тенденції еволюції розвитку колісних роботизованих систем

Безпілотні наземні транспортні засоби (UGV — Unmanned Ground Vehicles), зокрема платформи колісного типу, належать до найбільш інтенсивно розвиваних напрямів сучасної робототехніки. Упродовж останніх років ця сфера пройшла етап глибокої трансформації: від експериментальних розробок у лабораторіях до серійного виробництва та практичного використання як у цивільних, так і у військових цілях.

За оцінками «аналітичних агентств, обсяг світового ринку UGV у 2023 році становив понад 3 млрд доларів США, а до 2032 року прогнозується його зростання більш ніж удвічі (рисунок 1.1). Основними чинниками такого розвитку є збільшення фінансування оборонного сектору, а також активне впровадження автоматизованих рішень у промисловості, логістиці та інфраструктурних системах» [1].

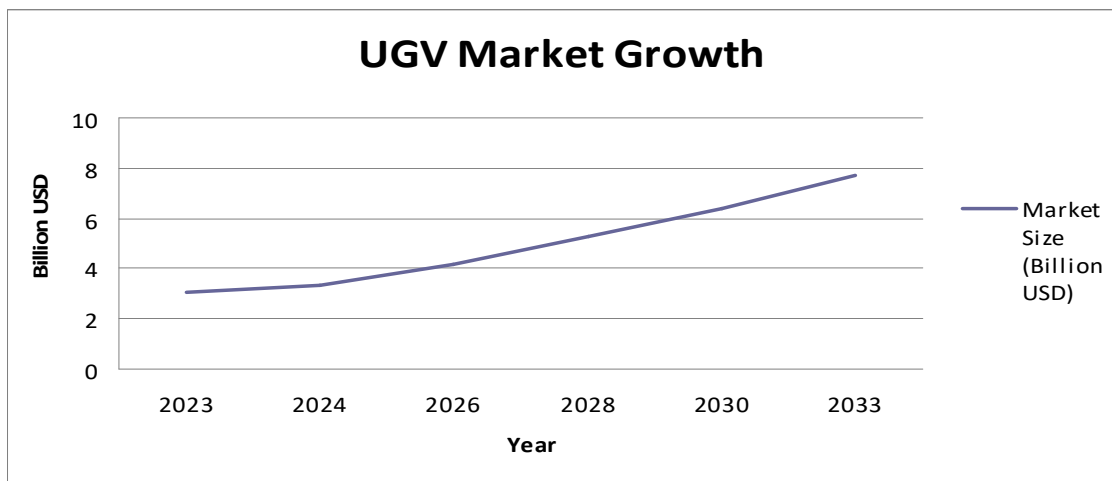


Рисунок 1.1- Графік росту інвестицій у сферу розвитку колісних роботів

Серед різних типів платформ саме колісні системи займають провідні позиції. Це пояснюється їх конструктивною простотою, підвищеною енергоефективністю та нижчими витратами на експлуатацію. Крім того, вони демонструють високу швидкість руху на твердих і напівтвердих поверхнях, що

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

робить їх оптимальними для міських умов, логістики «останньої милі» та патрульних задач.

З точки зору керування, найбільш поширеними залишаються дистанційно керовані рішення, що забезпечують безпечне виконання завдань у небезпечних середовищах. Водночас автономні системи демонструють найдинамічніші темпи розвитку. Це пов'язано з прогресом у сфері штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорної інтеграції, що дозволяє роботам самостійно орієнтуватися, ухилятися від перешкод і приймати рішення в реальному часі.

Світовий ринок представлений низкою «провідних компаній, серед яких Northrop Grumman, Lockheed Martin, BAE Systems, Rheinmetall, Milrem Robotics, QinetiQ, Elbit Systems та Israel Aerospace Industries. Останніми роками ці виробники презентують системи з високим рівнем автономності, здатні виконувати складні завдання — від патрулювання до координації групових роботизованих операцій. Географічно найбільшу частку ринку утримує Північна Америка» [2].

У цивільному секторі застосування колісних роботів також стрімко розширюється. Найбільша «концентрація використання колісних роботів спостерігається у сфері логістики та складських операцій, що обумовлено високим рівнем автоматизації процесів та стрімким розвитком електронної комерції (рисунк 1.2). Водночас значний потенціал зростання демонструють сегменти автономної доставки та сервісної робототехніки, де впровадження штучного інтелекту забезпечує підвищення рівня автономності та адаптивності роботизованих систем» [3].

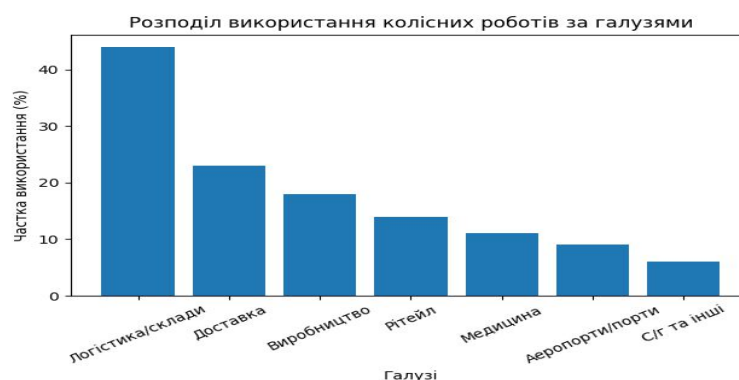


Рисунок 1.2-Цивільна сфера застосування колісних роботів

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Повномасштабна війна в Україні, що розпочалася у 2022 році, суттєво прискорила розвиток наземної робототехніки. Уперше в історії спостерігається настільки масштабне застосування UGV у реальних бойових умовах високої інтенсивності.

Ключовим фактором, який стимулював їх масове використання, стало широке впровадження безпілотних літальних апаратів, зокрема FPV-дронів. Це призвело до різкого підвищення ризиків для особового складу на передовій. У таких умовах застосування наземних роботів стало ефективною альтернативою участі людей у небезпечних операціях.

У сучасній російсько-українській війні 2023–2024 років було зафіксовано перехід від експериментального до системного застосування наземних безпілотних платформ (UGV). Особливо показовими стали бої за Авдіївку, де обидві сторони активно використовували роботизовані комплекси для виконання логістичних, розвідувальних та бойових задач. Дослідники відзначають, що ця битва стала одним із перших випадків, коли UGV відігравали помітну оперативну роль на полі бою. Аналіз розвитку наземних роботизованих систем у Збройних Силах України свідчить про надзвичайно швидке зростання цього сегмента упродовж 2023–2025 років.

У 2023 році застосування UGV перебувало на початковому етапі становлення. У військових підрозділах використовувалося лише близько 13 моделей наземних роботизованих платформ, більшість із яких виконували обмежене коло завдань, переважно логістичного та розвідувального характеру. Їх використання мало експериментальний характер, а інтеграція у бойові процеси ще не була системною.

Уже у 2024 році відбулося різке зростання кількості таких систем - до приблизно 60 моделей. Це пов'язано із накопиченням практичного бойового досвіду, активним залученням приватних розробників та стартапів, а також усвідомленням високої ефективності UGV у сучасних умовах ведення бойових дій. На цьому етапі наземні роботи почали виконувати ширший спектр задач, включаючи доставку боєприпасів, евакуацію поранених, інженерні роботи та

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

навіть вогневу підтримку.

У 2025 році спостерігається подальше масштабування - кількість моделей перевищує 100 одиниць, що свідчить про формування повноцінного напрямку військової робототехніки. Наземні роботизовані комплекси інтегруються у структуру підрозділів, створюються спеціалізовані підрозділи операторів UGV, а також відбувається стандартизація та уніфікація рішень (рисунок 1.3).

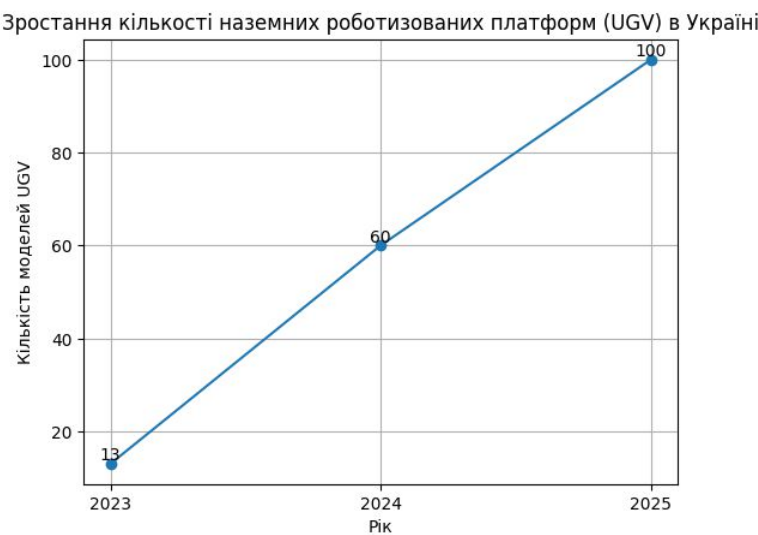


Рисунок 1.3- Графік зростання кількості колісних роботизованих платформ в Українському війську

Ключовим фактором такого стрімкого розвитку став практичний бойовий досвід, отриманий під час інтенсивних боїв за Авдіївку у 2023–2024 роках. Саме в цих умовах було доведено ефективність використання наземних роботизованих систем у ситуаціях підвищеного ризику для особового складу, зокрема для виконання логістичних операцій під вогнем противника та евакуації поранених. Отримані результати стали каталізатором масштабного впровадження UGV та стимулювали як державні, так і приватні ініціативи у сфері розробки таких систем.

Подальшим етапом розвитку стало проведення у 2024 році комплексної безпілотної операції із залученням різних типів роботизованих систем — повітряних, наземних та ударних платформ. Такий підхід продемонстрував можливість інтеграції різномірних роботів у єдину тактичну систему.

На сьогодні UGV виконують широкий спектр завдань: транспортування

вантажів, евакуацію поранених, інженерні роботи, розвідку та вогневу підтримку (рисуюнок 1.4). У деяких підрозділах значна частина логістичних операцій уже здійснюється за допомогою роботів, що суттєво знижує ризики для військових.



Рисуюнок 1.4- Застосування роботизованих колісних платформ у війську

Окремо варто відзначити зміну ролі людини у бойових діях. Очікується, що подальше впровадження роботизованих систем дозволить значно скоротити потребу у живій силі на передовій. Водночас зберігається принцип контролю людини над застосуванням зброї.

Зростання попиту на роботизовані системи спричинило стрімкий розвиток українського виробництва UGV. Вітчизняні підприємства забезпечують переважну більшість таких систем, створюючи сотні моделей для різних задач.

Станом на 2024–2025 роки в Україні сформувалася розгалужена екосистема розробників наземних роботизованих комплексів, яка налічує понад 200 компаній. Водночас кількість безпосередніх виробників колісних роботизованих платформ оцінюється у десятки підприємств, що активно створюють і тестують нові рішення. За експертними оцінками, загальна кількість розроблених українських UGV може становити від 150 до 300 моделей, з яких понад 100 вже інтегровані у Збройні Сили України. Така динаміка пояснюється високим рівнем децентралізації розробок, швидким

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

циклом інновацій та безпосереднім впливом бойового досвіду на вдосконалення платформ.

Серед найбільш відомих рішень можна виділити бойові платформи, логістичні комплекси та спеціалізовані системи для розмінування. Наприклад, існують універсальні роботи для транспортування вантажів, ударні платформи з озброєнням (рисунок 1.5), а також інженерні системи для очищення територій від вибухонебезпечних предметів.



Рисунок 1.5- Колісний безпілотний транспортний засіб (з дистанційним управлінням башнею кулеметом)

Особливістю українських розробок є їх відносно низька вартість при збереженні високої ефективності. Це дозволяє масово застосовувати такі системи навіть у складних умовах бойових дій.

Окремі компанії демонструють значні виробничі обсяги, виготовляючи тисячі роботів щороку та плануючи подальше масштабування. Загальна кількість виконаних місій за участю UGV постійно зростає, що підтверджує їх ефективність.

Важливим напрямом є інтеграція технологій штучного інтелекту. Сучасні українські платформи оснащуються системами розпізнавання цілей, аналізу середовища та підтримки оператора. При цьому зберігається концепція «людина в контурі», яка передбачає, що рішення про застосування сили приймається оператором.

Український досвід вже викликає значний інтерес на міжнародному рівні. Відбувається співпраця з іноземними партнерами, а також розглядаються можливості експорту технологій.

Таким чином, Україна за короткий період сформувала потужний сектор розробки наземних роботизованих систем і фактично стала одним із центрів інновацій у цій галузі. Це створює підґрунтя для подальших досліджень і розробки сучасних систем керування колісними роботами, здатних ефективно функціонувати як у військових, так і у цивільних умовах.

1.2 Дослідження автоматизованої системи керування колісним роботом

Автоматизовані системи керування мобільними роботами є складними кіберфізичними комплексами, що інтегрують апаратні обчислювальні платформи, виконавчі механізми, сенсорні підсистеми та програмне забезпечення реального часу. Розроблення та дослідження таких систем потребує системного підходу, що охоплює аналіз архітектурних рішень, протоколів обміну даними, алгоритмів керування та засобів людино-машинної взаємодії.

Колісний робот як «об'єкт керування відрізняється від маніпуляційних та стаціонарних роботизованих систем тим, що його переміщення у просторі є невід'ємною частиною виконуваної задачі. Це висуває специфічні вимоги до системи керування: забезпечення стабільності руху на різномірних поверхнях, реалізація навігаційних алгоритмів, інтеграція з системами технічного зору та дистанційного управління» [5].

Автоматизована система керування (АСК) колісним роботом будується за ієрархічним принципом (рисунк 1.6) , де кожен рівень ієрархії відповідає за певний функціональний клас задач. Трирівнева архітектура, прийнята в сучасних мобільних роботичних платформах, забезпечує чіткий розподіл відповідальності між підсистемами та спрощує масштабування функціоналу.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На нижньому рівні - рівні виконавчих пристроїв - зосереджені контролери двигунів, схеми живлення та периферійні інтерфейсні модулі. Середній рівень охоплює мікроконтролерні та мікропроцесорні обчислювальні вузли, що реалізують алгоритми замкненого контуру керування та первинну обробку даних. Верхній рівень формує цільову поведінку системи: виконує планування маршруту, обробляє команди оператора та приймає рішення на основі ситуаційної моделі середовища.



Рисунок 1.6- Автоматизована система кервання колісним роботом

Взаємодія між рівнями здійснюється через стандартизовані інтерфейси та протоколи, що дозволяє замінювати окремі модулі без перепроєктування всієї системи. Така архітектура відповідає принципу «розділення обчислень та комунікацій», що є фундаментальним у проектуванні розподілених кіберфізичних систем (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 — Ієрархія рівнів системи керування колісним роботом

Рівень	Функції	Типові компоненти	Час реакції
Нижній (виконавчий)	Керування двигунами, ШІМ-модуляція	STM32, L298N, MOSFET	< 1 мс
Середній (регулювання)	PID-контури, ОЗД, первинна фільтрація	ESP32, Raspberry Pi CM4	1–10 мс
Верхній (прийняття рішень)	Навігація, планування, HMI	Jetson Nano, NVIDIA AGX	10–500 мс

Центральним елементом апаратної частини АСК є обчислювальна платформа, вибір якої визначає обчислювальні можливості, енергоспоживання та придатність до виконання задач реального часу. В сучасних мобільних роботах застосовують двоконтурну схему обчислення: швидкодіючий мікроконтролер реального часу (MCU) для низькорівневого керування та більш потужний одноплатний комп'ютер (SBC) для задач штучного інтелекту та навігації.

Мікроконтролер серії «STM32F407 від STMicroelectronics є одним із найпоширеніших рішень для реалізації регуляторів нижнього рівня. Ядро ARM Cortex-M4 з частотою до 168 МГц, вбудований модуль DSP та блок FPU (floating-point unit) дозволяють виконувати обчислення PID-регулятора та фільтрацію сигналів датчиків за часові інтервали менше 100 мкс. Наявність апаратних таймерів і модулів ШІМ (Pulse Width Modulation) з роздільною здатністю 16 біт забезпечує точне формування керуючих сигналів для драйверів двигунів» [8].



Рисунок 1.6- Мікроконтролер серії STM32F407 від STMicroelectronics

Для задач вищого рівня — обробки даних камер, виконання нейронних мереж виявлення об'єктів та роботи з ROS (Robot Operating System) - оптимальним є використання платформи NVIDIA Jetson Nano або Raspberry Pi 4 Model B. Перша забезпечує апаратне прискорення тензорних обчислень за рахунок інтегрованого GPU з 128 CUDA-ядрами; друга пропонує більш

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

доступне рішення з процесором ARM Cortex-A72 і достатньою продуктивністю для більшості навігаційних задач.

Двигуни постійного струму (DC) типу JGA25-370 (рисунок 1.10) або «аналогічні з редуктором і вбудованими квадратурними енкодерами є стандартним рішенням для навчальних та дослідницьких платформ. Наявність енкодерів дозволяє реалізувати замкнений контур керування швидкістю та положенням кожного колеса незалежно. Роздільна здатність типових енкодерів складає 11–330 імпульсів на оберт вала двигуна до редуктора, що після множення на коефіцієнт редукції забезпечує достатню точність вимірювання переміщення» [9].



Рисунок 1.10- Двигуни постійного струму

Система живлення будується на основі літій-полімерних (LiPo) або літій-іонних (Li-Ion) акумуляторів. Для захисту від перерозряду, перезаряду та короткого замикання застосовують модулі BMS (Battery Management System). Стабілізація напруги живлення для чутливої електроніки забезпечується DC/DC-перетворювачами типу buck/boost з вихідними напругами 5 В, 3.3 В та при необхідності 12 В.

Таблиця 1.2 — Порівняльна характеристика основних апаратних компонентів

Компонент	Модель / тип	Ключові параметри
Мікроконтролер (MCU)	STM32F446RE	168 МГц, Cortex-M4, FPU, 12-бит АЦП
Одноплатний комп'ютер	Raspberry Pi 4B / Jetson Nano	4× Cortex-A72 / 128 CUDA cores
Драйвер двигунів	L298N / BTS7960	2 А / 43 А, ШІМ-керування, захист
Двигун з редуктором	JGA25-370, DC 12 В	Енкодер 330 CPR, редукція 1:30

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Компонент	Модель / тип	Ключові параметри
Акумулятор	LiPo 3S, 5000 мАг	11.1 В, 30С, ємність 55.5 Вт·год
Модуль BMS	TP4056 / DW01A+	Захист перерозряду, балансування
DC/DC-перетворювач	LM2596 / XL4016	Вхід 4–40 В, вихід 1.25–37 В

Сенсорне забезпечення колісного робота формує інформаційну базу для реалізації автономної навігації та оцінки стану навколишнього середовища. Залежно від функціональних вимог до платформи застосовують різні типи датчиків, кожен з яких забезпечує інформацію певного фізичного характеру.

Інерціальний вимірювальний модуль «(IMU) на основі мікросхем MPU-6050 або ICM-42688-P містить тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп. Дані IMU використовуються для оцінки кутової орієнтації робота (крен, тангаж, рискання), компенсації ковзання коліс та реалізації алгоритму одометрії. Для підвищення точності застосовують злиття даних IMU та колісних енкадерів методом розширеного фільтра Калмана» [10].



Рисунок 1.10- MPU-6050

Ультразвукові «далекоміри типу HC-SR04 забезпечують вимірювання відстані в діапазоні 2–400 см з точністю ± 3 мм і дозволяють реалізувати базове уникнення перешкод. Інфрачервоні датчики відстані Sharp GP2Y0A21YK0F охоплюють діапазон 10–80 см та мають аналоговий вихід, що спрощує їх інтеграцію в систему збору даних через АЦП мікроконтролера.

Лідарні сенсори типу RPLIDAR A1 або YDLiDAR TG30 формують двовимірну карту(рисунок 1.11) оточення у форматі хмари точок, що є основою для алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Сканування здійснюється з частотою 5–15 Гц та охоплює кут 360°, забезпечуючи роздільну здатність по відстані до 1 мм. Ці дані є критично важливими для точної локалізації та побудови карти приміщення» [11].



Рисунок 1.11 - Побудова двовимірної карти сенсорами RPLIDAR A1

Внутрішня комунікаційна інфраструктура системи керування базується на промислових та вбудованих послідовних інтерфейсах, стандартизованих для застосування в мікроелектроніці. Вибір протоколу для конкретного з'єднання визначається вимогами до пропускної спроможності, довжини лінії зв'язку, кількості пристроїв та допустимої затримки.

Основу системи регулювання руху колісного робота складає ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний), реалізований для кожного колеса окремо. Завдяки незалежному замкненому контуру керування швидкістю кожного колеса система компенсує механічні відмінності між двигунами та нерівномірність дорожнього покриття.

Математична модель ПІД-регулятора у дискретному часі описується рівнянням:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \cdot \sum e(i) + K_d \cdot (e(k) - e(k-1)) / T$$

де $u(k)$ — керуючий вплив на k -му кроці;

$e(k)$ — відхилення поточного значення від заданого;

K_p , K_i , K_d — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових;

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

T — період дискретизації.

Для підвищення якості керування застосовують модифікований ПД з обмеженням інтегральної складової (anti-windup) та фільтрацією диференційної складової. Це запобігає накопиченню інтегральної помилки при насиченні виконавчих механізмів та зменшує чутливість до шумів вимірювального тракту.

Метод каскадного керування поєднує зовнішній контур регулювання положення з внутрішнім контуром регулювання швидкості. Зовнішній контур обчислює завдання для внутрішнього за меншою частотою (10–50 Гц), тоді як внутрішній виконується з частотою 500–1000 Гц. Така схема підвищує точність позиціонування та забезпечує плавність руху.

Навігаційна підсистема забезпечує визначення положення та орієнтації робота в просторі, а також планування оптимальної траєкторії до цільової точки. Вирішення задачі локалізації здійснюється методами одометрії, сенсорного злиття та алгоритмами SLAM.

Одометрія на основі даних колісних енкодерів є найпростішим методом оцінки положення, однак має обмеження через накопичення похибки в часі внаслідок ковзання коліс та числових похибок інтегрування. Для компенсації систематичних похибок застосовують методи калібрування бази колії та радіуса коліс.

Дослідження АСК колісного робота виявляє комплекс взаємопов'язаних характеристик, які визначають загальну ефективність та практичну придатність системи. Розуміння цих характеристик є необхідним для прийняття обґрунтованих проектних рішень та оцінки придатності системи до конкретних застосувань.

Час реакції системи на зовнішні події визначається сукупністю затримок у комунікаційному ланцюгу: час обробки сенсорних даних, затримка протоколу зв'язку та час виконання регулятора. При типових конфігураціях загальна затримка від отримання сигналу небезпеки (наприклад, від ультразвукового давача) до зупинки рушійного механізму не перевищує 15–30 мс, що є

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достатнім для більшості застосувань у контрольованих середовищах.

Енергетична автономність платформи визначається місткістю акумулятора та споживанням всіх підсистем. Потужність рушійних двигунів складає основну частку енергетичного бюджету: при середньому навантаженні 2–4 А на двигун та напрузі живлення 12 В споживана потужність сягає 48–96 Вт. Акумулятор ємністю 5000 мАг забезпечує автономну роботу протягом 1–2 годин, що є типовим показником для навчально-дослідницьких платформ.

Масштабованість системи забезпечується модульністю її архітектури. Додавання нових сенсорів або виконавчих механізмів вимагає лише написання відповідного ROS 2 драйвера та його інтеграції в існуючий граф вузлів. Горизонтальне масштабування системи (розподіл обчислень між кількома роботами) реалізується засобами ROS 2 DDS без суттєвих змін програмного коду.

Сучасна АСК мобільного робота є багаторівневою ієрархічною системою, що інтегрує апаратні засоби трьох функціональних рівнів: виконавчого, регулювання та прийняття рішень. Кожен рівень характеризується специфічними вимогами до часу реакції та обчислювальних ресурсів, що обумовлює використання різних класів обчислювальних платформ — від спеціалізованих мікроконтролерів до потужних одноплатних комп'ютерів із апаратним прискоренням.

Комунікаційна інфраструктура системи будується на поєднанні провідних внутрішніх шин (I2C, SPI, UART, CAN) та безпроводних протоколів дистанційного керування (Wi-Fi, BLE, MQTT). Вибір конкретного протоколу визначається вимогами до пропускної спроможності, затримки та надійності передачі даних.

Алгоритмічний базис системи включає ПІД-регулятори для замкнених контурів керування двигунами, методи сенсорного злиття для підвищення точності одометрії, алгоритми SLAM для локалізації та картографування, а також планери траєкторій для автономного руху.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фреймворк ROS 2 є де-факто стандартом програмного середовища для мобільних роботичних систем, що забезпечує уніфіковані інструменти розробки, тестування та розгортання алгоритмів керування. Поєднання ROS 2 з симулятором Gazebo дозволяє верифікувати алгоритми в умовах, близьких до реальних, ще до їх впровадження на фізичному апараті.

Отримані результати аналізу є підґрунтям для подальшого проектування та реалізації конкретних підсистем розроблюваного колісного робота, що розглядається в наступних розділах дипломної роботи.

1.3 Аналіз типів шасі колісних роботизованих платформ

У проектуванні мобільних роботизованих систем шасі традиційно розглядається як несучий елемент конструкції. Кінематична схема шасі є первинним проектним рішенням, що визначає не лише механічні параметри платформи, але й архітектуру системи керування, методи сенсорної компенсації, алгоритми планування траєкторій і, зрештою, область застосування всього роботизованого комплексу. Глобальний «ринок шасі мобільних роботів демонструє стійке зростання: за даними аналітичних агентств, у 2023 році його обсяг становив близько 1,6 млрд доларів США, а до 2032 року очікується збільшення до 4,5 млрд доларів при середньорічному темпі зростання понад 11%. Сегмент колісних платформ є найбільшим і зростає зі швидкістю близько 8,3% на рік, що відображає їх домінуючу роль у логістиці, аграрному секторі, медицині та оборонній промисловості. Саме тому систематичне порівняння різних конфігурацій шасі є актуальним як з науково-теоретичної, так і з практично-інженерної точки зору» [12].

У сучасній «мобільній робототехніці сформувались п'ять основних класів колісних шасі, що відрізняються за кінематичним принципом: диференціальний привід, тангентальний привід зі ковзанням (Skid-Steer), рульовий механізм Акермана, всеспрямовані платформи на колесах Mecanum або Omni, а також гібридні конфігурації. Кожен із цих класів реалізує власний компроміс між

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

маневреністю, прохідністю, енергетичною ефективністю, точністю локалізації та складністю системи керування» [13].

Диференціальний привід (рисунок 1.12) є «найбільш поширеною кінематичною конфігурацією серед сучасних мобільних роботизованих платформ. Для диференційного типу приводу, що є найбільш поширеним у мобільних роботичних платформах, застосовують два або чотири незалежно керованих колеса (рисунок 1.9). Диференційне керування забезпечує можливість обертання на місці та реалізацію кривоолінійних траєкторій шляхом створення різниці лінійних швидкостей лівого та правого бортів.

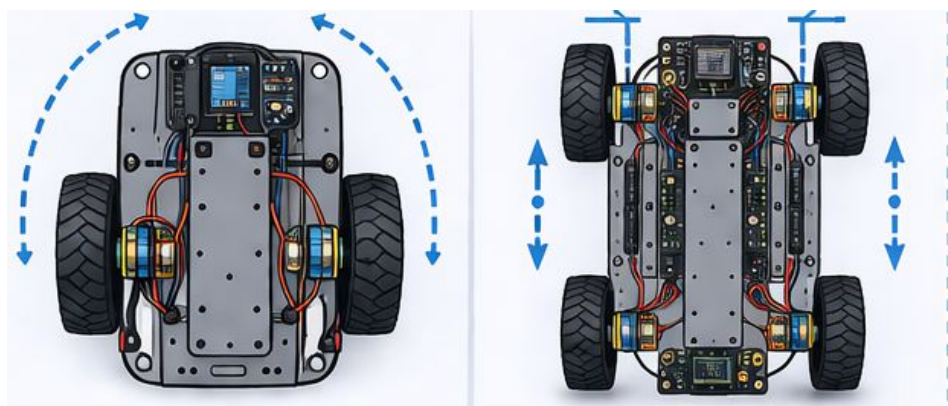


Рисунок 1.9- Диференційний тип приводу

Кінематика такої «платформи описується трьома ступенями свободи у площині: координатами центру маси (x, y) та кутом орієнтації θ . Вектор стану платформи $q = [x, y, \theta]^T$ змінюється відповідно до рівнянь руху, що пов'язують лінійну V та кутову ω швидкості з кутовими швидкостями правого $\dot{\varphi}_r$ і лівого $\dot{\varphi}_l$ коліс через радіус колеса R та відстань між колесами L : $V = R(\dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_l)/2$; $\omega = R(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l)/L$. Ця модель платформ не здатна миттєво рухатися в довільному напрямку без попередньої переорієнтації.

Одним із ключових достоїнств диференціального приводу є висока точність одометричної оцінки положення в короткостроковій перспективі. Проте одометрія характеризується властивістю накопичення похибок у часі (дрейфом), що обумовлено двома групами причин. До систематичних похибок належать: невідповідність ефективних діаметрів лівого і правого коліс, відхилення фактичної відстані між колесами від номінального значення, а також зміщення нульової точки енкодерів. Несистематичні похибки виникають

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

унаслідок локального прослизання коліс на ділянках низького зчеплення, а також дискретизації сигналів енкодерів. Для мінімізації систематичних похибок застосовується процедура калібрування кінематичних параметрів — зокрема, широко відомий метод UMBmark, що дозволяє підвищити точність одометрії щонайменше на порядок» [14].

Диференціальний привід є «оптимальним вибором для автономних мобільних роботів (AMR), що функціонують у структурованих закритих середовищах: складських комплексах, виробничих цехах і лікарняних коридорах. Серед відомих промислових реалізацій - платформи MiR (Mobile Industrial Robots), роботи серії Fetch Robotics (Zebra Technologies), а також значна частина дослідницьких платформ на базі ROS (TurtleBot, Jackal). Принциповим обмеженням є знижена стабільність при подоланні нерівностей: удар пасивного кастера об перешкоду призводить до нахилу платформи і зміни навантаження на привідні колеса, що спотворює одометрію. Крім того, конфігурація 2WD принципово не придатна для роботи на схилах із кутом понад 10–15° без застосування додаткової підвіски» [14].

Платформи типу «Skid-Steer (рисунок 1.13) являють собою логічне розширення диференціального принципу на конфігурацію з чотирма або більше колесами, розташованими на жорсткій рамі попарно з кожного боку.



Рисунок 1.13- Платформи типу Skid-Steer

Поворот здійснюється виключно за рахунок різниці обертальних швидкостей між лівими і правими бортами: при цьому колеса одного борту навмисно проковзують відносно поверхні, чим і пояснюється назва типу. Підвищена маса та жорстка база таких платформ - типовий UGV цього класу

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важить від 50 до кількох сотень кілограмів — забезпечують виключну стійкість і здатність долати перешкоди.

Механічна конструкція є відносно простою і надійною: відсутній рульовий механізм як такий, а кожна пара коліс на борту може бути з'єднана спільним ланцюговим або пасовим приводом від одного або двох двигунів. Для важких UGV застосовуються високомоментні двигуни постійного струму або гідромоторний привід, що забезпечують реалізацію значних тягових зусиль навіть на нестабільних ґрунтах.

Ковзання коліс при виконанні поворотів є не просто небажаним побічним ефектом, а фундаментальним кінематичним феноменом, що принципово відрізняє Skid-Steer від інших схем. Дослідження підтвердили, що для великогабаритних UGV (масою понад 200 кг) навіть незначне ковзання суттєво впливає на точність оцінки траєкторії: фактична ширина колії, виміряна через кінематику ковзання, може суттєво відрізнятись від геометричної ширини шасі. При цьому коефіцієнти ковзання всіх чотирьох коліс є динамічними — вони змінюються залежно від швидкості, радіусу повороту та характеристик підстилаючої поверхні» [15].

Геометрія «Акермана» (рисунок 1.14) запропонована на початку XIX ст., є однією з небагатьох конструктивних рішень у галузі транспортних засобів, що зберегла актуальність до нашого часу без принципових змін.

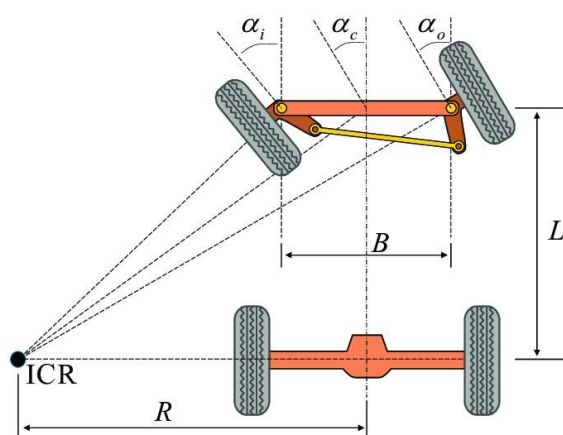


Рисунок 1.14- Геометрія Акермана

Сутність принципу полягає в тому, що при повороті внутрішнє і зовнішнє передні колеса повертаються на різні кути — таким чином, що перпендикуляри

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

до площин обертання всіх чотирьох коліс перетинаються в одній точці, яка називається миттєвим центром повороту (ICR). Ця умова забезпечує чисте кочення всіх коліс без будь-якого бокового ковзання, що є принциповою відмінністю від схеми Skid-Steer.

Практичним наслідком відсутності бокового ковзання є: мінімальні втрати потужності при повороті, суттєво менший знос покриття і, що найважливіше з навігаційної точки зору, висока відтворюваність траєкторії. Саме ця відтворюваність дозволяє з достатньою точністю будувати математичну модель руху і реалізовувати алгоритми планування траєкторій, характерні для автономних транспортних засобів» [16].

Принципово важливим обмеженням геометрії Акермана є наявність мінімального ненульового радіусу повороту, що визначається конструктивними параметрами рульового механізму та колісної бази. Ця властивість унеможливорює розворот на місці та суттєво ускладнює маневрування у замкнених просторах з характерним розміром, порівняним з мінімальним радіусом. З погляду теорії керування це означає, що платформа є неголономною системою з так званими «нестационарними обмеженнями», і для неї не існує прямого диференціального плануальника траєкторії — необхідно застосовувати методи нелінійного планування, такі як алгоритм Дубінса (Dubins paths) або Рідса-Шеппа (Reeds-Shepp paths), що враховують кривизну допустимих траєкторій.

Перевагу геометрії Акермана в задачах, де потрібна висока крейсерська швидкість і рух на великі дистанції по рівній поверхні, важко переоцінити. Саме ця схема лежить в основі практично всіх автономних колісних транспортних засобів: від науково-дослідних прототипів програми DARPA Grand Challenge до серійних рішень Waymo, Nuro та Tesla Autopilot. У сфері промислових UGV кінематика Акермана застосовується у великих логістичних платформах для зовнішніх складів і портових терміналів, де потрібно переміщувати вантажі масою від кількох тонн на відстані в сотні метрів при мінімальному енергоспоживанні.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Всеспрямовані платформи реалізують властивість, що у теорії мобільної робототехніки позначається терміном «голономність» система здатна здійснювати миттєве переміщення у будь-якому напрямку площини незалежно від поточної орієнтації корпусу. Ця властивість досягається шляхом використання спеціальних конструкцій коліс. Ролика на колесах встановлені під кутом 45° до площини обертання колеса, завдяки чому при обертанні колеса виникають два компоненти сили тяги: у напрямку руху колеса і перпендикулярно до нього.

Для реалізації довільного вектора швидкості платформи система керування комбінує напрямки і швидкості обертання чотирьох коліс, при цьому взаємне компенсування поперечних складових дозволяє генерувати результуючу тягу в будь-якому напрямку. Головною «перевагою Месанум-платформ є виняткова маневреність: здатність рухатися боком без переорієнтації, виконувати точне позиціонування відносно стаціонарних об'єктів (стелажів, зарядних станцій, маніпуляторів) та уникати реорієнтаційних маневрів при зміні напрямку руху. Саме ці властивості зробили Месанум стандартом для складських роботів класу AMR у сегменті «товари до людини»: компанія Locus Robotics, наприклад, оснащує свій Locus Vector колесами Месанум для роботи у вузьких складських проходах» [17].



Рисунок 1.15- Месанум-платформ

Разом з тим дослідження енергетичних характеристик Месанум-роботів виявили суттєву особливість: через постійне тертя між пасивними роликами і підлогою, а також косинусні втрати при перетворенні крутного моменту у тягову силу, енергоспоживання таких платформ помітно перевищує рівень класичних колісних систем при порівнянних вантажопідйомності і швидкості.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Надмірна чутливість продуктивності до якості підлоги є іншим системним недоліком: на нерівних або сміттєзасмічених поверхнях ролики можуть блокуватися або генерувати «стрибкоподібний» рух. Через точковий характер контакту Месапум-колеса з поверхнею несуча здатність системи і її прохідність поза рівними підлогами є суттєво обмеженими, що фактично унеможливорює застосування таких платформ поза структурованими виробничими чи складськими приміщеннями. Омні-колесо (рисунок 1.16) є «спрощеним варіантом з роликами, перпендикулярними до площини обертання, і зазвичай застосовується у тривісних конфігураціях.

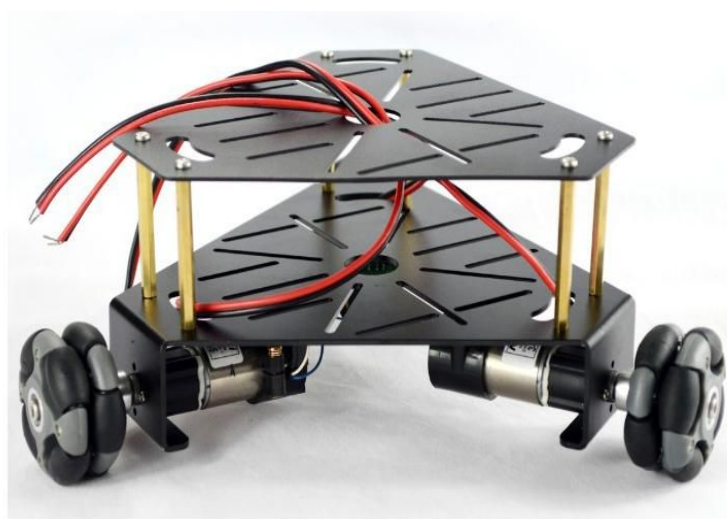


Рисунок 1.16- Омні-колесо

Гібридні конфігурації шасі виникли як відповідь на практичну неможливість досягнення всього спектру вимог у межах однієї кінематичної схеми. Розрізняють три основні підходи до гібридизації: (1) колісно-гусеничні системи, де гусеничні модулі можуть підніматися або опускатися залежно від рельєфу; (2) колісно-крокові системи (wheel-leg hybrid), де колеса встановлені безпосередньо на рухомих ногах; (3) зчленовані (articulated) шасі, де два або більше жорстких секцій з'єднані шарнірами, що мають один або кілька ступенів свободи.

Зчленоване шасі (рисунок 1.17) становить особливий інтерес для великих мобільних роботизованих платформ. На відміну від жорсткої рами, зчленована конструкція дозволяє кожній секції незалежно адаптуватися до локального рельєфу: кут між секціями регулюється гідравлічними або електромеханічними

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

актуаторами, що підтримують контакт усіх коліс з поверхнею навіть на нерівних ґрунтах. Цей підхід широко застосовується у гірничо-шахтному і будівельному обладнанні, а його переосмислення у контексті автономних UGV відкриває перспективи для великих роботів аграрного та логістичного призначення» [19].

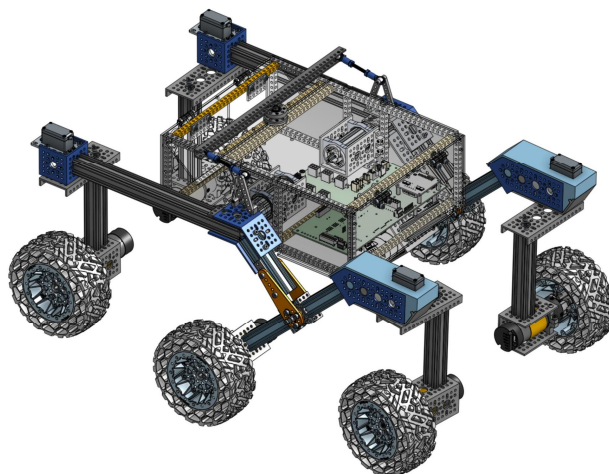


Рисунок 1.17- Зчленоване шасі

Колісно-крокові системи (рисунок 1.18) «представляють найбільш перспективний, але і найскладніший напрямок розвитку гібридних шасі. Концептуально вони реалізують ідею адаптивного перемикавання між режимами кочення (для рівних поверхонь, де колесо ефективніше ноги) і крокування (для подолання значних перешкод, сходинок і порогів).



Рисунок 1.18- Колісно-крокові системи

Практичні реалізації такого підходу пов'язані зі значним ускладненням як механічної конструкції, так і системи керування, оскільки необхідно реалізовувати динамічне перемикавання між принципово різними моделями руху. На сьогодні такі системи залишаються переважно у дослідницькій фазі, хоча

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окремі прототипи — наприклад, колісно-кроковий Ascento від ETH Zurich — демонструють реалістичність цього підходу» [20].

Для цілісного уявлення про відносні переваги і обмеження розглянутих конфігурацій у таблиці 2.1 наведено зведений порівняльний аналіз за вісьмома ключовими технічними критеріями. Оцінювання здійснювалось за якісною тришаговою шкалою (низький / середній / високий рівень), що дозволяє виявити системні закономірності при виборі типу шасі.

Таблиця 2.1 — Порівняльна характеристика основних типів шасі мобільних роботів

Критерій	Differential Drive	Skid-Steer	Ackermann	Mecanum/Omni	Гібридне
Маневреність у замкненому просторі	Висока	Висока	Низька	Максимальна	Середня
Прохідність на нерівних поверхнях	Низька	Висока	Середня	Дуже низька	Дуже висока
Крейсерська швидкість	Середня	Середня	Висока	Низька	Середня
Точність одометрії	Висока	Низька	Висока	Середня	Середня
Енергоефективність	Висока	Середня	Висока	Низька	Середня
Складність системи керування	Низька	Середня	Середня	Висока	Дуже висока
Механічна надійність	Висока	Висока	Середня	Середня	Низька
Вартість реалізації	Низька	Середня	Середня	Висока	Дуже висока

Аналіз таблиці 2.1 дозволяє виявити декілька системних закономірностей, що представлено на графіку рисунку 1.18. По-перше, жодна з конфігурацій не є домінуючою за всіма критеріями одночасно — це підтверджує фундаментальний характер проблеми вибору шасі як задачі багатокритеріальної оптимізації. По-друге, існує чіткий поділ між «легкими» платформами для структурованих середовищ (Differential і Mecanum) та «важкими» платформами для позаміських умов (Skid-Steer, Ackermann). По-

третє, підвищення універсальності (гібридні конфігурації) супроводжується суттєвим зростанням складності і вартості, що є основним фактором, що стримує їх поширення.

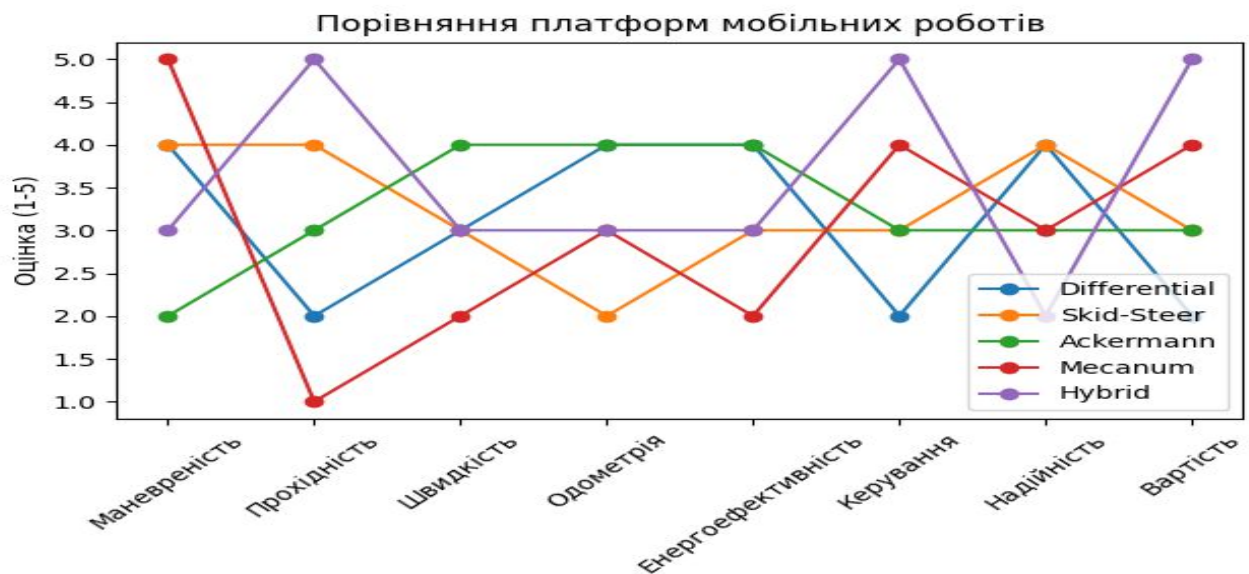


Рисунок 1.18- Порівняння платформ мобільних роботів

Тип шасі безпосередньо визначає математичний апарат, що лежить в основі системи керування. Для диференціального приводу пряма кінематична задача (перетворення швидкостей коліс у вектор швидкості центру платформи) і обернена задача (перетворення бажаної траєкторії у керуючі сигнали для моторів) вирішуються аналітично і є взаємооберненими, що значно спрощує синтез регуляторів. Кінематична модель таких систем є добре умовленою і придатна для застосування стандартних методів: ПІД-регулювання швидкостей коліс, моделюючого передбачного керування (MPC) та розширеного фільтра Калмана (EKF) для оцінки стану.

Для платформ Mecanum пряма кінематична задача також вирішується аналітично через матрицю Якобіана, що відображає вектор кутових швидкостей чотирьох коліс у вектор швидкостей платформи. Однак ця матриця є погано обумовленою при несиметричному розташуванні коліс або у разі їх часткового проковзування, що призводить до чутливості системи до похибок вимірювань. Для Skid-Steer стандартна кінематична модель є принципово неточною без обліку ефектів ковзання, і потребує розширення до динамічної моделі взаємодії

колеса з поверхнею, що описується тензором дотичних напружень (soil-tire shear stress model).

Водночас вибір шасі суттєво впливає на ефективність алгоритмів одночасної локалізації і картографування (SLAM). Для диференціального приводу стандартні реалізації SLAM (gmapping, Cartographer, RTAB-Map, Nav2) у рамках ROS 2 беруть одометрію як вхідний сигнал «з коробки», без додаткових адаптацій. Для Skid-Steer точність такої одометрії є недостатньою для замикання циклів у SLAM, і необхідна або апаратна надмірність (IMU), або програмна компенсація ковзання на основі моделей взаємодії колеса з ґрунтом. Для Mecanum-платформ надійна робота SLAM потребує строгої калібрування матриці Якобіана і регулярного перекалібрування у разі зносу роликів.

Фреймворк ROS 2 (Robot Operating System 2) надає стандартизовані контролери для всіх основних кінематичних схем у пакеті `ros2_control`: `diff_drive_controller` - для диференціального приводу, `ackermann_steering_controller` - для платформ Акермана, `mecanum_drive_controller` - для Mecanum. Наявність стандартизованих контролерів суттєво скорочує час розробки програмного забезпечення, однак не усуває принципових відмінностей у складності налаштування та вимогах до сенсорного оснащення, які визначаються фізикою конкретної кінематичної схеми.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати системні рекомендації щодо вибору типу шасі залежно від вимог до платформи. Для роботи у структурованих закритих середовищах — складах, виробничих цехах, офісах і медичних установах — з вантажопідйомністю до 200–300 кг і швидкістю до 2 м/с оптимальним вибором залишається диференціальний привід. Він забезпечує необхідний баланс між маневреністю, точністю позиціонування та вартістю реалізації, а велика екосистема готових програмних рішень (ROS 2, Nav2) суттєво скорочує час виведення продукту на ринок.

Якщо завдання потребує точного бокового позиціонування в умовах вузьких проходів або динамічного середовища з людьми (наприклад, роботи

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для підбору замовлень у фулфілмент-центрах), слід розглядати Mecanum-платформи, приймаючи до уваги підвищене енергоспоживання і необхідність якісного покриття підлоги. При проектуванні великих мобільних платформ для роботи поза приміщеннями — агробот для обробки полів, патрульний UGV, роботизований носій обладнання — схема Skid-Steer є природним вибором завдяки прохідності і надійності, але проект повинен закладати обов'язкову сенсорну компенсацію ковзання з першого кроку. Нарешті, для високошвидкісних транспортних роботів, що рухаються маршрутами на значні відстані — наприклад, автоматизовані транспортні засоби портів або логістичних хабів — перевагу слід надавати кінематиці Акермана або її гібриду з активним заднім рульовим управлінням.

У результаті проведеного системного аналізу основних типів шасі мобільних роботизованих платформ встановлено таке. Конфігурація шасі є первинним проектним рішенням, що формує всі ключові характеристики мобільного робота - від механічної прохідності до архітектури системи керування. По-друге, кожна з розглянутих схем оптимізована для власного класу операційних умов і не може бути вважати «кращою» у загальному сенсі — лише в контексті конкретних вимог до застосування.

Між типом шасі і методами навігації існує глибокий взаємозв'язок: рівень точності одометрії, вибір алгоритму SLAM і склад сенсорного оснащення безпосередньо визначаються кінематичною схемою. У сегменті великих UGV домінуючими є схеми Skid-Steer і Ackermann, тоді як диференціальний привід і Mecanum є домінуючими для компактних платформ в умовах структурованого середовища. Нарешті, гібридні конфігурації, незважаючи на теоретичну привабливість, залишаються рішеннями для спеціалізованих застосувань через суттєво вищу вартість і складність, що обмежує їх масове поширення у найближчій перспективі.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОЛІСНОГО РОБОТА

2.1 Аналіз технічних характеристик колісних роботів

Більшість сучасних автоматизованих колісних платформ побудована за модульним принципом і здатна виконувати кілька функцій залежно від встановленого корисного навантаження. Це суттєво підвищує коефіцієнт використання кожної одиниці техніки та спрощує логістику запасних частин і агрегатів. На сьогоднішній день «провідними виробниками військових колісних роботів, що застосовуються у військовій сфері є компанії Milrem Robotics (Естонія), Textron Systems / Howe & Howe (США), ARX Robotics (Німеччина), Roboteam (Ізраїль), а також понад 280 українських підприємств, що сформували найбільш динамічний у світі ринок бойових наземних дронів» [20].

Гусенична «роботизована платформа THeMIS (рисунок 2.1), розроблена компанією Milrem Robotics, є найпоширенішим військовим БНТЗ у світі — станом на початок 2026 року її використовують 19 держав, з яких вісім є членами НАТО: Естонія, Франція, Німеччина, Нідерланди, Норвегія, Іспанія, Велика Британія та США.



Рисунок 2.1- Гусенична роботизована платформа THeMIS

Конструктивно THeMIS побудований на симетричному гусеничному шасі з центральним вантажним відсіком. Відкрита архітектура платформа дозволяє протягом кількох годин змінювати функціональне навантаження — від транспортного модуля до дистанційно керованої зброї або комплексу

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знешкодження вибухових пристроїв. Силова установка є гібридною: дизельний двигун поєднується з електромотором, що живиться від літій-іонних акумуляторів Denchi Power та графеново-суперконденсаторних батарей. Режим суто електричного руху забезпечує платформі мінімальну акустичну та теплову сигнатуру, що критично важливо для скритного зближення з позиціями противника»[21].

Бойова версія THeMIS Combat оснащується стабілізованою системою дистанційного керування зброєю (ДКСЗ), до якої можуть монтуватися кулемет CIS 50MG калібру 12,7 мм, гранатометний комплекс або протитанкові ракети.

Бортовий обчислювальний модуль є ключовим компонентом системи керування мобільної роботизованої платформи, який забезпечує інтеграцію, обробку та інтерпретацію інформації, що надходить від сенсорних підсистем, а також формування керуючих впливів для виконавчих механізмів. Його функціональне призначення полягає у реалізації алгоритмів навігації, локалізації та планування руху, включаючи аналіз навколишнього середовища, оцінку стану платформи та прийняття рішень у режимі реального часу. Саме на цьому рівні відбувається об'єднання даних з різномірних джерел — лідарів, відеокамер, інерціальних датчиків та систем позиціонування — з подальшою їх обробкою за допомогою сучасних методів цифрової обробки сигналів та штучного інтелекту.

Бортовий обчислювальний модуль гусеничної роботизованої платформи THeMIS розміщується у внутрішньому об'ємі корпусу та виконаний у вигляді захищеного промислового комп'ютера. Конструктивно він інтегрований із системами живлення, зв'язку та керування, що забезпечує його захист від зовнішніх впливів та стабільну роботу в умовах підвищених механічних і кліматичних навантажень. Закрите розміщення апаратних компонентів зумовлене необхідністю підвищення надійності та живучості платформи в умовах експлуатації. У випадку застосування роботизованих платформ у військових або екстремальних середовищах до бортових обчислювальних систем висуваються підвищені вимоги щодо стійкості до зовнішніх впливів.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому використовуються так звані захищені (rugged) комп'ютери, які характеризуються підвищеною вібростійкістю, температурною стабільністю, захистом від пилу та вологи, а також здатністю працювати в умовах електромагнітних завад. Це забезпечує безперервність функціонування системи керування та надійність виконання поставлених задач навіть у складних експлуатаційних умовах.

Гусенична бойова «платформа Ripsaw M5 (рисунок 2.2), розроблена консорціумом Textron Systems, Howe & Howe та FLIR System. Машина вирізняється надзвичайно потужними характеристиками рухливості: максимальна швидкість модифікації M5 Light досягає 72 км/год — вдвічі більше, ніж у переважної більшості аналогів. Силова установка — гібридна дизельно-електрична трансмісія — забезпечує раціональне поєднання потужності та автономності» [22].



Рисунок 2.2- Гусенична бойова платформа Ripsaw M5

Конструкція базується на триточковому ходовому візку з шістьма ведучими колесами та гумово-металевою гусеницею D-подібного профілю. Модульна плоска палуба дозволяє встановлювати різноманітні системи озброєння: турель Kongsberg MCT-30 з 30-мм гарматою Bushmaster та спареним кулеметом 7,62 мм, дистанційний бойовий модуль CROWS-Javelin, зенітні ракетні комплекси малого радіусу дії.

Сенсорний комплекс включає електронно-оптичну та інфрачервону систему FLIR SUMIT, що забезпечує кругову ситуативну обізнаність оператора. Управління реалізоване через захищений радіоканал з резервними оптоволоконними лініями.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вагова категорія M5 Light (7,5 тонни) та M5 Medium (10,5 тонни) дозволяє транспортування літаком C-130, що суттєво підвищує стратегічну мобільність підрозділів, оснащених цими системами.

Компанія ARX Robotics (Мюнхен) розробила колісну «модульну платформу GEREON (рисунок 2.3), яка орієнтована насамперед на логістичні та розвідувальні місії. Принципова відмінність GEREON від більшості конкурентів полягає в колісній схемі 4×4 з незалежною підвіскою всіх коліс, що забезпечує задовільну прохідність при значно нижчому рівні акустичних перешкод порівняно з гусеничними машинами. Особливо важливим є рішення ARX Robotics про налагодження виробництва GEREON безпосередньо в Україні, що прискорює поставки та дозволяє адаптувати конструкцію до конкретних умов фронту» [22].



Рисунок 2.3- Модульна платформа GEREON

Наземний «роботизований комплекс «Мураха» рисунок 2.4 — один із найбільших за вантажопідйомністю вітчизняних БНТЗ. «Мураха» являє собою гусеничну платформу з підвищеним кліренсом 200 мм, що дозволяє долати перешкоди з кутом нахилу до 45°, а також подолання дрібних водних перешкод. Запас ходу становить до 40 км, максимальна швидкість — 11 км/год. Комплекс оснащений резервованими каналами керування, що забезпечують стабільну роботу в умовах активного застосування противником засобів радіоелектронної боротьби.

Потужна гідравлічна система приводу гусениць і значна власна маса платформи дозволяють не лише перевозити вантажі, а й буксирувати

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пошкоджені транспортні засоби та встановлювати важке навісне обладнання — мінні трали, маніпулятори, важкі турелі. У перспективі розробники передбачають інтеграцію модулів штучного інтелекту для автономної навігації, бойових модулів вогневої підтримки та розвідувальних сенсорних блоків» [24].



Рисунок 2.4- Наземний роботизований комплекс «Мураха»

Платформа «Фантом» (рисунок 2.5), «розроблена компанією «Спецтехноекспорт» у складі Укроборонпрому, є однією з перших серійних українських бойових БНТЗ. Гібридна силова установка потужністю 30 кВт забезпечує максимальну швидкість 38 км/год і запас ходу 20 км. Вантажопідйомність становить 350 кг. Управління реалізовано через захищений радіоканал з дальністю 2,5 км або оптоволоконний кабель завдовжки 5 км. «Фантом» несе стабілізований дистанційний кулемет калібру 12,7 мм з добовою та нічною оптикою, а також має опцію встановлення протитанкового ракетного комплексу» [25].



Рисунок 2.5- Платформа «Фантом»

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Наземний «роботизований комплекс «Терміт»(рисунок 2.6) є сучасною вітчизняною безпіотною мобільною платформою гусеничного типу, призначеною для виконання широкого спектра завдань у складних умовах експлуатації, зокрема в бойовому середовищі. Конструктивно система реалізована як універсальна модульна платформа, що дозволяє інтегрувати різноманітні функціональні модулі залежно від поставлених задач — логістичних, інженерних або бойових» [25].



Рисунок 2.6- Наземний роботизований комплекс «Терміт»

З технічної точки зору, «Терміт» характеризується застосуванням гусеничного шасі з низьким центром мас, що забезпечує підвищену прохідність на складних типах місцевості, включаючи бездоріжжя, траншеї та ділянки з великим кутом нахилу. Така компоновка дозволяє платформі зберігати стійкість під час транспортування вантажів навіть у динамічно змінних умовах руху.

Комплекс здатний транспортувати корисне навантаження порядку до 300 кг, що робить його ефективним засобом для логістичного забезпечення підрозділів. При цьому, за рахунок оптимізованої енергетичної системи, робот може долати значні відстані — до 40 км за ніч у бойових умовах, що свідчить про високий рівень автономності.

У Таблиці 2.1 наведені зведені технічні характеристики шести досліджених платформ. Дані систематизовано за ключовими показниками, що визначають тактичну придатність БНТЗ.

ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	43

Таблиця 2.1 — Порівняльна таблиця технічних характеристик БНТЗ

Платформа	Країна	Тип рушія	Вантажопідйомність, кг	Макс. швидкість, км/год	Запас ходу, км	Маса платформи, кг
Мураха	Україна	Гусенична	500	11	40	н/д
Phantom	Україна	Колісна/гібрид	350	38	20	~400
Termit	Україна	Гусенична	200	15	30	~250
THeMIS	Естонія	Гусенична гібрид	750	20	n/a	1 450
Ripsaw M5 Light	США	Гусенична гібрид	1 360	72	n/a	7 500
GEREON	Німеччина	Колісна 4×4	400	25	n/a	~600

На рисунку 2.7 відображено результати порівняльного аналізу вантажопідйомності сучасних наземних роботизованих комплексів, розроблених у різних країнах. Аналіз представлених даних свідчить про суттєву варіативність вантажопідйомності залежно від класу та функціонального призначення роботизованих систем.

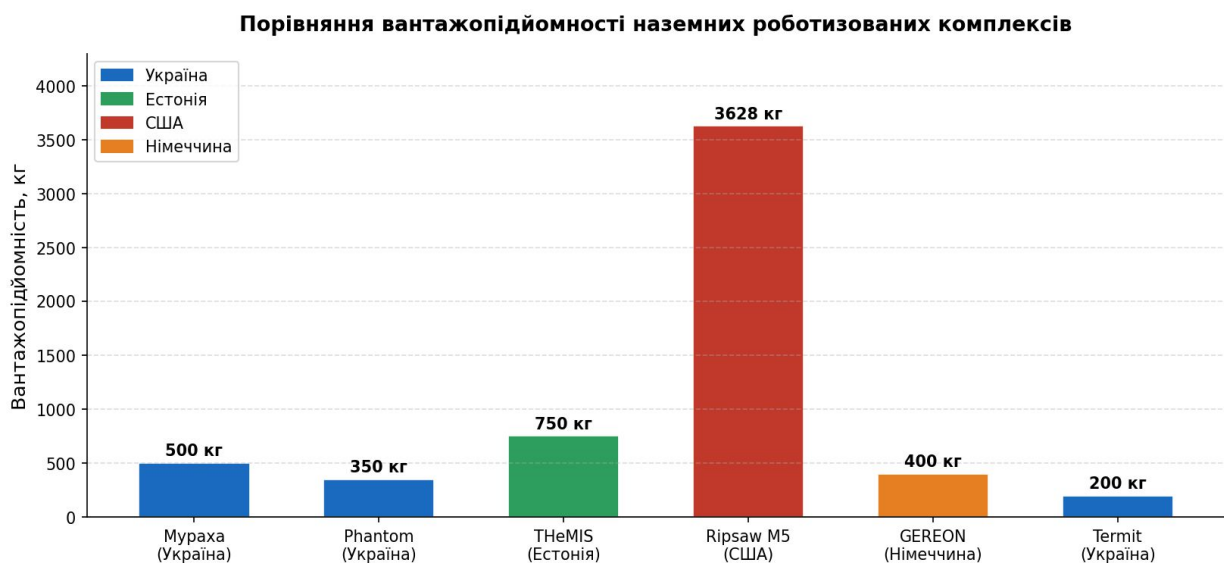


Рисунок 2.7- Порівняльний аналіз вантажопідйомності сучасних наземних роботизованих комплексів.

Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок, що вантажопідйомність є ключовим параметром, який визначає функціональне призначення наземного роботизованого комплексу. Важкі платформи орієнтовані на виконання складних бойових і транспортних задач, тоді як середні та легкі системи забезпечують гнучкість застосування, маневреність та

ефективність у тактичних умовах. Це підтверджує доцільність класифікації роботизованих платформ за вантажопідйомністю як одним із основних критеріїв їх функціонального призначення.

На рисунку 2.8 представлено результати порівняльного аналізу максимальних швидкостей сучасних наземних роботизованих комплексів. Аналіз представлених даних демонструє значну диференціацію швидкісних характеристик залежно від конструктивних особливостей платформи та її функціонального призначення.

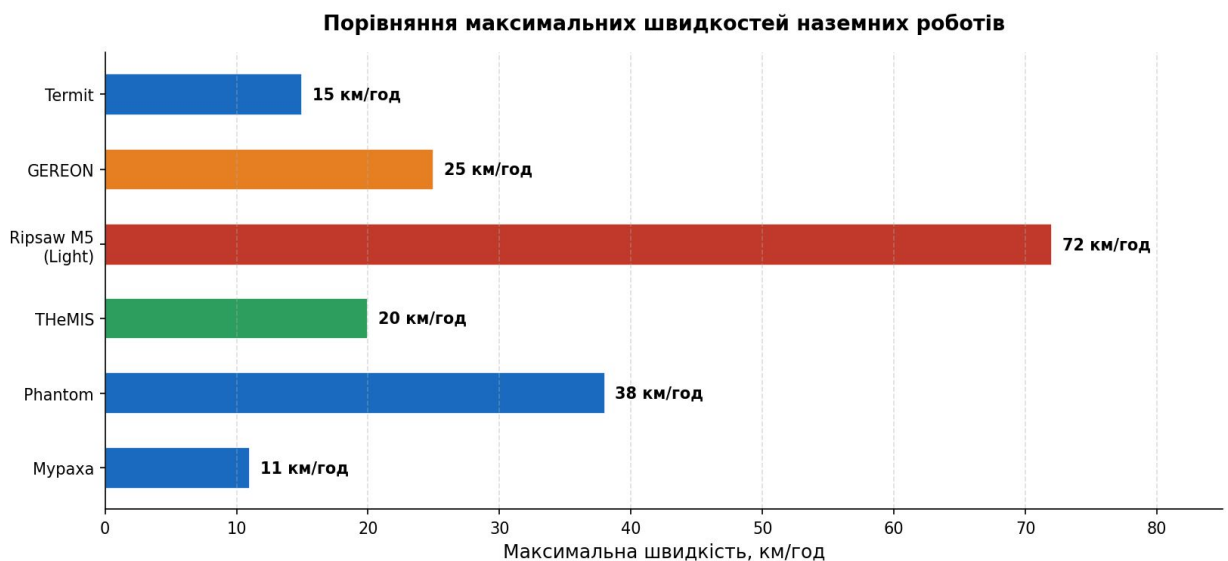


Рисунок 2.8- Аналіз максимальних швидкостей сучасних наземних роботизованих комплексів

Результати аналізу свідчать, що максимальна швидкість наземних роботизованих комплексів безпосередньо залежить від їх конструктивного виконання та функціонального призначення. Високошвидкісні платформи застосовуються переважно у бойових та розвідувальних операціях, тоді як повільніші системи забезпечують ефективне виконання логістичних і допоміжних задач. Це підтверджує необхідність комплексного підходу до вибору платформи з урахуванням балансу між швидкістю, прохідністю та вантажопідйомністю. У роботі проведено порівняльний аналіз наземних роботизованих комплексів (НРК) за сукупністю ключових параметрів із використанням нормованої шкали оцінювання від 0 до 10. До аналізу включено

чотири платформи: українські «Мураха» та «Фантом», естонську THeMIS та американську Ripsaw M5.

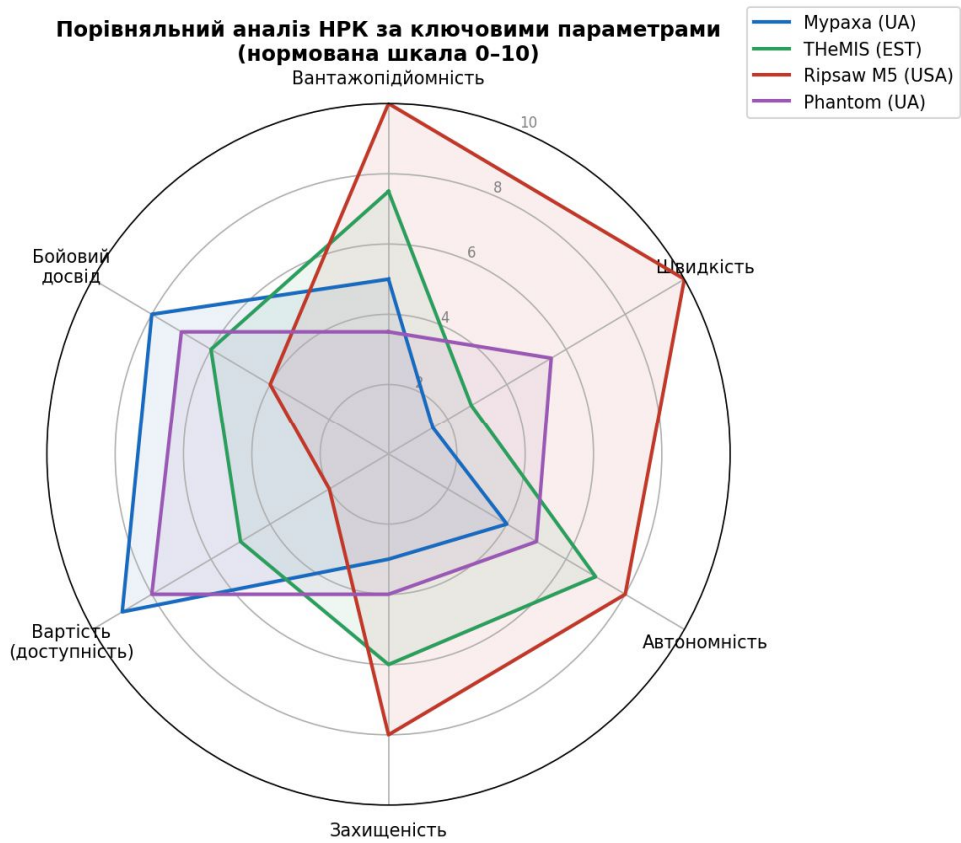


Рисунок 2.9- Порівняльний аналізу наземних роботизованих комплексів (НРК)

Аналіз радарної діаграми дозволяє комплексно оцінити сильні та слабкі сторони кожної платформи. Найвищі значення за більшістю параметрів демонструє платформа Ripsaw M5, яка характеризується максимальними показниками вантажопідйомності та швидкості (10 балів), а також високим рівнем автономності та захищеності (близько 8 балів). Це свідчить про її належність до класу важких бойових роботизованих систем, орієнтованих на виконання складних тактичних задач. Водночас дана платформа має низький показник доступності (вартість), що обмежує її широке застосування.

Платформа THeMIS демонструє збалансовані характеристики за всіма параметрами: вантажопідйомність, автономність і захищеність оцінюються на рівні 6–7 балів. Це вказує на її універсальність і придатність до виконання

широкого спектра задач — від логістичних до інженерних. Така збалансованість робить її ефективною у різних умовах експлуатації.

Український комплекс «Фантом» характеризується середніми значеннями більшості параметрів (4–7 балів), що свідчить про його універсальність і адаптованість до виконання як розвідувальних, так і бойових задач. Водночас платформа має достатньо високий рівень доступності, що є важливим фактором для масового впровадження.

Платформа «Мураха» має нижчі показники швидкості та автономності, проте відзначається високим рівнем доступності та значним практичним досвідом використання. Це підтверджує її ефективність як логістичного засобу у реальних умовах експлуатації, де пріоритетними є надійність і простота.

Таким чином, результати аналізу свідчать, що універсальної роботизованої платформи не існує, а кожна система оптимізована під конкретні задачі. Важкі платформи забезпечують максимальні технічні характеристики, але мають обмеження за вартістю, тоді як середні та легкі системи забезпечують баланс між ефективністю, доступністю та гнучкістю застосування. Це підкреслює необхідність вибору роботизованого комплексу на основі багатокритеріального аналізу з урахуванням умов експлуатації та поставлених задач.

2.2 Апаратні засоби системи керування наземним колісним роботизованим комплексом

Система керування колісним наземним роботизованим комплексом (НРК) являє собою розподілену кіберфізичну систему, в якій програмні алгоритми, обчислювальні модулі та виконавчі пристрої інтегровані в єдиний замкнений контур із зворотним зв'язком. На відміну від промислових маніпуляторів, що функціонують у детермінованому середовищі, бойові НРК змушені вирішувати задачу керування в умовах неповноти сенсорної інформації, динамічно змінюваного рельєфу та активного радіоелектронного протидії з боку

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

противника. Це суттєво підвищує вимоги як до апаратної надійності, так і до алгоритмічної гнучкості системи.

Обчислювальне ядро сучасного НРК формується з двох принципово різних класів мікросхем: центрального процесора загального призначення (або системи на кристалі, SoC), що виконує задачі планування, обробки даних та взаємодії з програмним стеком, та мікроконтролерів реального часу, відповідальних за детерміноване керування виконавчими механізмами.

NVIDIA Jetson Xavier NX (рисунок 2.10) є «провідним вибором для НРК, що потребують апаратного прискорення алгоритмів машинного зору та глибокого навчання безпосередньо на борту. Платформа поєднує 6-ядерний процесор ARM Cortex-A57 з тактовою частотою до 1,9 ГГц, графічний процесор Volta з 384 ядрами CUDA та тензорні ядра із продуктивністю 21 TOPS (трильйонів операцій на секунду). Ключовою перевагою є підтримка TensorRT — бібліотеки оптимізації нейромережевого виведення, що дозволяє виконувати інференс моделей YOLO-класу зі швидкістю 30–60 fps при споживанні 10–20 Вт. Для порівняння: аналогічна задача на x86-процесорі потребує 65–150 Вт» [26].

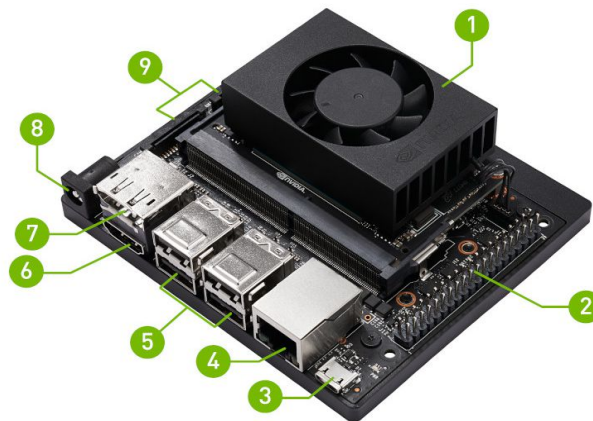


Рисунок 2.10- NVIDIA Jetson Xavier NX

Бортовий обчислювальний модуль оснащений набором апаратних інтерфейсів, що забезпечують його інтеграцію з периферійними пристроями, сенсорними системами та виконавчими механізмами мобільного робота. Кожен із наведених елементів виконує визначену функцію в загальній архітектурі автоматизованої системи керування.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

1. Слот для карти пам'яті microSD призначений для організації основного енергонезалежного сховища даних. На карті пам'яті розміщується операційна система, прикладне програмне забезпечення, а також журнали роботи та дані сенсорних вимірювань, що забезпечує автономність функціонування обчислювального модуля.

2. 40-контактний розширювальний роз'єм забезпечує можливість підключення додаткових апаратних модулів та периферійних пристроїв. Через даний інтерфейс реалізується доступ до низькорівневих шин обміну даними (GPIO, I2C, SPI, UART), що дозволяє інтегрувати сенсори, енкодери, контролери приводів та інші компоненти системи керування.

3. Порт Micro-USB використовується для сервісного доступу до обчислювального модуля, зокрема для налагодження, прошивки та діагностики системи. Даний інтерфейс також може застосовуватися для обміну даними з персональним комп'ютером під час розробки та тестування.

4. Порт Gigabit Ethernet забезпечує високошвидкісний дротовий мережевий зв'язок. Він використовується для передачі великих обсягів даних, зокрема відеопотоків, телеметрії та команд керування, а також для інтеграції модуля в локальні або розподілені мережі.

5. Порти USB 3.1 Type-A (×4) призначені для підключення зовнішніх периферійних пристроїв, таких як камери, накопичувачі даних, бездротові адаптери, сенсорні модулі та інші пристрої. Використання стандарту USB 3.1 забезпечує високу швидкість передачі даних, що є критично важливим для задач обробки відео та сигналів у реальному часі.

6. Порт HDMI забезпечує підключення зовнішніх засобів відображення інформації, таких як монітори або дисплеї. Це дозволяє здійснювати візуалізацію роботи системи, відображення інтерфейсу користувача, діагностичних даних та результатів обробки.

7. Роз'єм DisplayPort є альтернативним високошвидкісним відеоінтерфейсом, що підтримує передачу зображення високої роздільної здатності. Його використання розширює можливості підключення професійних

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

дисплеїв або спеціалізованих візуалізаційних систем.

8. Роз'єм живлення типу DC (барельний) для входу 19 В забезпечує подачу електроживлення на обчислювальний модуль. Стабільність параметрів живлення є критичною умовою надійної роботи системи, особливо в умовах змінного навантаження та впливу зовнішніх факторів.

9. Роз'єми для камер MIPI CSI призначені для підключення високошвидкісних цифрових камер. Даний інтерфейс забезпечує передачу відеоданих з мінімальними затримками, що є необхідним для реалізації алгоритмів комп'ютерного зору, навігації та автономного керування мобільним роботом.

Нижній (виконавчий) рівень автоматизованої системи керування колісним роботом характеризується підвищеними вимогами до часової детермінованості, мінімальних затримок обробки сигналів та гарантованої реакції на зовнішні впливи. Саме на цьому рівні здійснюється безпосереднє формування керуючих впливів на приводи руху, а також первинна обробка інформації, що надходить від сенсорів. З огляду на зазначені вимоги, реалізація нижнього рівня системи керування доцільно виконується на базі мікроконтролерів, які забезпечують роботу в режимі реального часу та мають високий рівень інтеграції периферійних модулів.

Серед сучасних апаратних рішень, що набули широкого застосування у мобільній робототехніці, особливе місце займають мікроконтролери сімейства STM32F4, STM32F7 та STM32H7 компанії STMicroelectronics. Дані пристрої побудовані на основі ядер ARM Cortex-M4 та Cortex-M7 і характеризуються високою обчислювальною продуктивністю при відносно низькому енергоспоживанні. Тактова частота таких мікроконтролерів може досягати 480 МГц, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування в умовах жорстких часових обмежень.

Ключовою функціональною задачею мікроконтролера на даному рівні є реалізація алгоритмів регулювання, зокрема пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, які забезпечують стабілізацію швидкості та

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

положення колісних приводів. Для цього використовується інформація з датчиків зворотного зв'язку, таких як інкрементальні або абсолютні енкодери, що вимірюють кутове положення та швидкість обертання валів двигунів. Обробка цих сигналів здійснюється з високою частотою дискретизації, що дозволяє формувати точні та своєчасні керуючі сигнали.

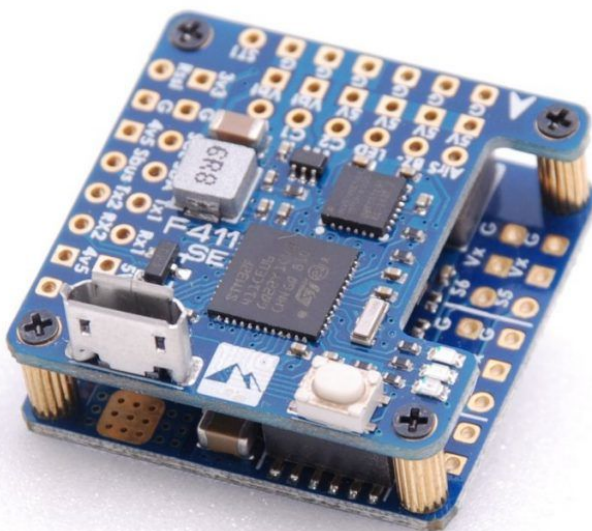


Рисунок 2.11- STM32F4

Формування керуючих впливів реалізується за допомогою апаратних таймерів мікроконтролера, які генерують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). ШІМ-сигнали використовуються для керування силовими драйверами двигунів, забезпечуючи плавне регулювання швидкості та моменту. Висока роздільна здатність таймерів та можливість їх синхронізації дозволяють досягати високої точності керування та мінімізувати пульсації струму в приводах.

Важливою перевагою мікроконтролерів зазначених серій є наявність вбудованого апаратного блоку обробки чисел із рухомою комою (FPU — Floating-Point Unit). Використання FPU суттєво підвищує швидкість виконання математичних операцій, що є критично важливим для реалізації регуляторних алгоритмів, фільтрації сигналів та обчислення похідних величин у реальному часі. Це дозволяє виконувати обчислення без залучення програмної емуляції, що, у свою чергу, зменшує затримки та підвищує точність результатів.

Типові частоти виконання циклів керування на нижньому рівні становлять від 1 до 10 кГц, що обумовлює необхідність високошвидкісної обробки даних і гарантованого дотримання часових інтервалів. Завдяки використанню апаратних переривань, DMA-контролерів та оптимізованих бібліотек, мікроконтролери STM32 забезпечують стабільну роботу системи навіть за умов інтенсивного обміну даними та складних обчислювальних задач.

Таким чином, застосування мікроконтролерів сімейства STM32F4/F7/H7 як основи нижнього рівня системи керування дозволяє реалізувати високоточне, швидкодійне та детерміноване керування приводами колісного робота, що є необхідною умовою для забезпечення його стійкого та ефективного функціонування в динамічному середовищі.\

Перетворення керуючих сигналів, сформованих бортовим обчислювальним модулем (BCU), у реальний механічний момент на валах колісних приводів є ключовою функцією силових мотор-контролерів, що належать до нижнього рівня системи керування мобільного робота. На цьому рівні відбувається безпосередня взаємодія з електродвигунами, що вимагає високої швидкодії, точності регулювання та стійкості до динамічних змін навантаження. Сучасні електроприводи, зокрема безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) та синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), характеризуються високою ефективністю та питомою потужністю, проте їх керування пов'язане з необхідністю реалізації складних алгоритмів комутації та регулювання струмів у фазах.

У зв'язку з цим у практиці мобільної робототехніки широко застосовуються спеціалізовані мотор-контролери, здатні реалізовувати високопродуктивні алгоритми керування електроприводами в реальному часі. Одним із найбільш поширених рішень у сегменті малогабаритних і середніх наземних роботизованих комплексів є контролер типу VESC, розроблений Бенджаміном Веддером. Його популярність обумовлена відкритістю апаратної та програмної архітектури, що дозволяє адаптувати систему під конкретні задачі, а також широким функціональним набором при відносно невисокій вартості.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовою особливістю контролера VESC є реалізація алгоритму векторного керування Field-Oriented Control (FOC), який базується на перетворенні координат струмів двигуна у двовимірну систему (d-q координати), синхронізовану з магнітним полем ротора. Такий підхід дозволяє незалежно регулювати момент і магнітний потік, що забезпечує плавну роботу двигуна, високий коефіцієнт корисної дії та точне керування у всьому діапазоні швидкостей обертання. На відміну від традиційних методів комутації, FOC мінімізує пульсації моменту, знижує акустичний шум і покращує динамічні характеристики електроприводу.

Апаратна реалізація контролера «VESC, зокрема у версії VESC 6 MKVI (рисунок 2.12) , забезпечує широкий діапазон робочих параметрів, що робить його придатним для використання у різних типах роботизованих платформ. Контролер підтримує напругу живлення в межах 8–60 В та здатний працювати з піковими струмами до 120 А, що дозволяє керувати приводами середньої та підвищеної потужності. Для інтеграції в систему керування передбачено підтримку високошвидкісної шини CAN (до 1 Мбіт/с), що забезпечує надійний обмін даними між модулями системи, зокрема між бортовим комп'ютером та контролерами приводів» [26].



Рисунок 2.13- VESC 6 MKVI

З метою реалізації замкнених контурів керування швидкістю та положенням, контролер підтримує підключення датчиків зворотного зв'язку, таких як квадратурні енкодери або датчики Холла. Наявність вбудованого інерціального вимірювального модуля (IMU), зокрема MPU-9250, розширює

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціональні можливості системи, дозволяючи використовувати додаткову інформацію про орієнтацію та динаміку руху платформи. Також передбачено підтримку різноманітних інтерфейсів зв'язку, зокрема UART, PPM, ADC та I²C, що забезпечує гнучкість інтеграції з різними типами сенсорів і керуючих пристроїв.

Важливою складовою екосистеми VESC є програмне забезпечення VESC Tool, яке надає широкі можливості для налаштування та діагностики системи. За допомогою даного інструменту здійснюється конфігурація параметрів FOC-регулятора, калібрування датчиків, картування вхідних сигналів, а також автоматична ідентифікація параметрів двигуна. Це дозволяє значно спростити процес налаштування електроприводу та підвищити точність його роботи без необхідності використання складного вимірювального обладнання, такого як осцилограф.

Таким чином, використання мотор-контролерів типу VESC у системі керування колісного робота забезпечує ефективне перетворення цифрових керуючих сигналів у механічний рух із високою точністю, плавністю та енергоефективністю. Це робить їх одним із ключових елементів сучасних автоматизованих систем керування мобільними роботизованими платформами.

Контролер електроприводів «BasicMicro RoboClaw є компактним двоканальним пристроєм керування двигунами постійного струму, що широко використовується у складі малогабаритних наземних роботизованих комплексів, зокрема розвідувального призначення. Його функціональне призначення полягає у перетворенні керуючих сигналів від бортового обчислювального модуля у керуючі впливи на виконавчі механізми, забезпечуючи точне регулювання швидкості та положення приводів.

З апаратної точки зору контролер підтримує роботу з двома незалежними каналами керування, що дозволяє реалізувати диференціальний привід колісного робота або керування окремими виконавчими вузлами. Діапазон робочих струмів становить до 30–60 А залежно від модифікації, що забезпечує можливість застосування у системах із середнім рівнем навантаження при

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збереженні компактних габаритів та високої енергоефективності» [27].



Рисунок 2.14- BasicMicro RoboClaw

Однією з ключових особливостей RoboClaw є реалізація адаптивних алгоритмів регулювання, заснованих на принципах пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) керування. Використання зворотного зв'язку від енкодерів дозволяє досягати високої точності регулювання швидкості обертання та позиціонування двигунів. Контролер здатний обробляти сигнали з високою частотою — до 400 000 імпульсів за секунду, що забезпечує високу роздільну здатність та швидкодію системи керування, особливо у задачах із динамічно змінним навантаженням.

Для конфігурації та налаштування параметрів роботи передбачено підключення через інтерфейс USB, що дозволяє виконувати калібрування, зміну параметрів ПІД-регуляторів, моніторинг струмів, напруги та інших робочих характеристик. Це значно спрощує процес інтеграції контролера в систему та підвищує ефективність його використання.

З точки зору комунікації RoboClaw підтримує пакетний послідовний протокол обміну даними, що реалізується через інтерфейси UART або RS-232. Такий підхід забезпечує надійну та гнучку інтеграцію з різними обчислювальними платформами, зокрема мікроконтролерами типу Arduino, одноплатними комп'ютерами (Raspberry Pi) та бортовими обчислювальними модулями. Пакетний формат передачі даних дозволяє зменшити вплив завад та підвищити стабільність зв'язку у складних умовах експлуатації.

Таким чином, контролер BasicMicro RoboClaw є ефективним рішенням для реалізації низькорівневого керування приводами у колісних роботах,

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

поєднуючи компактність, достатню потужність, високу точність регулювання та гнучкість інтеграції в автоматизовані системи керування.

2.3 Інформаційно-вимірювальні компоненти системи управління колісним роботом

Сукупність навісних підсистем колісного робота утворює інформаційно-вимірювальний комплекс (ІВК), функціональне призначення якого — перетворення фізичних полів зовнішнього середовища у цифровий потік даних, придатний для обробки бортовим комп'ютером. Відповідно до характеру вимірюваних фізичних величин весь ІВК поділяється на чотири функціональні кластери: оптичного бачення (Vision), активної дальнометрії (Ranging), навігації (Navigation) та параметрів середовища (Environment). Їх взаємодія через модуль злиття сенсорних даних (Sensor Fusion Unit) показана на рисунку 2.15.

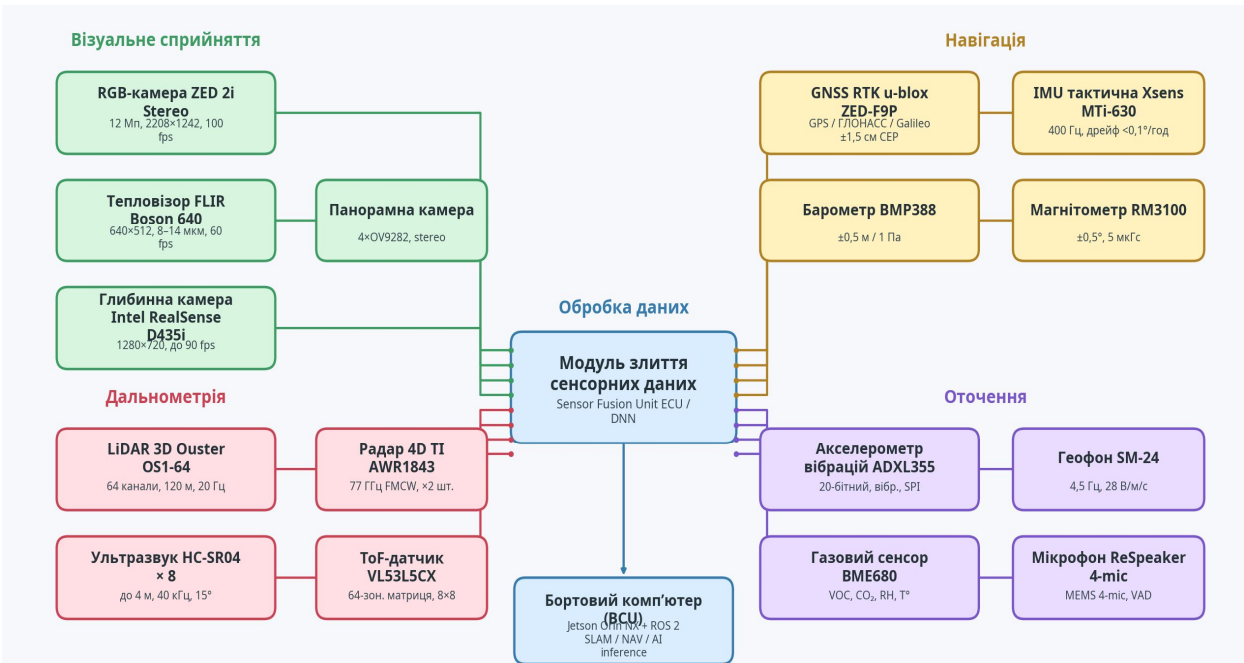


Рисунок 2.15- Рисунок 4.1 — Функціональна схема інформаційно-вимірювального комплексу колісного НРК

Фізичний принцип відбору компонентів для ІВК базується на мінімізації вектора невизначеності середовища при одночасній мінімізації сукупної

потужності споживання та маси. Математично задача вибору оптимального набору сенсорів формулюється як задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\min \{P_{\text{сум}}, M_{\text{сум}}, C_{\text{сум}}\} \text{ при умові } I(S) \geq I_{\text{min}} \quad (2.1)$$

де $P_{\text{сум}}$ — сумарна споживана потужність (Вт); $M_{\text{сум}}$ — загальна маса навісного обладнання (г); $C_{\text{сум}}$ — сукупна вартість (USD); $I(S)$ — інформаційна повнота набору сенсорів S , оцінена за мірою взаємної інформації; I_{min} — мінімально необхідна інформаційна повнота для виконання тактичного завдання.

Оскільки задача є багатоцільовою та нелінійною, на практиці застосовується ітеративний підхід: спочатку визначається мінімально необхідний набір сенсорів для кожного типу місії (логістика, розвідка, бойова підтримка), після чого виконується покомпонентна заміна з порівнянням зваженого критерію якості.

Відеосенсорна підсистема є основним джерелом семантичної інформації про оточення — на відміну від дальнометричних сенсорів, що дають геометричну карту середовища, камери забезпечують текстурну, колірну та теплову інформацію, необхідну для ідентифікації об'єктів. Ключовими параметрами відбору відеосенсорів для ІВК КРК є: роздільна здатність (визначає деталізацію цілі), частота кадрів (визначає можливість відстеження рухомих об'єктів), тип затвора (глобальний vs ковзний — впливає на артефакти при вібрації платформи), спектральний діапазон та динамічний діапазон.

Стереокамера ZED 2i (Stereolabs) (рисунок 2.16) обрана основним оптичним сенсором ІВК на підставі комплексного розрахунку роздільної здатності глибинного каналу. Точність визначення дистанції для пасивної стереосистеми описується формулою:

$$\sigma_z = z^2 \cdot \sigma_d / (f \cdot B) \quad (2.2)$$

де σ_z — стандартне відхилення похибки глибини (м); z — вимірювана відстань (м); σ_d — похибка вимірювання диспаритету в пікселях (типово 0,3–1,0 px для алгоритмів субпіксельного зіставлення); f — еквівалентна фокусна відстань у пікселях; B — базова відстань між об'єктивами (м).

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для ZED 2i: $B = 0,120$ м, $f = 1400$ рх (при роздільній здатності 2208×1242 та кутовому полі зору 110°), $\sigma_d = 0,5$ рх. Підставимо значення для $z = 10$ м:

$$\sigma_z = 10^2 \cdot 0.5 / (1400 \cdot 0.120) = 50 / 168 \approx 0.298 \text{ м} \quad (4.3)$$

Для $z = 5$ м отримаємо $\sigma_z \approx 0,075$ м, що є прийнятним для задач навігації КРК у відкритому середовищі. При $z > 15$ м точність глибини знижується нижче порогу безпечної навігації — цей діапазон перекривається LiDAR-підсистемою.



Рисунок 2.16- ZED 2i (Stereolabs)

Додатковою перевагою ZED 2i є вбудований IMU ICM-42688 (частота 400 Гц), що дозволяє реалізувати алгоритм Visual-Inertial Odometry (VIO) без залучення зовнішнього модуля. Пропускна здатність USB 3.0 (5 Гбіт/с) є достатньою для передачі стиснутого відеопотоку при 100 fps.

Тепловізійний сенсор є незамінним у ситуаціях нульової освітленості, задимлення поля бою та маскування противника в рослинності. Детектор FLIR Boson 640 (рисунок 2.17) із матрицею 640×512 пікселів у діапазоні 8–14 мкм забезпечує теплову чутливість NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) менше 50 мК при темп. тіла 25°C . Мінімально різниця температур, яку здатний зафіксувати сенсор:

$$\Delta T_{min} = NETD = 50 \text{ мК} = 0.05^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

Людина в спорядженні має теплову контрастність відносно фону близько $2\text{--}4^\circ\text{C}$ — тобто перевищує NETD у 40–80 разів. Відповідно до критерію Джонсона, для впізнавання людини (recognition) необхідно забезпечити 6 пар рядків / цілі. При IFOV (миттєвому куті поля зору) сенсора $18,9$ мрад і рості людини $1,8$ м дальність розпізнавання:

$$R_{recog} = h_{target} / (n_{cycles} \cdot IFOV) = 1.8 / (6 \cdot 0.0189) \approx 15.9 \text{ м} \quad (2.4)$$

де $n_{cycles} = 6$ — кількість пар рядків для впізнавання за критерієм Джонсона. Для виявлення (detection) $n_{cycles} = 1$, що дає дальність виявлення

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

понад 95 м. Саме ця характеристика обумовлює вибір саме Boson 640 для КРК, що виконують нічні патрульні місії.



Рисунок 2.17- FLIR Boson 640

Intel RealSense D435i поєднує активний інфрачервоний проєктор текстури (850 нм) з парою монохромних IR-камер та RGB-модулем. Принцип роботи активного стереосенсора відрізняється від пасивного: проєктований псевдовипадковий точковий патерн вирішує проблему кореспонденції точок у безтекстурних сценах (рівнини, снігові поля, асфальт), де ZED 2i деградує. Максимальна дальність роботи IR-проєктора D435i — 10 м при ширині пучка $66^\circ \times 40^\circ$, що формує перекриваючу зону ближнього огляду спільно з ультразвуковими сенсорами (0,1–4 м).

Для усунення сліпих зон кругового огляду ІВК доповнюється чотирма камерами OV9281 (рисунок 2.18) у «конфігурації 90° між оптичними осями. Відсутність ефектів ковзного затвора при русі по нерівній місцевості є вирішальним аргументом на користь глобального затвора. Кутова похибка при ковзному затворі для об'єкта, що рухається зі швидкістю $v_{obj} = 5$ м/с та часі зчитування рядка $t_{row} = 50$ мкс:

$$\Delta x_{artifact} = v_{obj} \cdot t_{row} \cdot f_{px} = 5 \cdot 50 \times 10^{-6} \cdot 700 \approx 0.175 \text{ px/рядок} \quad (2.5)$$

При висоті кадру 800 рядків сумарний зсув досягає 140 пікселів — неприйнятна величина для алгоритмів виявлення швидких цілей. Глобальний затвор OV9281 нівелює цей ефект до нуля»[20].



Рисунок 2.18- Камера OV9281

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Активна дальнометрія передбачає випромінювання зондувального сигналу власним джерелом та вимірювання часу або фазового зсуву відлунювального сигналу. Ця підсистема забезпечує тривимірну геометричну карту оточення, незалежну від зовнішнього освітлення та текстури поверхні. Дальності виявлення всіх обраних активних сенсорів наведені на рисунку 2.19.

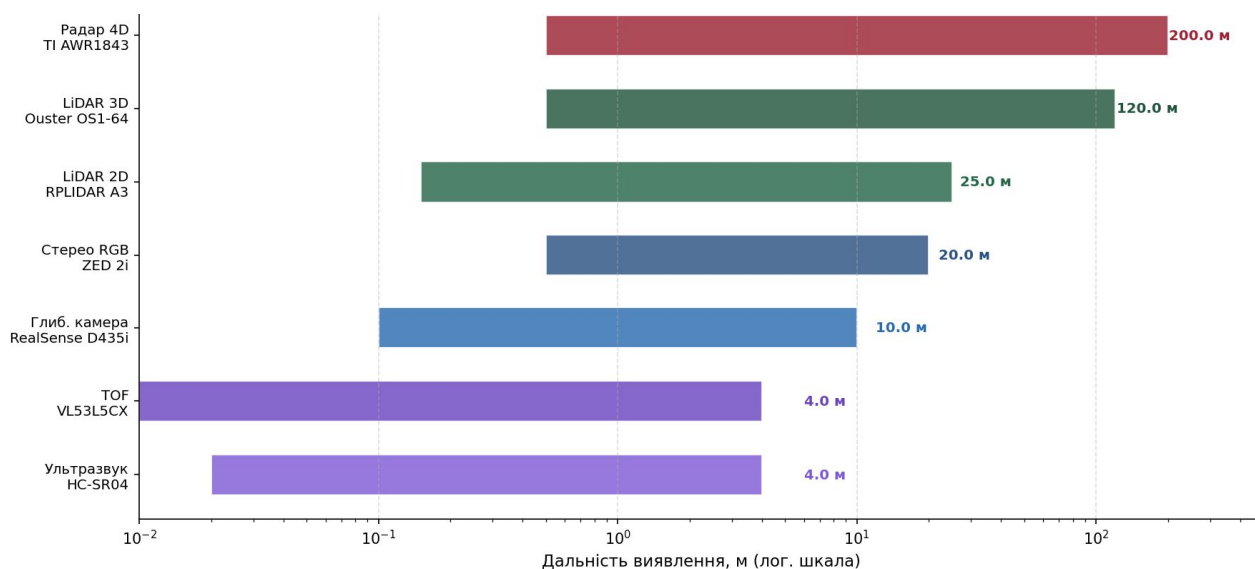


Рисунок 2.19 - Порівняння дальності виявлення сенсорів ІВК

Лідар Ouster OS1-64(рисунок 2.20_ є основним дальнометричним сенсором ІВК. Принцип вимірювання — Time-of-Flight (ToF): лазерний імпульс (довжина хвилі 865 нм) випромінюється та приймається, а відстань розраховується із закону:

$$R = c \cdot \Delta t / 2 \quad (2.7)$$

де $c = 2,998 \times 10^8$ м/с — швидкість світла; Δt — вимірний час льоту фотона (с). При роздільній здатності таймера 10 пс похибка вимірювання відстані:

$$\sigma_R = c \cdot \sigma_t / 2 = 2.998 \times 10^8 \cdot 10 \times 10^{-12} / 2 \approx 1.5 \text{ мм} \quad (2.8)$$



Рисунок 2.20- Лідар Ouster OS1-64

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Реальна похибка OS1-64 (± 1 см) перевищує теоретичну мінімум унаслідок джиттера лазерного діода, температурного дрейфу та розкиду кута відбиття поверхні цілі.

64-канальна конструкція OS1-64 (формує щільність хмари точок:

$$\rho_{pts} = N_{channels} \cdot rpm / 60 \cdot N_{pts/rev} = 64 \cdot 20 \cdot 2048 \approx 2.62 \times 10^6 pts/s \quad (2.9)$$

Це дозволяє реконструювати поверхню з достатньою деталізацією для безпечного проходження та класифікації об'єктів на відстані до 120 м. Вага сенсора — 447 г, споживання — 14–18 Вт.

Міліметрово-хвильовий FMCW-радар Texas Instruments AWR1843 (77 ГГц) є унікальним доповненням до LiDAR: він зберігає ефективність в умовах дощу, туману та пилу — явищ, що значно деградують роботу оптичних сенсорів. Принцип вимірювання відстані FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave):

$$R = c \cdot \Delta f / (2 \cdot S) \quad (2.10)$$

де Δf — частотний зсув відбитого сигналу відносно переданого (Гц); $S = BW/T_{chirp}$ — швидкість перестройки частоти (Гц/с); BW — смуга перестройки (Гц); T_{chirp} — тривалість чирпу (с).

Розв'язна здатність по дальності:

$$\Delta R = c / (2 \cdot BW) = 3 \times 10^8 / (2 \cdot 4 \times 10^9) = 0.0375 \text{ м} \approx 3.75 \text{ см} \quad (2.11)$$

при $BW = 4$ ГГц (доступна смуга AWR1843 у режимі максимальної роздільної здатності). Радар також вимірює радіальну швидкість цілі через ефект Доплера:

$$v_r = \lambda \cdot f_D / 2 = (3 \times 10^8 / 77 \times 10^9) \cdot f_D / 2 \quad (2.13)$$

де f_D — доплерівський зсув частоти (Гц). Максимальна однозначно вимірювана швидкість при $T_{chirp} = 60$ мкс:

$$v_{max} = \lambda / (4 \cdot T_{chirp}) = (3.9 \times 10^{-3}) / (4 \cdot 60 \times 10^{-6}) \approx \pm 16.2 \text{ м/с} \quad (2.14)$$

Цього діапазону достатньо для виявлення та супроводу людини (макс. 7 м/с), автомобіля (до 15 м/с) та дрона (до 12 м/с). Вага модуля — 30 г, споживання — 1,2 Вт, що робить радар надзвичайно енергоефективним доповненням до LiDAR.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Ультразвукові сенсори HC-SR04 (рисуюнок 2.20) (8 модулів по периметру КРК) перекривають ближню зону 0,02–4 м, де LiDAR має «мертву зону» через геометрію установки. Принцип роботи — вимірювання часу пробігу акустичного імпульсу:

$$R = v_{\text{звук}} \cdot t_{\text{exo}} / 2 = 343 \cdot t_{\text{exo}} / 2 \quad (2.15)$$

де $v_{\text{звук}} = 343$ м/с при 20°C (температурна корекція: $v = 331 + 0,6 \cdot T$ [°C] м/с). Роздільна здатність HC-SR04 при тактовій частоті таймера 1 МГц:

$$\Delta R_{us} = v_{\text{звук}} / (2 \cdot f_{\text{timer}}) = 343 / (2 \cdot 10^6) = 0.172 \text{ мм} \quad (2.16)$$



Рисуюнок 2.20- Ультразвукові сенсори HC-SR04

Матриця TOF VL53L5CX (ST Microelectronics) з 64 незалежними зонами 8×8 доповнює ультразвукові сенсори тонкою просторовою картою ближньої зони для виявлення дрібних перешкод (каміння, уламки, порогові щаблі).

Навігаційний кластер IBK формує точну оцінку просторового положення та орієнтації КРК у глобальній та локальній системах координат. На відміну від датчиків оточення, що вимірюють зовнішнє середовище, навігаційні сенсори вимірюють стан самого робота. Надмірність даних кількох незалежних навігаційних сенсорів є основою для побудови стійкого оцінювача стану.

Комп'ютерний зір у контексті IBK КРК охоплює два принципово різних завдання: по-перше — геометричну реконструкцію сцени для навігації (SLAM, глибинна оцінка, сегментація прохідної зони); по-друге — семантичний аналіз для ідентифікації цілей, персоналу та перешкод (детектування об'єктів, класифікація, трекінг). Обидва завдання реалізуються на бортовому комп'ютері, але висувають принципово різні вимоги до апаратного забезпечення.

Детекція об'єктів реального часу реалізується нейронною мережею YOLOv8 (You Only Look Once v8) архітектури CSPDarknet53 + PAN + Decoupled Head. Мережа виконує одночасну класифікацію та локалізацію всіх

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

об'єктів за один прохід, що забезпечує час інференсу, пропорційний $O(N)$ від кількості об'єктів:

$$t_{inf} = f(W_{model}, H_{input} \times W_{input}, N_{classes}) \tag{2.17}$$

де W_{model} - розмір моделі (кількість параметрів); $H_{input} \times W_{input}$ - розмір вхідного тензора; $N_{classes}$ - кількість класів об'єктів. Вплив апаратної платформи на швидкість виконання (рисунок 2.21):

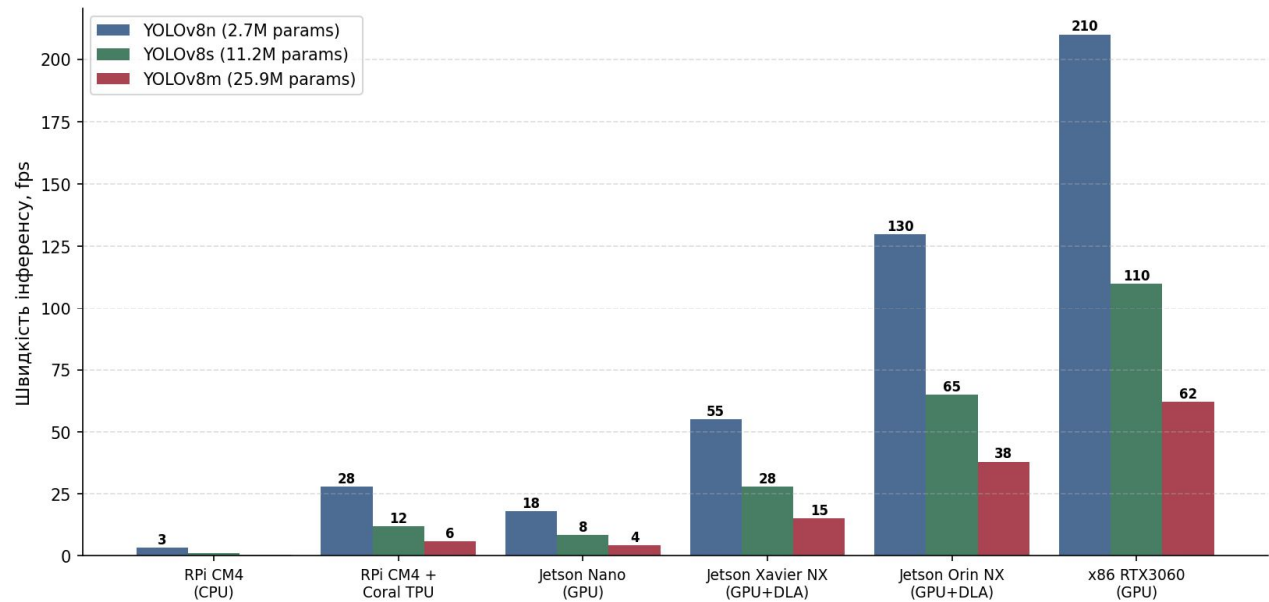


Рисунок 2.20 — Швидкість інференсу YOLOv8 на різних апаратних платформах для НРК

Jetson Orin NX забезпечує 130 fps для YOLOv8n при роздільній здатності 640×640, що в 40 разів швидше за граничне значення реального часу (30 fps) і в 3+ рази перевищує Jetson Xavier NX. Тензорна оптимізація через TensorRT 8.x дозволяє додатково прискорити інференс до 1,7–2,3× порівняно з нативним PyTorch.

Середня точність (mAP50) YOLOv8n на датасеті COCO становить 37,3%, що є компромісом між швидкістю та точністю. Для бойових застосувань, де висока частота ненульових відповідей (False Negatives) критичніша за хибнопозитивні спрацювання (False Positives), перевагу надають YOLOv8s (mAP50 = 44,9%) з незначним зниженням продуктивності.

Ефективність ІВК визначається не окремими сенсорами, а їх раціональним поєднанням у межах багаторівневої сенсорної архітектури з використанням алгоритмів злиття даних. Підхід багатокритеріальної

оптимізації дозволяє забезпечити необхідну інформаційну повноту при обмеженнях на масу, енергоспоживання та вартість системи, що є критично важливим для мобільних робототехнічних платформ.

Особливу увагу приділено взаємодоповнюваності сенсорів: LiDAR забезпечує високу точність геометрії сцени, радар — стійкість до складних погодних умов, камери — семантичне розпізнавання, а ультразвукові та ToF сенсори — контроль ближньої зони. Такий підхід дозволяє мінімізувати «сліпі зони» та підвищити надійність функціонування системи в реальних експлуатаційних умовах.

Результати аналізу також підтверджують, що застосування сучасних алгоритмів комп'ютерного зору (зокрема YOLOv8) у поєднанні з високопродуктивними обчислювальними платформами забезпечує обробку сенсорних даних у режимі реального часу, що є необхідною умовою автономної навігації та виконання складних тактичних задач.

Отже, сформований інформаційно-вимірювальний комплекс є збалансованою, енергоефективною та функціонально надлишковою системою, яка забезпечує високий рівень ситуаційної обізнаності колісного робота та створює основу для реалізації інтелектуальних алгоритмів управління і автономної роботи в складних умовах середовищ

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ

3.1 Розробка Simulink моделі управління рухом колісного робота

Сучасні дослідження у галузі мобільної робототехніки все частіше орієнтуються на застосування імітаційного моделювання як основного інструменту перевірки алгоритмів управління, планування траєкторій та оцінки енергетичних показників системи. Це зумовлено кількома ключовими чинниками: по-перше, суттєвим скороченням матеріальних витрат порівняно з фізичними прототипами; по-друге, можливістю відтворення різноманітних сценаріїв функціонування в контрольованому середовищі; по-третє, відсутністю ризику пошкодження обладнання під час відпрацювання алгоритмів у позаштатних режимах.

Розроблена імітаційна модель (рисунок 3.1) системи керування колісним роботом ґрунтується на ієрархічному принципі побудови та передбачає декомпозицію загальної задачі управління на окремі функціональні рівні, що забезпечують формування траєкторії руху, генерацію керуючих впливів та відтворення фізичної динаміки платформи. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість системи, забезпечити її масштабованість і спростити процес налаштування окремих компонентів.

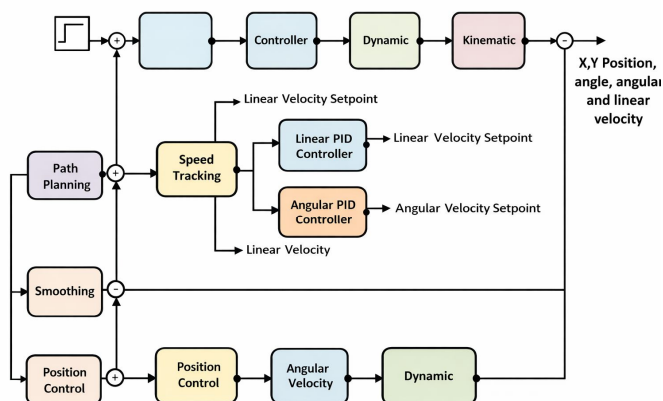


Рисунок 3.1-Імітаційна модель управління колісним роботом

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

На верхньому рівні функціонує підсистема планування траєкторії, яка формує послідовність опорних точок руху відповідно до поставленого завдання. З метою уникнення різких змін напрямку та забезпечення плавності переміщення отримана траєкторія піддається додатковій обробці у блоці згладжування, що дозволяє мінімізувати динамічні перевантаження та покращити якість керування. Результатом роботи цього рівня є еталонний опис руху, який слугує вхідними даними для наступних підсистем.

Подальше перетворення геометричної траєкторії у керовані параметри руху здійснюється підсистемою відстеження швидкості, де визначаються необхідні значення лінійної та кутової швидкостей. Саме ці величини виступають як задані сигнали для регуляторів нижчого рівня. Важливою особливістю запропонованої структури є розділення каналів керування на два незалежні контури, що відповідають за поступальний і обертальний рухи платформи. Така декомпозиція дозволяє враховувати специфіку кожного виду руху та забезпечує більш точне налаштування системи.

Формування керуючих впливів реалізується за допомогою двох підрегуляторів типу PID, кожен з яких виконує стабілізацію відповідної швидкості. Лінійний регулятор забезпечує підтримання необхідної поступальної швидкості, тоді як кутовий відповідає за орієнтацію робота та точність відпрацювання поворотів.

$$u_v = K_p^v e_v + K_i^v \int e_v dt + K_d^v \frac{de_v}{dt}$$

Використання класичних PID-алгоритмів обумовлено їх універсальністю, простотою реалізації та здатністю забезпечувати прийнятні показники швидкодії та стійкості у широкому діапазоні умов експлуатації. Розділення каналів регулювання також сприяє зменшенню взаємного впливу керуючих сигналів і підвищує загальну стабільність системи.

Сформовані регуляторами сигнали подаються на динамічну підсистему, яка моделює фізичні процеси, що відбуваються у приводах робота. У цій частині враховуються параметри електромеханічної системи, зокрема

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

характеристики двигунів постійного струму, інерційні властивості, сили тертя та можливі обмеження за швидкістю і моментом. Завдяки цьому забезпечується адекватне відображення реальної поведінки платформи у процесі руху. Кутовий PID-регулятор забезпечує орієнтацію робота у просторі:

$$u_{\omega} = K_p^{\omega} e_{\omega} + K_i^{\omega} \int e_{\omega} dt + K_d^{\omega} \frac{de_{\omega}}{dt}$$

Обчислюються координати центру мас та орієнтація платформи відносно вибраної системи координат, що дозволяє відтворити траєкторію руху у часі. Таким чином, кінематична підсистема виконує роль інтегратора стану системи.

Замикання контуру керування здійснюється за рахунок зворотного зв'язку, який забезпечує передачу інформації про поточний стан робота до підсистем вищого рівня. Це дозволяє реалізувати корекцію траєкторії, компенсувати вплив зовнішніх збурень і підвищити точність позиціонування. Наявність зворотного зв'язку є ключовим фактором забезпечення стійкості та адаптивності системи.

У цілому запропонована модель характеризується високим рівнем модульності, що дає можливість її подальшого розширення, зокрема шляхом інтеграції більш складних алгоритмів керування або додаткових сенсорних підсистем. Використання підрегуляторів у поєднанні з ієрархічною структурою забезпечує ефективне відтворення руху колісного робота, високу точність відстеження траєкторії та стійкість функціонування в умовах невизначеності зовнішнього середовища.

Для реалізації поставлених у роботі задач обрано інтегроване середовище MATLAB/Simulink. Вибір зумовлений сукупністю технічних переваг цієї платформи: наявністю спеціалізованих бібліотек для робототехніки (Mobile Robotics Simulation Toolbox), підтримкою блочного візуального програмування в Simulink, можливістю реалізації ПІД-регуляторів, передавальних функцій та нелінійних динамічних елементів без написання низькорівневого коду, а також вбудованими засобами візуалізації траєкторій і часових залежностей. Крім того, середовище забезпечує зручний інтерфейс для підключення фізичних пристроїв

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

через пакет MATLAB Support Package for Raspberry Pi Hardware, що дозволяє перенести відпрацьовані в симуляції алгоритми безпосередньо на апаратну платформу.

Розроблена Simulink-модель (рисунок 3.1) колісного мобільного робота з диференціальним приводом являє собою ієрархічно організовану систему взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких відповідає за окремий аспект функціонування робота. Загальна архітектура побудована за принципом модульності: зміна параметрів одного блоку не порушує структуру інших, а кожна підсистема може бути замінена або доповнена незалежно.

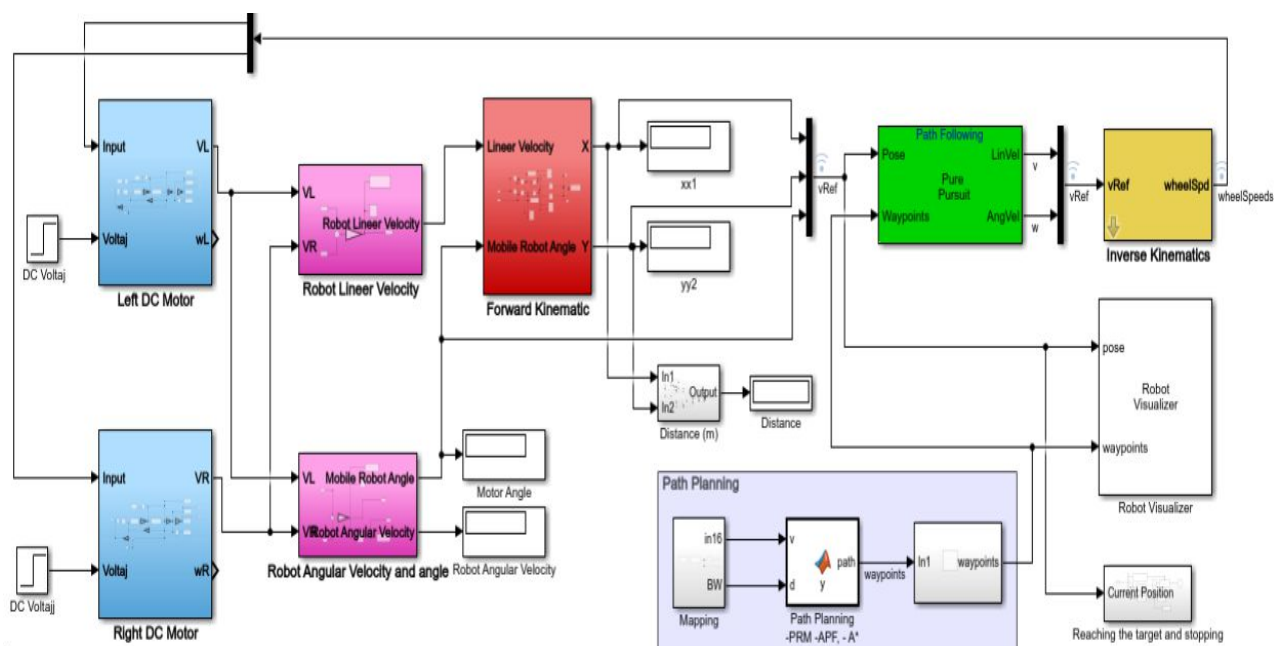


Рисунок 3.1- Simulink модель колісного робота

До складу моделі входять такі функціональні модулі:

- динамічна модель двигунів постійного струму з урахуванням нелінійних ефектів;
- кінематична модель диференційного приводу (пряма та зворотна кінематика);
- ПІД-регулятор швидкості з можливістю налаштування коефіцієнтів;
- модуль планування траєкторії;
- алгоритм відстеження шляху Pure Pursuit;
- розширена модель оцінки енергоспоживання (моторна, сенсорна, керуюча складові);

					ДП.АКІТ.10663272. 00.00000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

-блок візуалізації руху Robot Visualizer.

Інформаційний потік у моделі організований таким чином: на вхід системи надходять координати вузлових точок маршруту (waypoints), які обробляються модулем планування. Згладжений опорний шлях передається до блоку відстеження (Pure Pursuit), що формує цільові значення лінійної та кутової швидкостей. Ці значення надходять до ПІД-регуляторів, які обчислюють управляючі напруги для лівого та правого двигунів. Динамічна модель перетворює напруги на кутові швидкості коліс, а кінематична модель - на поточні координати та орієнтацію робота. Паралельно з основним контуром управління здійснюється безперервний розрахунок енергетичних показників.

Кінематична модель описує взаємозв'язок між швидкісними характеристиками приводів робота та зміною його положення у просторі без урахування сил, що зумовлюють цей рух. Для диференційного приводу вона базується на умові кочення без ковзання та припущенні про рух по плоскій поверхні.

Миттєві зміни координат центру мас робота визначаються системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{x} = V \cdot \cos \theta, \quad \dot{y} = V \cdot \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega,$$

де V — лінійна швидкість центру мас (м/с);

ω - кутова швидкість (рад/с);

θ - поточний кут орієнтації робота відносно глобальної системи координат (рад);

x, y - поточні координати у площині руху (м).

Лінійна та кутова швидкості центру мас обчислюються через кутові швидкості лівого (ω_L) та правого (ω_R) коліс за формулами:

$$V = r \cdot (\omega_R + \omega_L) / 2, \quad \omega = r \cdot (\omega_R - \omega_L) / L, \quad (3.1)$$

де r — радіус ведучого колеса (м); L — колія між колесами (м). У розробленій Simulink-моделі пряма кінематика реалізована у вигляді окремої підсистеми, що приймає сигнали кутових швидкостей двигунів та видає вектор

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стану $[x, y, \theta, V, \omega]$ для передачі до блоку відстеження шляху та модуля візуалізації.

Зворотна кінематика вирішує задачу визначення необхідних кутових швидкостей коліс для досягнення заданих V та ω . Алгоритм Pure Pursuit формує ці значення на основі відхилення поточного положення від опорної траєкторії та попередньо налаштованої відстані заглядання вперед (look-ahead distance). Точний вибір цього параметру шляхом ітеративного підбору дозволяє забезпечити компроміс між точністю відтворення траєкторії та плавністю руху.

Динамічна модель є центральним елементом розробленої системи, оскільки саме вона відображає реальну фізику руху робота і служить основою для точного розрахунку енергоспоживання. На відміну від спрощених моделей, що використовують лише кінематичні рівняння, розроблена в межах даної роботи модель враховує сукупність внутрішніх і зовнішніх збурень, що діють на робота під час руху.

Кожен привід робота описується передавальною функцією двигуна постійного струму, яка встановлює зв'язок між прикладеною напругою і кутовою швидкістю валу:

$$G_s(s) = \omega(s)/V(s) = K / [(L \cdot s + R_a)(J_m \cdot s + b_m) + K^2],$$

де $K = K_e = K_t$ - електромеханічна константа двигуна (В·с/рад); R_a — активний опір обмотки якоря (Ом); L - індуктивність якоря (Гн); J_m - момент інерції ротора (кг·м²); b_m — коефіцієнт в'язкого тертя (Н·м·с/рад). Параметри конкретного двигуна вводяться безпосередньо у вікні Simulink-моделі.

Загальний момент навантаження на вал двигуна формується з урахуванням фізичних взаємодій, що виникають при русі робота по реальній поверхні. Рівняння моменту навантаження має вигляд:

$$T_m = (m/2) \cdot r^2 \cdot (d^2\theta/dt^2) + (m/2) \cdot g \cdot r \cdot \sin \beta + \mu_k \cdot F_N \cdot \text{sign}(v) + (F_S - F_K) \cdot e^{(-cs|v|)} + b_z \cdot \omega,$$

де m — загальна маса робота з корисним навантаженням (кг); β — кут нахилу поверхні руху (рад); μ_k — коефіцієнт кінетичного тертя поверхні; $F_N = mg \cdot \cos \beta$ — нормальна сила реакції опори; $\text{sign}(v)$ — знак миттєвої швидкості (напрямок руху); F_S та F_K — сили статичного і кінетичного тертя відповідно;

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

c_s — коефіцієнт переходу від статичного до кінетичного тертя (ефект Стрибека); b_z — коефіцієнт тертя кочення колеса.

Ефект Стрибека моделює нелінійну залежність сили тертя від швидкості при початку руху: в момент зрушення сила тертя стрибкоподібно зменшується від статичного до кінетичного значення. Цей ефект суттєво впливає на точність розрахунку пускового струму та відповідних витрат енергії. Також у моделі реалізовано обмеження максимальної швидкості ($V_{\max}$, $\omega_{\max}$) та максимального моменту ($T_{\max}$), що запобігає виходу системи за фізично можливі межі роботи приводу.

Управління швидкістю кожного колеса реалізовано за допомогою пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД). Регулятор формує управляючу напругу на основі різниці між заданою ω_{ref} та поточною ω кутовими швидкостями колеса. Закон управління описується виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot (de/dt),$$

де $e(t) = \omega_{\text{ref}} - \omega(t)$ — миттєва помилка регулювання; K_p , K_i , K_d — пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти відповідно. Налаштування коефіцієнтів здійснюється методом послідовного наближення з урахуванням характеристик динамічної моделі двигуна. Наявність двох незалежних ПІД-регуляторів (для лівого та правого коліс) забезпечує можливість різношвидкісного управління при виконанні поворотів.

Підсистема планування траєкторії формує геометрично допустимий маршрут між заданими вузловими точками (waypoints) з урахуванням можливих перешкод на карті середовища. У розробленій моделі передбачено можливість завантаження карти у форматі бінарного бітового зображення, де чорні пікселі позначають зони, недоступні для руху.

Вузлові точки маршруту вводяться у відповідний компонент Waypoints. Перед передачею до блоку відстеження шлях проходить операцію згладжування, що зменшує кількість різких змін напрямку і знижує пікові значення управляючих сигналів. Це позитивно позначається як на точності

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

відтворення траєкторії, так і на загальному енергоспоживанні системи, оскільки згладжені траєкторії вимагають менших прискорень і гальмувань.

Відстеження траєкторії здійснюється за алгоритмом Pure Pursuit, який є одним з найбільш поширених методів геометричного контролю шляху. Принцип його роботи полягає у визначенні цільової точки на опорній траєкторії, що знаходиться на відстані look-ahead distance (ld) від поточного положення робота, та обчисленні кривизни дуги кола, яка з'єднує поточне положення з цією цільовою точкою. Необхідна кутова швидкість для проходження по цій дузі визначається як:

$$\omega = 2 \cdot V \cdot \sin(\alpha) / ld,$$

де α — кут між вектором орієнтації робота та напрямком на цільову точку; V — поточна лінійна швидкість. Значення ld є ключовим налаштувальним параметром алгоритму: при малих значеннях робот точніше відтворює геометрію траєкторії, але схильний до нестійкості; при великих — рух стає плавнішим, але зростає відхилення від опорної лінії, особливо на ділянках з великою кривизною.

Оцінка енергоспоживання є одним з ключових функціональних завдань розробленої моделі. Точність цієї оцінки безпосередньо визначає ефективність планування маршрутів з урахуванням енергетичних обмежень, а також дозволяє прогнозувати час автономної роботи від бортового джерела живлення. Запропонована модель принципово відрізняється від аналогів тим, що охоплює всі три складові споживання енергії в роботизованій системі.

Загальне енергоспоживання системи визначається як сума трьох компонентів (рисунк 3.3):

$$E_{total} = E_{sensor} + E_{control} + E_{motion}.$$

Сенсорна підсистема може функціонувати у двох режимах: активному (наприклад, ультразвуковий або лідарний сенсор у режимі постійного сканування) та пасивному (наприклад, камера з обробкою кадрів). Енергія, споживана сенсорами, розраховується залежно від режиму та поточної швидкості руху:

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{sensor}} = (1/V_{\text{max}}) \cdot \int (v \cdot P_{\text{sensor}}) dt \quad \text{при } v > 0,$$

де P_{sensor} — миттєва споживана потужність сенсора (Вт); V_{max} — максимальна лінійна швидкість (м/с). При $v \leq 0$ (зупинка або реверс) сенсорна енергія вважається рівною нулю, що відповідає реальному режиму автоматичного вимкнення сенсорів у стані спокою.

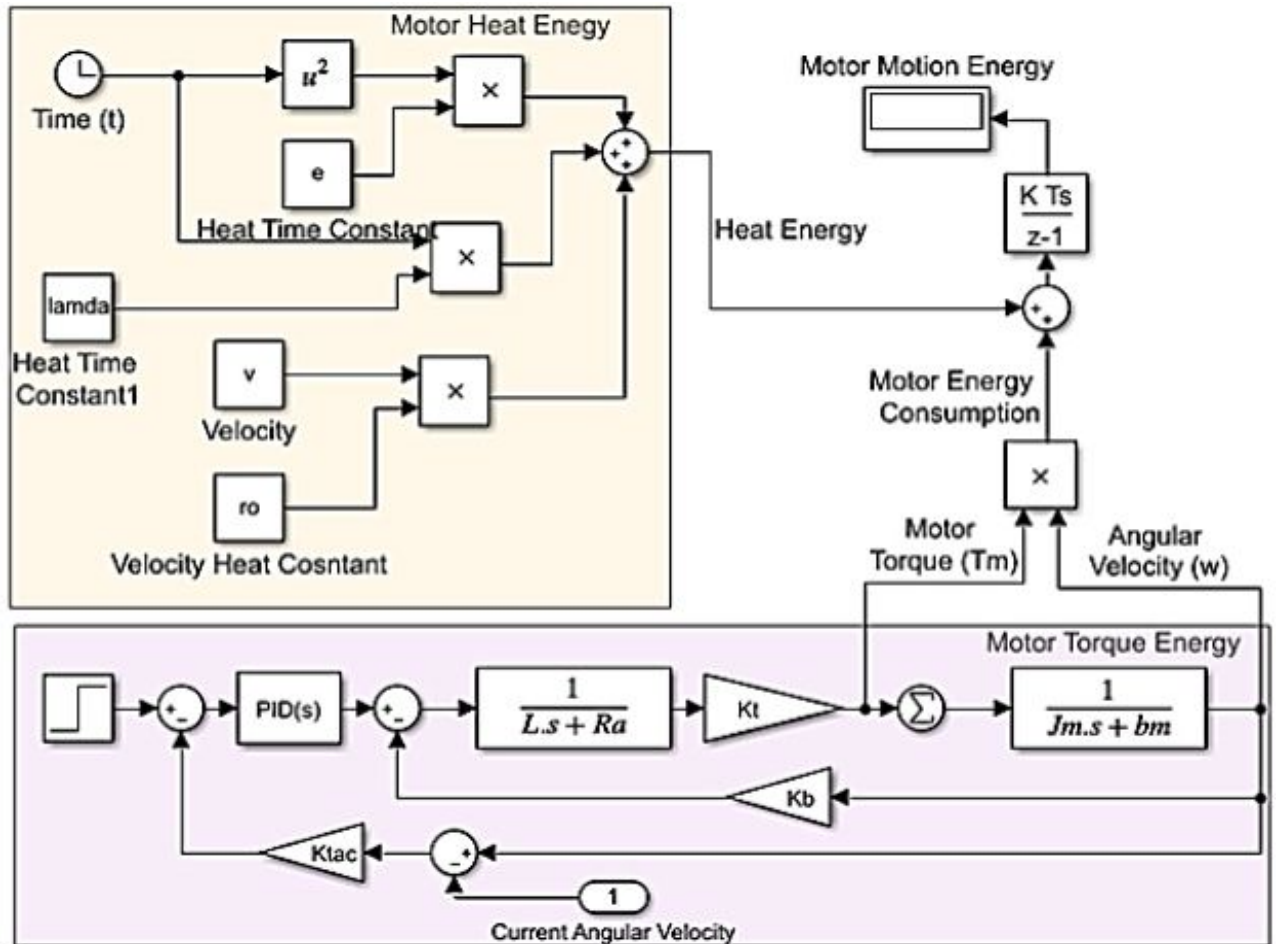


Рисунок 3.3-Енергетична модель керування двигуном колісного робота

Керуючий комп'ютер (мікроконтролер або одноплатний комп'ютер) споживає різну потужність залежно від стану: режим очікування (standby), режим завантаження (startup) та стабільний режим роботи. Математичний опис кожного режиму:

- режим очікування: $E_{\text{standby}} = P_{\text{standby}} \cdot \Delta t$;
- режим завантаження: $E_{\text{startup}} = \int (\phi \cdot \Delta V + t^2/10 + P_{\text{standby}}) dt$;
- стабільний режим: $E_{\text{stable}} = \int (P_{\text{standby}} + t^2) dt$,

де ϕ — енергетичний коефіцієнт запуску контролера; ΔV — миттєва зміна швидкості; P_{standby} — базова потужність споживання в режимі

очікування (Вт). Такий деталізований опис режимів роботи керуючої електроніки дозволяє точно врахувати пускові піки споживання, що є критичним для систем з обмеженою ємністю бортового акумулятора.

Моторна складова є найбільш складною та обчислювально інтенсивною частиною моделі, оскільки включає два взаємопов'язаних компоненти: корисну механічну роботу (E_s) та теплові втрати в обмотці двигуна (E_h).

Корисна механічна робота визначається через інтеграл потужності по часу:

$$E_s = P_k = \int T_{\max}(t) \cdot \omega(t) dt,$$

де P_k обмежується значенням $P_{\max} = T_{\max} \cdot \omega_{\max}$ при досягненні граничних швидкостей. Теплові втрати апроксимуються поліноміальною залежністю від часу та швидкості:

$$E_h = \int (\varepsilon \cdot t^2 + \sigma \cdot v + \lambda \cdot t) dt,$$

де ε та λ — теплові часові константи (Вт/с²); σ — константа теплових втрат від швидкості (Вт·с/м). Загальна моторна енергія: $E_{\text{motion}} = E_s + E_h$. Таке розділення дозволяє аналізувати не лише загальний баланс, але й співвідношення між корисною роботою та тепловими втратами при різних режимах навантаження.

Точність запропонованої моделі оцінки енергоспоживання підтверджена в попередніх дослідженнях: похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями не перевищує 1,44%, що відповідає точності оцінки 98,56%. Це суттєво вище, ніж показники аналогічних моделей з літератури, що не враховують ефект Стрибека, нахил поверхні або споживання сенсорної підсистеми.

Усі параметри розробленої моделі вводяться безпосередньо у блоках Simulink, що забезпечує зручну модифікацію без потреби редагувати програмний код. Ключові групи параметрів охоплюють: характеристики двигуна (R_a , L_a , K , J_m , b_m), механічні параметри робота (m , r , L , $V_{\max}$, $\omega_{\max}$, $T_{\max}$), параметри поверхні руху (β , μ_s , μ_k , c_s , b_z), параметри енергетичної

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделі (P_{sensor} , P_{standby} , ϕ , ϵ , σ , λ) та параметри алгоритму відстеження (l_d).

Для встановлення пакету Mobile Robotics Simulation Toolbox необхідно запустити скрипт `startMobileRoboticsSimulationToolbox.m`. Після цього стає доступним блок Robot Visualizer, що забезпечує анімацію руху робота у двовимірному просторі із відображенням опорної та фактичної траєкторій. Одночасно в окремих вікнах виводяться часові діаграми швидкостей, кутів орієнтації та трьох складових енергоспоживання, що надає дослідникові вичерпну картину динаміки системи в реальному часі симуляції.

Для підключення фізичного робота в модель включена підсистема `rasp_encoder_1.slx`, що зчитує дані енкодерів двигунів через інтерфейс Raspberry Pi і замінює блок Ktac у структурі ланцюга зворотного зв'язку. Така архітектура забезпечує плавний перехід від режиму симуляції до режиму управління реальним роботом без принципових змін у структурі моделі.

У роботі розроблено та описано Simulink-модель диференційного мобільного робота, що охоплює всі ключові підсистеми: кінематичну та динамічну моделі, ПД-регулятор швидкості, алгоритм планування і відстеження траєкторії Pure Pursuit, а також розширену модель оцінки енергоспоживання.

3.2 Реалізація системи керування станом коліс та приводів мобільного робота

Кінематична поведінка колісного мобільного робота безпосередньо визначається співвідношенням кутових швидкостей лівого та правого ведучих коліс. У випадку їх однакових значень платформа здійснює прямолінійний рух, тоді як різниця швидкостей призводить до виникнення обертального руху навколо миттєвого центру обертання. Такий центр розташовується на осі, перпендикулярній до напрямку руху, і характеризується радіус-вектором R_{cR_cRc} , який визначає положення точки, відносно якої відбувається обертання системи (рисунок 3.4).

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Радіус траєкторії руху робота R_r залежить від геометричних параметрів платформи, зокрема міжосьової відстані між колесами, а також від різниці їх лінійних швидкостей. Чим більшою є ця різниця, тим меншим стає радіус повороту, аж до режиму розвороту на місці при протилежному напрямку обертання коліс. Графічна інтерпретація даної моделі представлена на рисунку 3.1, де відображено взаємозв'язок між швидкостями коліс та траєкторією руху робота.

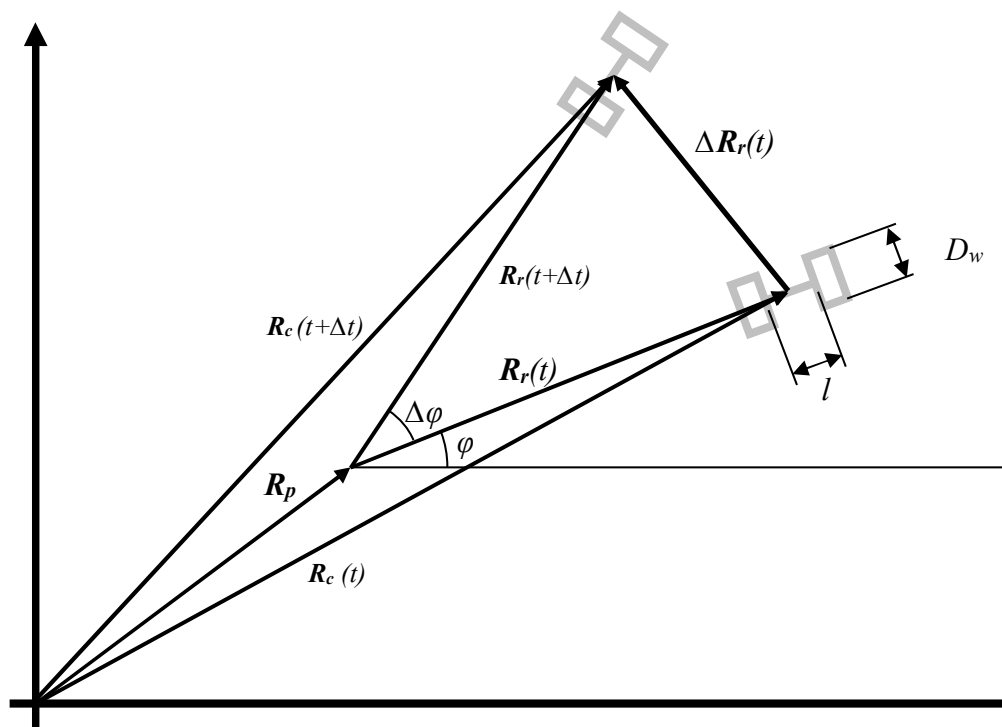


Рисунок 3.4- Графічна модель руху колісного робота.

З точки зору системи керування, формування необхідного режиму руху реалізується шляхом генерації керуючих сигналів для електроприводів, що забезпечують обертання коліс. Для цього використовується замкнений контур регулювання швидкості, в якому фактичні значення кутових швидкостей, отримані з енкодерів, порівнюються із заданими. На основі цієї різниці формується коригувальний сигнал, що подається на двигуни через силові драйвери.

Особливістю реалізації є розділення керування на два незалежні канали — лінійний і кутовий. Лінійна швидкість визначає поступальний рух робота, тоді як кутова відповідає за зміну орієнтації. Таке представлення дозволяє

перейти від високорівневих команд (рух до точки, обхід перешкод) до безпосереднього керування колесами через обернені кінематичні залежності. Зокрема, швидкості коліс визначаються як:

$$v_L = v - \frac{\omega L}{2}, \quad v_R = v + \frac{\omega L}{2}$$

де v — лінійна швидкість, ω — кутова швидкість, L - відстань між колесами.

У реальних умовах функціонування на процес руху суттєво впливають додаткові фактори, такі як нерівності поверхні, сили тертя, інерційні навантаження та затримки в системі керування. Тому сучасні системи керування доповнюються регуляторами типу PID, які забезпечують адаптацію до змінних умов і підвищують точність відпрацювання заданих режимів руху. Крім того, використання сенсорних систем (енкодери, IMU, лідара) дозволяє уточнювати оцінку стану робота та реалізовувати алгоритми зворотного зв'язку більш високого рівня, зокрема SLAM і планування траєкторії.

Таким чином, реалізація системи керування станом коліс та двигунів базується на поєднанні кінематичних співвідношень, динамічних моделей приводу та алгоритмів регулювання, що забезпечує ефективне та стабільне функціонування мобільного робота в умовах змінного середовища.

Розглянемо узагальнену модель руху колісного мобільного робота, яка враховує геометричні та кінематичні параметри платформи. До основних характеристик системи належать: D_r - діаметр колеса, L — міжосьова відстань між лівим і правим колесами, ω_1 та ω_2 — кутові швидкості відповідно лівого і правого коліс, а також φ — кут орієнтації робота відносно глобальної системи координат. Вказані параметри формують базис для опису траєкторії руху та визначення положення платформи у просторі.

У процесі руху кожне колесо проходить певний шлях, який можна описати як довжину дуги відповідного кола. Зокрема, для правого колеса довжина пройденої дуги Δs_2 безпосередньо пов'язана з його кутовою швидкістю та радіусом колеса. Оскільки радіус колеса визначається як $R = D_r/2 =$ переміщення точки контакту колеса з поверхнею за малий інтервал часу можна

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подати як добуток кутової швидкості на радіус. Таким чином, зміна положення правого колеса вздовж траєкторії, що відповідає довжині дуги, визначається співвідношенням:

$$v_L = v - \frac{\omega L}{2}, \quad v_R = v + \frac{\omega L}{2}$$

де Δt — малий інтервал часу, протягом якого відбувається переміщення. Відповідно, аналогічне співвідношення може бути записане і для лівого колеса.

Зміна орієнтації робота $\Delta\varphi$ визначається різницею пройдених шляхів правого та лівого коліс, що обумовлює обертальний рух платформи. Фізично це означає, що при нерівних швидкостях коліс робот здійснює поворот, радіус якого залежить від співвідношення цих швидкостей та геометричних параметрів конструкції.

Отже, параметр $\Delta\varphi$, який характеризує зміну кута орієнтації робота, може бути визначений на основі різниці лінійних переміщень коліс, що буде формалізовано у рівнянні (3.1). Такий підхід дозволяє перейти від локальних характеристик руху окремих коліс до глобального опису траєкторії мобільної платформи.

$$L_{a1} = \frac{\omega_1 \Delta t}{2\pi} \cdot \pi D \quad (3.1)$$

Використовуючи визначене значення довжини дугового переміщення, можна перейти до обчислення зміни кутового положення $\Delta\varphi$. Для цього отриманий вираз нормується відносно довжини колової траєкторії, по якій здійснюється обертання колеса, що дозволяє встановити зв'язок між лінійним переміщенням і кутовою зміною. Відповідне аналітичне співвідношення подано у рівнянні (3.2).

$$\Delta\varphi = \frac{D_r \omega_1 \Delta t}{2(|R_r(t)| + \frac{l}{2})}, \quad (3.2)$$

де $|R_r(t)| + l/2$ - радіус обертання правого колеса.

Аналогічний підхід застосовується і для визначення зміни кутового положення $\Delta\varphi$ для лівого колеса. У цьому випадку відмінність полягає лише у

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

використанні відповідного радіуса траєкторії обертання, що враховує геометрію руху даного колеса. Відповідна залежність наведена у рівнянні (3.3).

$$\Delta\varphi = \frac{D_r \omega_2 \Delta t}{2(|R_r(t)| - \frac{l}{2})} \quad (3.3)$$

На основі співвідношення (3.3), що визначає зміну кутової орієнтації $\Delta\varphi$ можна отримати вираз для модуля радіуса траєкторії $|R_r|$. Для цього необхідно прирівняти відповідні праві частини рівнянь, що описують рух обох коліс, і виконати алгебраїчні перетворення з метою виділення шуканого параметра.

$$|R_r(t)| = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \frac{l}{2}$$

Після підстановки знайденого виразу для $|R_r|$ у будь-яке з рівнянь, що описують зміну кута $\Delta\varphi$, та виконання необхідних алгебраїчних перетворень і скорочень, отримується узагальнена формула для визначення $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{D_r}{2l} \cdot (\varpi_2 - \varpi_1) \cdot \Delta t$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{D_r}{2l} \cdot (\varpi_2 - \varpi_1)$$

На основі визначених параметрів руху окремих коліс формується математична модель, що описує просторове положення мобільного робота. Для коректного задання початкового стану системи необхідно визначити положення кожного з коліс у вигляді радіус-векторів R_{01} і R_{02} , які задають їх координати у вибраній системі відліку. Геометричний центр платформи визначається як функція цих векторів, зокрема через їх взаємне розташування, що дозволяє встановити координати центральної точки робота.

З метою опису орієнтації робота у площині вводиться оператор повороту, який реалізується у вигляді матриці обертання двовимірного простору на кут φ . Дана матриця $T(\varphi)$ забезпечує перехід між локальною системою координат робота та глобальною системою, що є необхідним для коректного визначення положення платформи під час руху.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

З огляду на те, що інтервал часу Δt є достатньо малим, рух мобільного робота доцільно апроксимувати як переміщення вздовж дуги кола зі сталим радіусом $|R_r|$. При цьому центр відповідної дуги визначається радіус-вектором R_p , який задає положення миттєвого центру обертання. За таких умов виконується співвідношення, наведене у рівнянні (3.4).

$$R_p(t) = R_p(t + \Delta t),$$

$$R_c(t) + \frac{|R_r(t)|}{l} T(\varphi)(P_{01} - P_{02}) = R_c(t) + \Delta R_r(t) + \frac{|R_r(t)|}{l} T(\Delta\varphi) T(\varphi)(P_{01} - P_{02}). \quad (3.4)$$

З рівняння (3.4) можна виразити $\Delta R_r(t)$:

$$\Delta R_r(t) = \frac{|R_r(t)|}{l} (E - T(\Delta\varphi)) T(\varphi)(P_{01} - P_{02}).$$

На даному етапі виконується підстановка раніше отриманих аналітичних виразів для $|R_r|$ та $\Delta\varphi$ у загальне співвідношення, після чого здійснюється його спрощення з урахуванням малості кута повороту. За умови $\Delta\varphi \rightarrow 0$ доцільно застосувати лінійні наближення тригонометричних функцій, а саме: $\Delta\varphi$ ($\sin(\Delta\varphi) = \Delta\varphi$, $\cos(\Delta\varphi) = 1$). що дозволяє суттєво спростити математичний опис руху.

У результаті виконаних перетворень отриманий вираз для вектора переміщення ΔR може бути декомпозований на складові вздовж координатних осей x та y . Подальший перехід до границі при $\Delta t \rightarrow 0$ дає змогу представити ці залежності у диференціальній формі, що є основою для побудови системи рівнянь руху мобільного робота.

$$\begin{cases} \left. \frac{dR_r}{dt} \right|_x = \frac{D_r(\omega_1 + \omega_2)}{4l} [-\sin \varphi (P_{01x} - P_{02x}) + \cos \varphi (P_{01y} - P_{02y})] \\ \left. \frac{dR_r}{dt} \right|_y = \frac{D_r(\omega_1 + \omega_2)}{4l} [-\cos \varphi (P_{01x} - P_{02x}) - \sin \varphi (P_{01y} - P_{02y})] \end{cases}$$

У межах розробленої моделі функціонування приводу використовуються співвідношення, що встановлюють зв'язок між електричними та механічними параметрами двигунів, зокрема між струмами в обмотках і кутовою швидкістю їх обертання. Електропривід розглядається як електричне коло, що

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеризується еквівалентним опором R та індуктивністю L , які визначають динаміку зміни струму у часі. Напруга живлення $U(t)$ є змінною величиною та формується системою керування на основі сигналів зворотного зв'язку від сенсорів, що відображають поточний стан роботи.

Під дією електричного струму в обмотках двигунів генерується електромагнітний момент, який передається на колеса та забезпечує їх обертання. У свою чергу, швидкість обертання коліс визначає поступальний і обертальний рух мобільної платформи. Важливим фактором є наявність маси робота M_r , що зумовлює інерційні властивості системи і впливає на процеси розгону та гальмування. Таким чином, динаміка руху визначається сукупною дією електромагнітних, механічних і інерційних процесів.

З урахуванням зазначених факторів робота електроприводу описується системою диференціальних рівнянь, що відображають взаємозв'язок між напругою, струмом, моментом та кутовою швидкістю обертання двигунів. Відповідні залежності наведені у системі рівнянь (3.5), яка використовується як базова математична модель для подальшого аналізу та синтезу системи керування.

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = -\frac{R}{L}I + \frac{1}{L}U(t), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{-k_1}{M_r}\omega + \frac{k_2}{M_r}I(t), \end{cases} \quad (3.5)$$

Коефіцієнти k_1 і k_2 у наведеній моделі визначаються експериментальним шляхом і характеризують перетворення електричних параметрів у механічні, зокрема зв'язок між струмом у обмотках та створюваним обертальним моментом, а також між швидкістю обертання і протидіючими електромагнітними ефектами.

Сукупність рівнянь (3.5) формує цілісну математичну модель, яка дозволяє описати динаміку руху колісного робота як єдину систему. Для визначення положення платформи у просторі вектор переміщення її геометричного центру $\Delta R_r(t)$ доцільно представити у вигляді проєкцій на

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

координатні осі, що забезпечує перехід від векторного опису до скалярних рівнянь руху вздовж осей x та y .

Оскільки рух робота забезпечується двома незалежними електроприводами, кожен із них описується парою диференціальних рівнянь: одне визначає зміну струму в обмотці, а інше — кутову швидкість відповідного колеса. Таким чином, для двох двигунів формується система з чотирьох рівнянь, що описують електромеханічну динаміку приводу.

Додатково до цього враховуються рівняння кінематичного опису руху, які пов'язують швидкості коліс із переміщенням і орієнтацією робота у просторі. У результаті об'єднання динамічних і кінематичних залежностей формується розширена система, що складається із семи рівнянь, яка забезпечує повний опис стану мобільної платформи в часі та може бути використана для подальшого аналізу, моделювання та синтезу системи керування.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR_r}{dt} \Big|_x = \frac{D_r (\omega_1 + \omega_2)}{4l} [\sin \varphi(P_{01x} - P_{02x}) + \cos \varphi(P_{01y} - P_{02y})], \\ \frac{dR_r}{dt} \Big|_y = \frac{D_r (\omega_1 + \omega_2)}{4l} [-\cos \varphi(P_{01x} - P_{02x}) + \sin \varphi(P_{01y} - P_{02y})], \\ \frac{d\phi}{dt} = \frac{D_r}{2l} \cdot (\varpi_2 - \varpi_1), \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{-k_{11}}{M_r} \omega_1 + \frac{k_{12}}{M_r} I_1(t), \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{-k_{21}}{M_r} \omega_2 + \frac{k_{22}}{M_r} I_2(t), \\ \frac{dI_1}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} I_1 + \frac{1}{L_1} U_1(t), \\ \frac{dI_2}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} I_2 + \frac{1}{L_2} U_2(t), \end{array} \right.$$

Для опису часової еволюції стану мобільного робота математична модель подається у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь, для якої формується задача Коші. Такий підхід дає змогу однозначно визначити подальшу поведінку системи на основі заданого початкового стану. У межах реалізації моделі в середовищі Mathcad необхідно попередньо задати початкові умови, до яких належать просторове положення платформи, тобто її орієнтація

та координати X і Y , початкові кутові швидкості обертання лівого і правого коліс, а також початкові значення струмів у колах електродвигунів. Саме ці параметри визначають стартовий режим функціонування системи та є базою для подальшого чисельного інтегрування.

Модель системи керування роботом формується шляхом опису структури нейромережевого регулятора, вагових коефіцієнтів окремих нейронів і функцій, що реалізують оброблення сигналів із сенсорів. Такий підхід дозволяє врахувати адаптивний характер керування та забезпечити узгодження між вхідними даними від датчиків і керуючими впливами, що подаються на приводи. Для чисельного розв'язання поставленої задачі Коші в середовищі Mathcad використовується метод Рунге–Кутти, реалізований у пакеті у вигляді окремої функціональної процедури. У симуляторі, своєю чергою, інтегрування системи диференціальних рівнянь здійснюється методом Ейлера, який фактично є найпростішим різновидом методів Рунге–Кутти першого порядку. Оскільки в Mathcad відсутня деталізована інформація щодо порядку застосованого методу, узгодження результатів моделювання між різними середовищами досягається шляхом підбору величини кроку інтегрування, тобто зміною параметра точності обчислень.

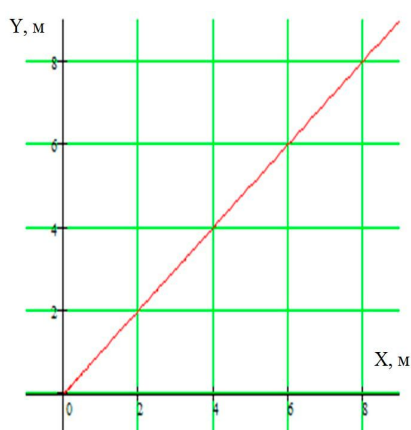
Для перевірки адекватності побудованої математичної моделі доцільно провести серію чисельних експериментів за різних значень напруги живлення двигунів і виконати аналіз отриманих траєкторій, швидкісних характеристик та електричних параметрів. Такий підхід дає можливість оцінити, наскільки коректно модель відтворює типові режими руху двоколісного робота. Загалом для такої платформи можна виокремити три базові режими функціонування.

Перший режим відповідає прямолінійному руху та реалізується за умови однакових напруг на обох двигунах. Другий режим пов'язаний з розворотом на місці, коли напруги на приводах однакові за модулем, але протилежні за знаком. Третій режим описує рух по криволінійній траєкторії, зокрема по колу, і виникає при неоднакових значеннях напруг на лівому та правому двигунах.

Імітаційні дослідження виконано в середовищі Mathcad, що дозволило

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

простежити динаміку зміни координат, кутової орієнтації, швидкостей коліс і струмів у приводах. Як приклад розглянемо режим прямолінійного руху, за якого робот на початковий момент часу розташований у центрі координат, а його початкова орієнтація становить 45градусів. На обидва двигуни в такому випадку подається однакова напруга величиною 1,5 В. За цих умов можна проаналізувати характер зміни основних параметрів системи та дослідити фізичні процеси, що відбуваються під час руху платформи, відповідно до результатів, наведених на рисунку 3.5, а, б, в.

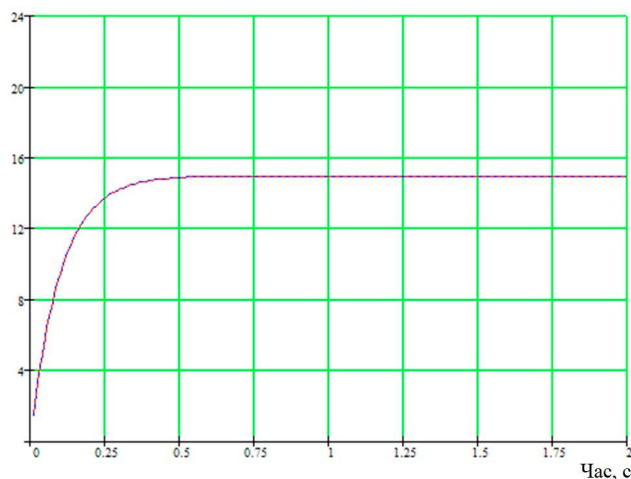


а)



б)

Сила струму,
мА



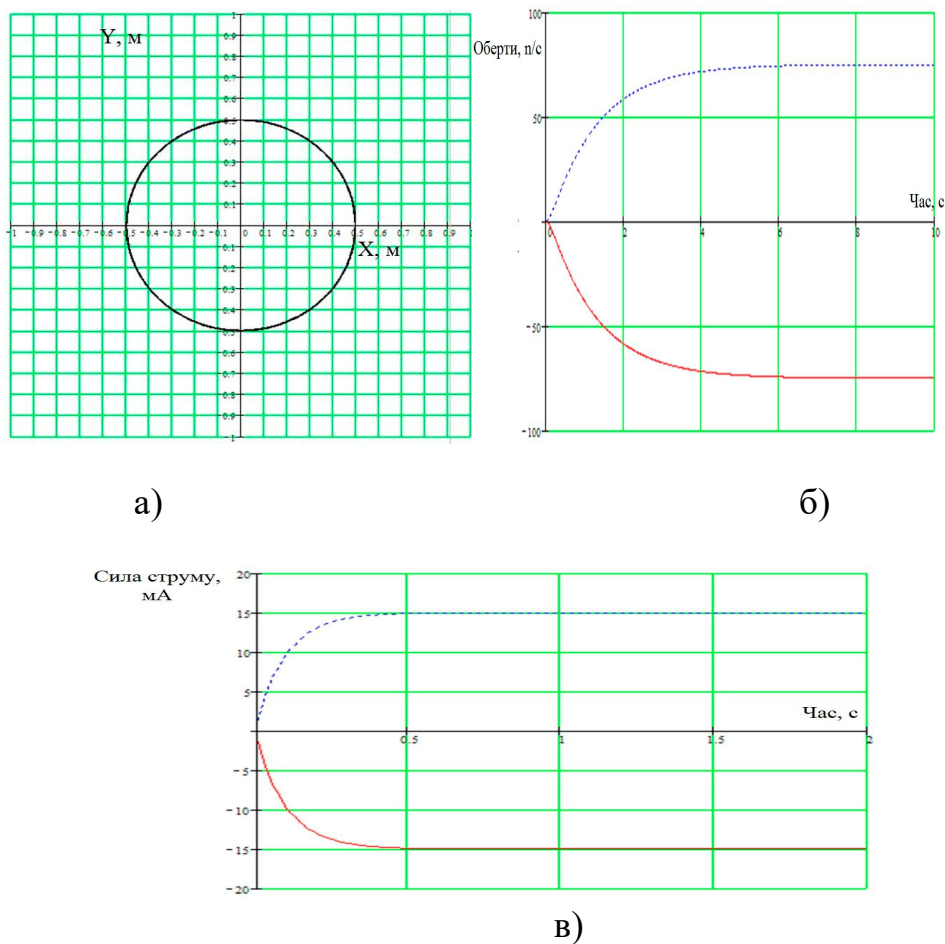
в)

а) траєкторія переміщення робота відносно центра координат; б) зміна кутових швидкостей обертання лівого та правого коліс у часі; в) динаміка струмів, що подаються на електродвигуни.

Рисунок 3.5 – Ілюстрація результатів математичного моделювання прямолінійного руху мобільного робота.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Режим розвороту робота навколо власної вертикальної осі, який реалізується за умови подачі на лівий і правий двигуни напруг, однакових за абсолютною величиною, але протилежних за знаком. У цьому випадку робот не здійснює поступального переміщення в площині, а виконує обертання на місці відносно свого геометричного центра. Для аналізу даного режиму приймається, що у початковий момент часу платформа розташована в центрі координат, а її орієнтація відносно вибраної системи відліку становить 45 градусів. На обидва електроприводи подається напруга величиною 1,5 В, однак з протилежною полярністю, унаслідок чого колеса обертаються в різні боки. За таких умов доцільно проаналізувати характер зміни координатного положення, кутових швидкостей коліс і струмів у приводах, що відображено на рисунку 3.6, а, б, в.

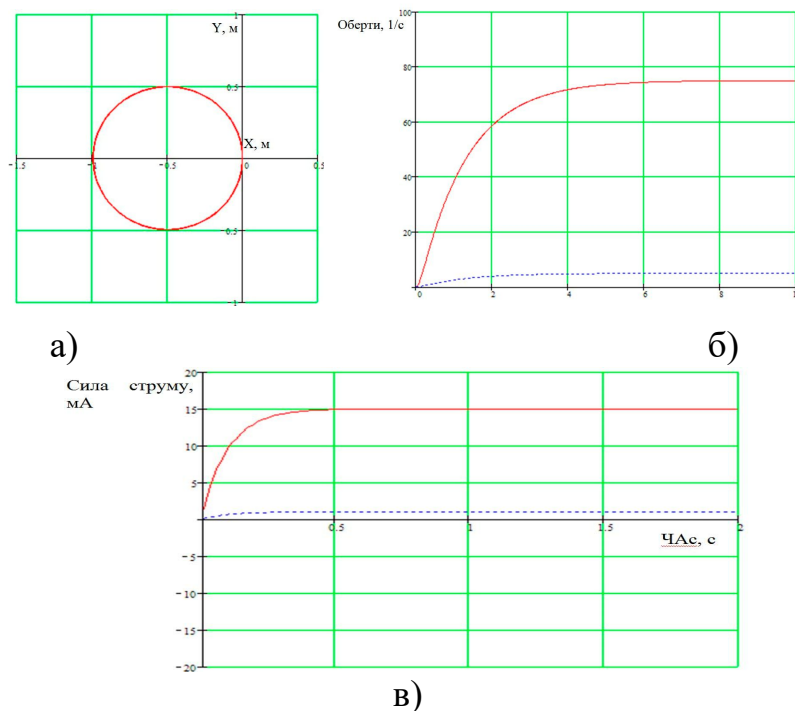


а) рух робота по центру, б) швидкість обертання коліс, в) подача струму на двигуни

Рисунок 3.6- Результати математичного моделювання режиму обертання мобільного робота на місці.

Розглянемо режим криволінійного руху мобільного робота, який реалізується за умови подачі на лівий і правий електродвигуни різних за величиною напруг. У такому випадку кутові швидкості коліс стають неоднаковими, внаслідок чого платформа втрачає прямолінійний характер переміщення і починає рухатися по дузі кола з певним радіусом кривизни. Для аналізу цього режиму приймається, що в початковий момент часу робот розташований у центрі координат, а його орієнтація відносно глобальної системи координат становить 45 градусів. На один із двигунів подається напруга 1,5 В, тоді як на інший — 0,1 В, що створює суттєву різницю у швидкостях обертання коліс і, відповідно, формує оберально-поступальний характер руху.

За таких умов доцільно дослідити зміну просторового положення робота, динаміку кутових швидкостей лівого та правого коліс, а також характер зміни струмів у приводах. Аналіз цих параметрів дозволяє оцінити вплив асиметричного керування двигунами на траєкторію руху та загальну динаміку системи. Відповідні результати моделювання наведені на рисунку 3.7, а, б, в.



а) рух робота по центру, б) швидкість обертання коліс, в) подача струму на двигуни

Рисунок 3.7-Математична модель руху робота по колу.

У процесі моделювання було встановлено, що адекватність моделі значною мірою залежить від урахування інерційних властивостей системи, електричних характеристик двигунів, а також зовнішніх факторів, таких як сили тертя та геометричні параметри платформи. Застосування чисельних методів інтегрування, зокрема методу Рунге–Кутти та його спрощених реалізацій, дозволило отримати стабільні та достовірні результати моделювання.

Проведені імітаційні експерименти підтвердили коректність побудованої моделі. Для різних режимів роботи, що задаються відповідними значеннями напруг на двигунах, отримано очікувані траєкторії руху та характерні залежності швидкостей і струмів. Зокрема, при однакових напругах забезпечується прямолінійний рух, при протилежних — обертання навколо власної осі, а при різних значеннях — рух по колу з визначеним радіусом.

3.3 Імітаційне дослідження та аналіз ефективності системи керування колісним роботом за умов впливу інтенсивних радіозавад

На базі сформованої імітаційної моделі колісного робота, реалізованої у середовищі MATLAB Simulink, здійснюється моделювання впливу керуючого сигналу, а також аналіз реакції системи на наявність зовнішніх збурень, зокрема перешкод на траєкторії руху. У ході дослідження оцінюються динамічні характеристики системи та її здатність до стабільного функціонування в різних умовах експлуатації. Зокрема, у випадку відсутності перешкод і шумових складових, часовий перебіг сформованого сигналу має регулярний і прогнозований характер, що відображено на рисунку 3.12.

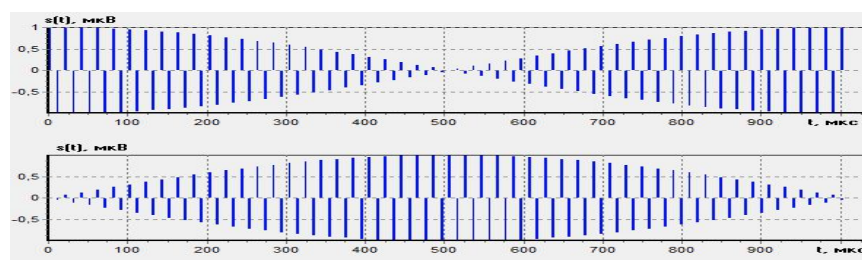


Рисунок 3.8- Реалізація сигналу у часі.

На верхньому графіку відображено дійсну складову сигналу, тоді як нижній графік ілюструє його уявну частину, що дозволяє комплексно оцінити структуру процесу в часовій області. Представлений далі процес, наведений на рисунку 3.9, формується як суперпозиція трьох основних компонентів: корисного сигналу, зовнішньої перешкоди та випадкової шумової складової. Така декомпозиція дає можливість детально проаналізувати вплив кожного з факторів на загальну якість функціонування системи.

Для кількісної оцінки ефективності роботи моделі доцільно використовувати енергетичні співвідношення, зокрема відношення потужності корисного сигналу до сумарної потужності завад і шуму, а також співвідношення між шумовою складовою та перешкодою. Ці показники дозволяють визначити рівень завадостійкості системи, її чутливість до зовнішніх впливів і здатність зберігати стабільність при роботі в умовах невизначеності. Додатково аналіз таких характеристик може бути використаний для оптимізації параметрів фільтрації сигналів та підвищення точності керування мобільним роботом.

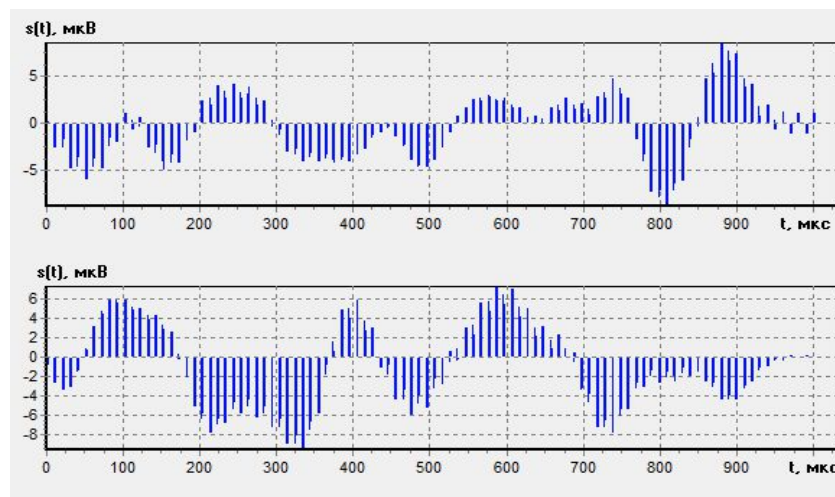


Рисунок 3.9 – Часова реалізація сигналу з урахуванням впливу перешкод та шумових складових.

Змодельований процес характеризується низкою параметрів, що визначають його часову та спектральну структуру. Зокрема, амплітуда окремого імпульсу становить 1 мкВ, а його тривалість дорівнює 2 мкс. У межах сформованої послідовності кількість імпульсів у пачці прийнята рівною 100, що забезпечує можливість дослідження процесу в умовах багатоімпульсного

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режиму. Як завадова складова використовується перешкода з гаусівським законом розподілу спектра, що є характерним для значної кількості реальних флуктуаційних впливів. При цьому ширина спектра такої перешкоди становить 20 кГц, а її доплерівська частота прийнята рівною 0 кГц, тобто у межах моделі перешкода не має частотного зміщення, пов'язаного з відносним рухом джерела або приймача. Діапазон однозначного визначення доплерівських частот для розглянутого процесу встановлено в межах від 0 до 100 кГц, що дає змогу оцінювати спектральні властивості сигналу в достатньо широкій області частот.

Амплітудний спектр сформованого процесу наведено на рисунку 3.10 Він відображає сукупність амплітуд окремих гармонічних складових, що формують сигнал, і дозволяє оцінити розподіл енергії за частотою. Як правило, такий спектр подається у вигляді набору вертикальних ліній, висота яких у вибраному масштабі відповідає амплітудам окремих гармонік. Аналіз амплітудного спектра є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє встановити домінуючі частотні компоненти процесу, оцінити вплив завадової складової на структуру сигналу, а також зробити висновки щодо потенційної ефективності методів фільтрації та подальшої обробки даних у системі керування або в інформаційно-вимірювальному каналі.

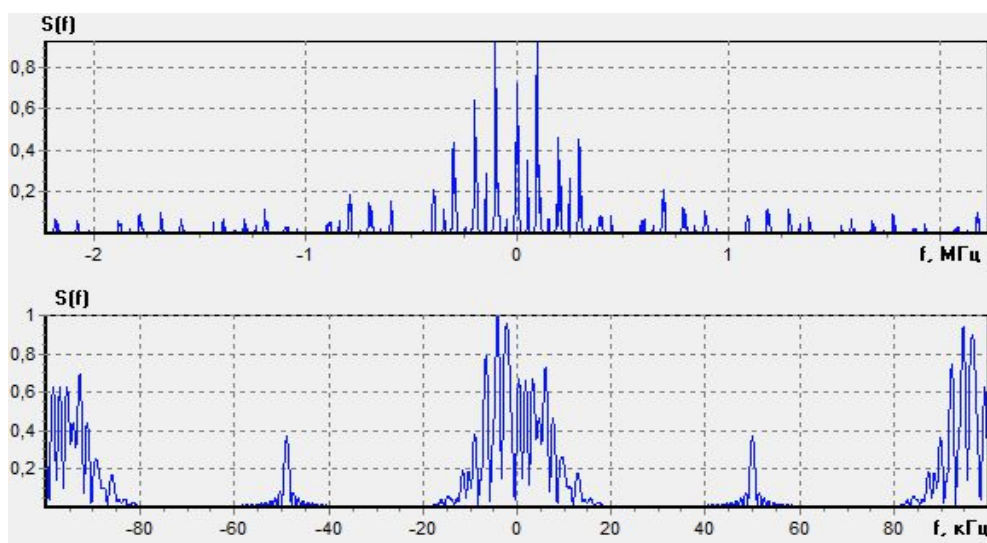


Рисунок 3.10- Амплітудний спектр процесу.

Положення кожної точки або спектральної лінії на горизонтальній осі визначається відповідною частотою, тобто номером гармонічної складової, що

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

входить до структури сигналу. Відстань між сусідніми спектральними компонентами є сталою і дорівнює частотному інтервалу Δf , який збігається з частотою першої гармоніки. Така дискретна структура спектра є характерною для імпульсних і періодичних процесів та відображає закономірний розподіл енергії сигналу в частотній області. Аналіз взаємного розташування спектральних ліній дає змогу оцінити частотну організацію процесу, його періодичність та ступінь впливу завадових компонентів на окремі гармоніки.

Автокореляційна функція досліджуваного процесу наведена на рисунку 3.11. Вона є важливою характеристикою, оскільки відображає ступінь подібності сигналу до самого себе при різних часових зсувах. Дослідження автокореляційної функції дозволяє оцінити часову структуру процесу, виявити характерні інтервали повторюваності, а також визначити рівень впливу шуму і перешкод на збереження внутрішньої узгодженості сигналу.

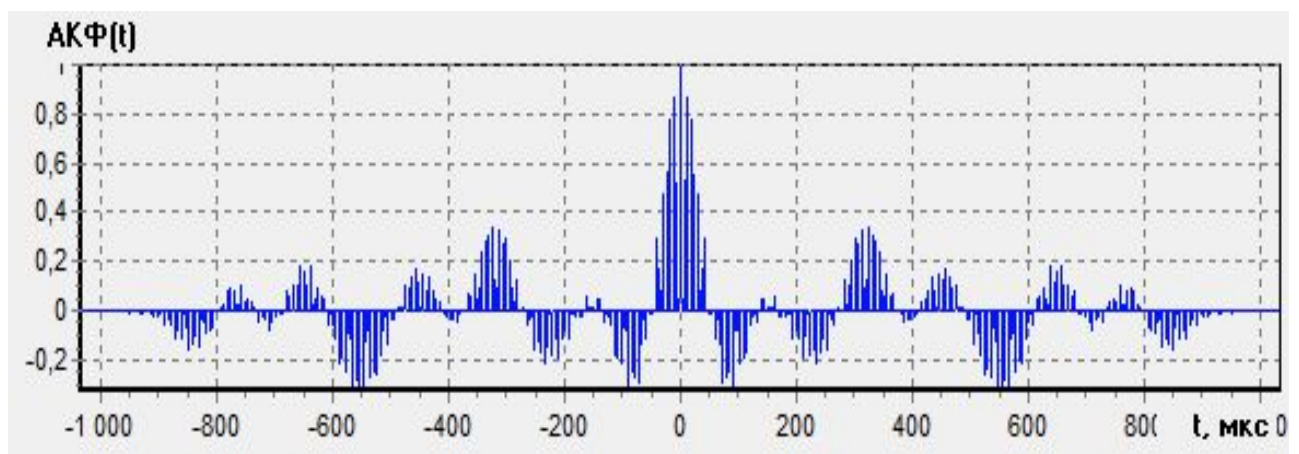


Рисунок 3.11- Авто-кореляційна функція процесу

Автокореляційна функція є однією з ключових характеристик сигналу, яка відображає ступінь його подібності до самого себе при різних часових зсувах. Завдяки цьому вона дозволяє виявляти повторювані фрагменти сигналу, оцінювати його періодичність, а також визначати наявність прихованих гармонічних складових, зокрема несучої частоти, навіть за умов значного рівня шумових завад. Використання автокореляційного аналізу є особливо доцільним у випадках, коли спектральні методи не дають достатньої точності через вплив випадкових коливань або широкосмугових перешкод.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

Ефективність придушення завад у системах обробки сигналів прийнято оцінювати за умовою, що рівень перешкод після обробки знижується до рівня шумової складової або стає з нею співрозмірним. У такому випадку вважається, що вплив завад на корисний сигнал є мінімальним і не призводить до суттєвого спотворення інформації.

На рисунку 3.12 наведено залежність коефіцієнта придушення перешкод від порядку використовуваного фільтра. З аналізу цієї залежності можна зробити висновок, що зі зростанням порядку фільтра підвищується його здатність до селективного пригнічення небажаних компонентів сигналу. Разом з тим, збільшення порядку фільтра може супроводжуватися ускладненням структури системи та зростанням обчислювальних витрат, що необхідно враховувати при практичній реалізації алгоритмів обробки сигналів.

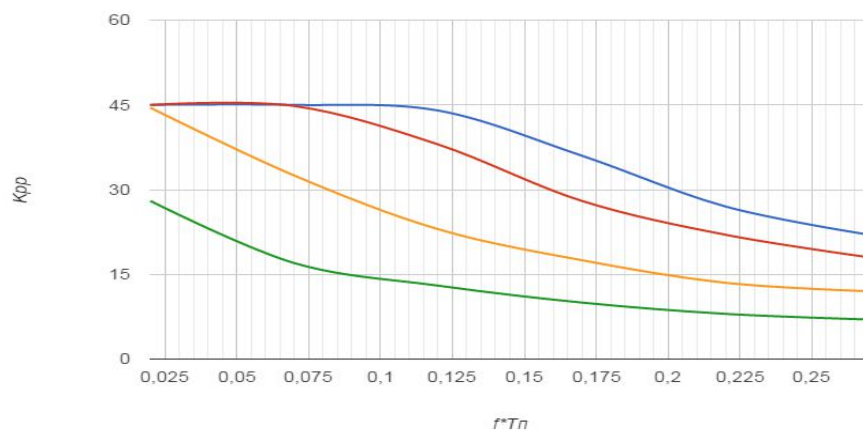


Рисунок 3.12– Залежність коефіцієнта пригнічення завад від ширини спектра флюктуаційної перешкоди для фільтрів різного порядку

Отримана залежність демонструє, що ефективність придушення завад істотно залежить як від спектральних характеристик самої перешкоди, так і від порядку застосованого фільтра. Зі збільшенням ширини спектра флюктуаційної завади ускладнюється процес її селективного пригнічення, однак підвищення порядку фільтра дозволяє частково компенсувати цей ефект за рахунок кращих частотних властивостей.

На рисунку 3.13 представлено узагальнену залежність коефіцієнта придушення завад та коефіцієнта покращення сигналу від порядку цифрового фільтра при заданих параметрах моделі. Аналіз цих характеристик дозволяє

оцінити компроміс між ефективністю фільтрації та складністю реалізації, а також визначити раціональний порядок фільтра, який забезпечує необхідний рівень завадостійкості без надмірного ускладнення обчислювальної структури системи.

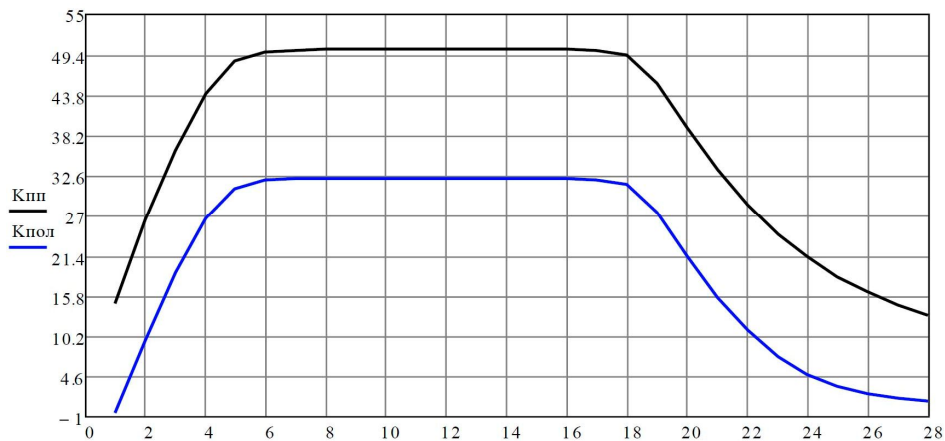


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта пригнічення перешкод та коефіцієнта покращення від порядку цифрового фільтра

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найбільш інтенсивне зростання ефективності фільтрації у межах проведеного дослідження спостерігається до шостого порядку фільтра. Подальше збільшення цього параметра практично не призводить до суттєвого покращення характеристик, що вказує на досягнення області насичення ефективності. Водночас при перевищенні приблизно шістнадцятого порядку відзначається зворотний ефект — погіршення якості фільтрації, що може бути пов'язано з накопиченням чисельних похибок, фазовими спотвореннями або надмірною чутливістю до шумових складових. Таким чином, процес налаштування фільтра має обмежений діапазон раціональних значень, у межах якого досягається оптимальний баланс між ефективністю та стабільністю роботи системи.

На рисунку 3.14 наведено амплітудно-частотну характеристику фільтра разом зі спектром вхідного сигналу. Амплітудно-частотна характеристика відображає залежність амплітуди сигналу від його частоти та є важливим інструментом для оцінювання селективних властивостей фільтра. У математичному вигляді вона визначається як модуль комплексної передавальної функції системи. Зменшення ширини смуги пропускання сприяє

підвищенню точності відновлення корисного сигналу за рахунок пригнічення завадових компонентів, однак надмірне звуження спектра може призвести до втрати частини інформаційних складових сигналу та спотворення його форми.

Отже, вибір параметрів фільтрації повинен здійснюватися з урахуванням компромісу між ступенем придушення перешкод і збереженням інформативності сигналу. Оптимальним вважається такий режим роботи фільтра, за якого досягаються максимальні значення коефіцієнтів пригнічення завад і покращення сигналу без втрати суттєвих складових корисної інформації.

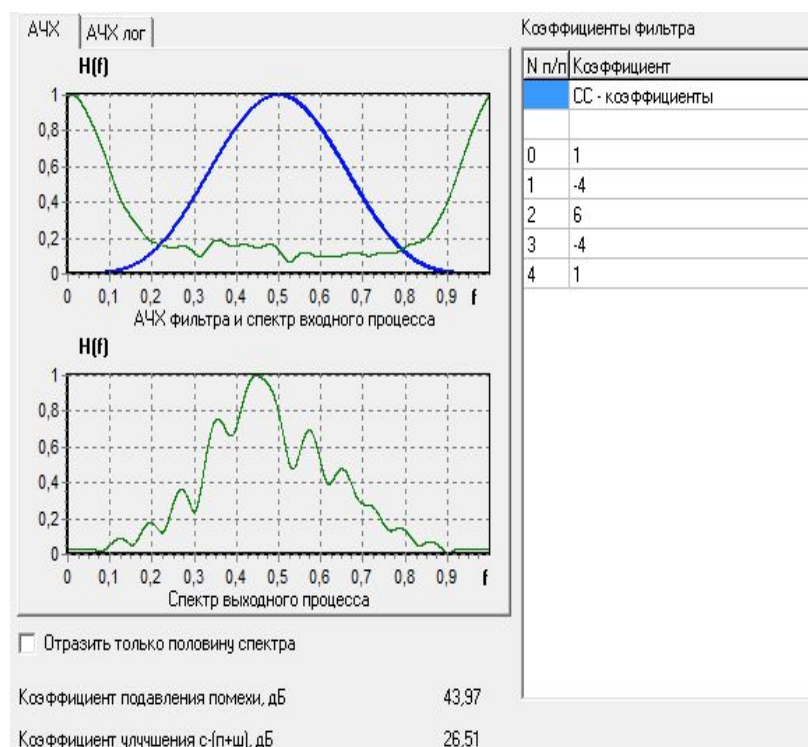


Рисунок 3.14 – Результати моделювання функціонування фільтра при гранично допустимих параметрах амплітудно-частотної характеристики.

Отримані результати свідчать, що реалізований алгоритм виявлення сигналу, за умови використання оптимально налаштованих параметрів фільтра, забезпечує підвищення точності обробки даних. Зокрема, у порівнянні з традиційними підходами до обробки сигналів досягнуто приріст ефективності на рівні близько 11%. Такий результат підтверджує доцільність використання запропонованого підходу та свідчить про його переваги у задачах виявлення сигналів в умовах наявності шумів і завад.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання даної роботи проведено комплексне дослідження сучасного стану та перспектив розвитку колісних роботизованих платформ у світі. Проаналізовано основні напрями застосування мобільних роботів, зокрема у військовій сфері, де такі системи відіграють важливу роль у розвідці, логістиці, розмінуванні та виконанні спеціальних операцій. Встановлено, що ключовими тенденціями розвитку є підвищення автономності, інтеграція інтелектуальних систем керування та вдосконалення сенсорного забезпечення.

У роботі досліджено загальні принципи побудови систем керування колісними роботами, включаючи кінематичні та динамічні аспекти руху. Розглянуто особливості різних типів шасі, що застосовуються у мобільних платформах, та визначено їх вплив на прохідність, маневреність і стійкість робота. Проведений аналіз показав, що вибір конфігурації шасі є критичним фактором, який визначає ефективність функціонування робота в конкретних умовах експлуатації.

Окрему увагу приділено дослідженню конструктивних компонентів колісного робота, зокрема електроприводів, сенсорних систем, обчислювальних модулів та каналів зв'язку. Визначено їх функціональне призначення та роль у забезпеченні стабільної та надійної роботи всієї системи. Також проаналізовано різні типи колісних роботів, що використовуються у військовій сфері, та їх конструктивні і функціональні особливості.

Практична частина роботи присвячена розробці імітаційних моделей руху колісного робота. Зокрема, створено модель у середовищі MATLAB Simulink, яка дозволяє досліджувати динаміку системи керування та вплив керуючих сигналів на поведінку робота. Паралельно реалізовано математичну модель у середовищі Mathcad, що базується на системі диференціальних рівнянь та описує рух платформи при різних режимах — прямолінійному, обертальному та криволінійному.

У ході моделювання проаналізовано поведінку системи в умовах впливу

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішніх завад, зокрема радіоперешкод та шумів. Встановлено, що наявність завад суттєво впливає на точність керування та стабільність руху робота. Для підвищення завадостійкості застосовано методи цифрової фільтрації, що дозволило значно покращити якість обробки сигналів. Зокрема, визначено оптимальні параметри фільтрів, за яких досягається максимальне пригнічення перешкод без втрати інформативності сигналу.

Результати імітаційних досліджень підтвердили адекватність розроблених моделей та ефективність запропонованих підходів до керування. Отримано приріст точності функціонування системи приблизно на 11% у порівнянні з базовими методами, що свідчить про практичну цінність виконаної роботи.

Таким чином, у роботі досягнуто поставлену мету - розроблено та досліджено математичну і імітаційну моделі колісного робота, проаналізовано особливості його керування та визначено шляхи підвищення ефективності функціонування в умовах впливу завад. Отримані результати можуть бути використані при подальшому проєктуванні роботизованих систем, удосконаленні алгоритмів керування та впровадженні мобільних платформ у реальні прикладні задачі.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Siegwart R. Introduction to autonomous mobile robots / R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza. – Cambridge : MIT Press, 2011. – 441 с.
2. Thrun S. Probabilistic robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. – Cambridge : MIT Press, 2005. – 647 с.
3. Corke P. Robotics, vision and control / P. Corke. – Berlin : Springer, 2017. – 693 с.
4. Siciliano B. Springer handbook of robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2016. – 2223 с.
5. Craig J. Introduction to robotics: mechanics and control / J. Craig. – Boston : Pearson, 2018. – 408 с.
6. Spong M. Robot modeling and control / M. Spong, S. Hutchinson. – New York : Wiley, 2020. – 608 с.
7. Kelly A. Mobile robotics: mathematics, models, and methods / A. Kelly. – Cambridge : Cambridge University Press, 2013. – 808 с.
8. Dudek G. Computational principles of mobile robotics / G. Dudek, M. Jenkin. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 403 с.
9. Latombe J.-C. Robot motion planning / J.-C. Latombe. – New York : Springer, 2012. – 460 с.
10. Ogata K. Modern control engineering / K. Ogata. – New Jersey : Prentice Hall, 2010. – 894 с.
11. Nise N. Control systems engineering / N. Nise. – Hoboken : Wiley, 2015. – 944 с.
12. Dorf R. Modern control systems / R. Dorf, R. Bishop. – Boston : Pearson, 2017. – 1040 с.
13. Franklin G. Feedback control of dynamic systems / G. Franklin. – Boston : Pearson, 2019. – 896 с.
14. Åström K. Feedback systems / K. Åström, R. Murray. – Princeton : Princeton University Press, 2021. – 408 с.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Oppenheim A. Discrete-time signal processing / A. Oppenheim, R. Schaffer. – New Jersey : Prentice Hall, 2010. – 1120 с.
16. Lyons R. Understanding digital signal processing / R. Lyons. – Boston : Pearson, 2011. – 992 с.
17. Kostenko K. Robotization of diagnostics of railway automation systems / K. Kostenko, T. Serdiuk, V. Skalko // Science and Transport Progress. – 2023. – № 2. – С. 45–52.
17. Kuzmenko O. Analysis of sensors as components of mobile robots / O. Kuzmenko, V. Chumak, I. Shevtsov // MC&FPGA Conference, м. Харків, Україна, 2022. – 2022. – С. 120–124.
18. Kyrychenko I. Research on the future of combat robotics / I. Kyrychenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 4. – С. 15–20.
19. Dehtiarov I. Design of ground robotic system for weapon control / I. Dehtiarov, P. Leontiev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 3. – С. 30–37.
20. Kazarian A. Neural networks in mobile robot control systems / A. Kazarian, O. Maksymiv // Ukrainian Journal of Information Technology. – 2024. – № 2. – С. 55–62.
21. Pasichnyk V. Unmanned ground robotic systems: classification and analysis / V. Pasichnyk, M. Doshchenko // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – № 3. – С. 10–18.
22. Korendiy V. Analysis of kinematic characteristics of mobile robots / V. Korendiy, O. Kachur // Techniques and Technologies. – 2023. – № 2. – С. 70–76.
23. Kadylnykova T. Ground autonomous robotic platforms: development trends / T. Kadylnykova // Challenges of Modern Science. – 2023. – № 1. – С. 88–94.
24. MathWorks. Simulink user's guide. – Natick : MathWorks, 2024. – 1200 с.
25. MathWorks. Control system toolbox documentation. – Natick : MathWorks, 2024. – 950 с.
26. Haykin S. Communication systems / S. Haykin. – New York : Wiley, 2001. –

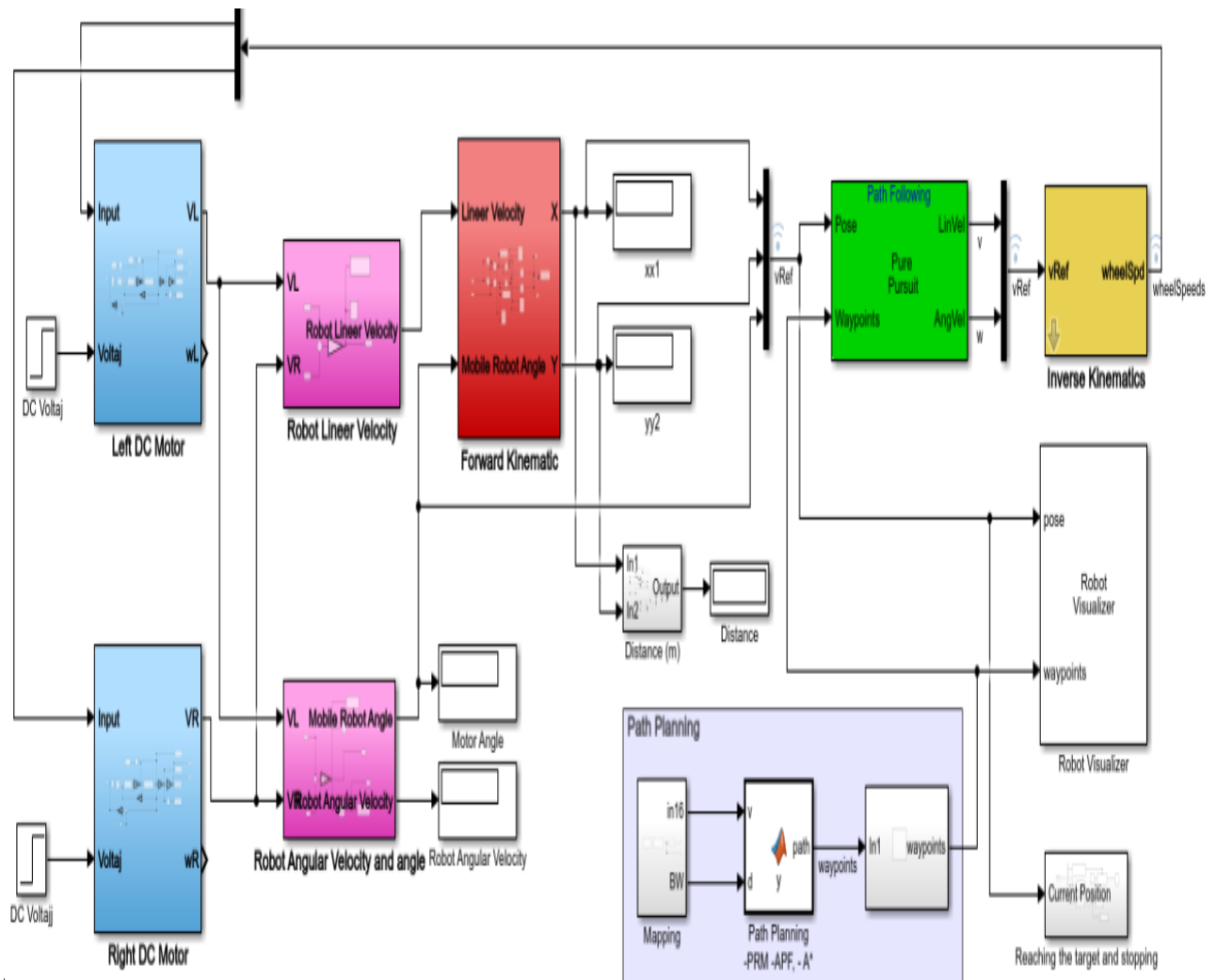
					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

816 с.

27.Proakis J. Digital communications / J. Proakis. – New York : McGraw-Hill, 2008. – 1104 с.

					ДП.АКІТ.10663272. 00.000000. ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А SIMULINK МОДЕЛЬ КОЛІСНОГО РОБОТА



					ДП.10663272 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютерно-інтегрована система керування колісним роботом	Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розроб.		Шигера В.							
Перевір.		Гуменний П.В.						99	
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42			
Н. Контр.		Заставний О.							
Затверд.		Сегін А.І.							



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2026



*ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

всеукраїнська науково-практична конференція
***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ
(АКІТ – 2026)***

19-21 лютого 2026 року
м. Тернопіль

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ - 2026), Тернопіль, 2026.

Редакційна колегія:

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пітух І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Адреса організаторів:

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,
Західноукраїнський національний університет.

Контакти: тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

ЗМІСТ

Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА	3 8
КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ	
Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	13
Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН	
КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ	17
Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	24
Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ	
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS	30
Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК	
АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ	
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС	41
Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ	
АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ	45
Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА	
АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	51
Роман КРІЛЬ	
ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R	55

Іван ЯНІК

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМІ RSA-CRT НА ОСНОВІ МОДУЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ ТА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ 60

Валентин САВЧУК, Аліна ДАВЛЕТОВА

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 64

Максим МИХАЛЬЧУК, Віталій КРАСІЙ

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ 68

Юрій КОЛЦУН, Віктор БОГОНІС

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД 72

Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ, Петро ГУМЕННИЙ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ 77

Наталія ВОЗНА, Ігор ПАШКОВСЬКИЙ, Сергій ЛУЦИШИН

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 83

Вадим ГРАМА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ ІoT-ТЕХНОЛОГІЙ 87

Олег ФЕДИШИН, Людмила БАБАЛА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ 92

Іван АЛБАНСЬКИЙ, Максим МЕРВА, Олександр РУДКОВСЬКИЙ, Денис СОЛТИС

ВЗАЄМОДІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ ТЕХНОЛОГІЙ ІoT 97

Павло ГРИЦЮК

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРЗАХИСТУ ВЕБ-ДОДАТКІВ НА БАЗІ ВІДКРИТИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОНІТОРИНГУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АНТИВІРУСНОГО АНАЛІЗУ 103

Володимир БУЯР, Сергій ВОЙЦЕШКО, Оксана БУРЛАК, Наталія ВОЗНА	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ	107
Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ	
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ	111
Артем ГЕРАСИМЮК	
АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОЇ ІоТ-МЕТЕОСТАНЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32	118
Юрій ТЕРНОВИЧ, Володимир ШАГАЛА, Олександр ЦИКВАС	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОЗАБІРНОЮ УСТАНОВКОЮ	122
Станіслав БАЛАКІН	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ	125
Петро СТИРАНКА, Олег ЗАСТАВНИЙ	
АВТОМАТИЧНИЙ СКЛАД З ЛІФТОМ-ПІДЙОМНИКОМ: РОЗРОБЛЕННЯ PLC-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	128
Сергій МУЗИКА	
КОНТЕЙНЕРИЗОВАНА ІОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	131
Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ	
АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	133
Олександр БРЕГІН	
СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ	140
Володимир ЗЬОМКО, Наталя СТЕФУРАК, Василь КУЗИК	
СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ	144
Владислав БІЛИК, Петро ГУМЕННИЙ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	148

Аліна ДАВЛЕТОВА

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦЬ РОЗПОДІЛУ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ **153**

Дарина ІВАНЧИШИНА, Станіслав БОГДАНОВИЧ, Руслан ПІДГРЕБЛЯ, Андрій ПРОЦЮК

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ У СКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ **159**

Богдан ПОЗНЯК, Ольга ПОСВЯТОВСЬКА

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА **165**

Андрій РІЖОК, Петро ГУМЕННИЙ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ **171**

Степан ІВАСЬЄВ

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЧИСЛА ЗА ЗАЛИШКАМИ НА ОСНОВІ СКУРЧУВАННЯ МОДУЛІВ **176**

Роман ЧІЖОВ, Петро ГУЕМНИЙ

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ **179**

Богдан ТОРІШНИЙ

ЗОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ХМАРНЕ СПОВІЩЕННЯ В СИСТЕМІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА БАЗІ ESP32 **182**

Денис ВІВЧАР

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАНУ НЕМОВЛЯТ **187**

Артем МІСЬКІВ, Аліна ДАВЛЕТОВА

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ **190**

Сергій КУЛИНА

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ **194**

Петро ГУМЕННИЙ

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ **196**

Богдан КОВБАС

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ

МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ

Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ

ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ

2

227

1

Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ

Західноукраїнський національний університет

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ

Вступ. Сучасний розвиток енергетики та житлово-комунального господарства України характеризується зростаючими вимогами до енергоефективності, екологічності та економічності систем теплозабезпечення. В умовах підвищення вартості енергоресурсів, обмеження традиційних джерел енергії та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої актуальності надається впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямків є використання теплових насосів у поєднанні з традиційними джерелами тепла, що формує так звані гібридні системи теплозабезпечення. Одним із ключових факторів підвищення ефективності гібридних систем є автоматизоване управління їх роботою, що дозволяє оптимізувати розподіл теплових потоків, мінімізувати витрати енергії та забезпечити стабільність функціонування системи в цілому. Використання сучасних методів керування та інформаційних технологій відкриває можливості для створення адаптивних та енергоефективних систем теплозабезпечення нового покоління.

Мета: Дослідження та підвищення ефективності функціонування колісного робота шляхом розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування, що забезпечує автономне та дистанційне виконання заданих завдань в умовах реального середовища.

1. Основна частина

Автоматизовані системи керування мобільними роботами є складними кіберфізичними комплексами, що інтегрують апаратні обчислювальні платформи, виконавчі механізми, сенсорні підсистеми та програмне забезпечення реального часу. Розроблення та дослідження таких систем потребує системного підходу, що охоплює аналіз архітектурних рішень, протоколів обміну даними, алгоритмів керування та засобів людино-машинної взаємодії.

Колісний робот як «об'єкт керування відрізняється від маніпуляційних та стаціонарних роботизованих систем тим, що його переміщення у просторі є невід'ємною частиною виконуваної задачі. Це висуває специфічні вимоги до системи керування: забезпечення стабільності руху на різномірних поверхнях, реалізація навігаційних алгоритмів, інтеграція з системами технічного зору та дистанційного управління» [1].

Автоматизована система керування (АСК) колісним роботом будується за ієрархічним принципом (рисунок 1), де кожен рівень ієрархії відповідає за певний функціональний клас задач. Трирівнева архітектура, прийнята в сучасних мобільних роботичних платформах, забезпечує чіткий розподіл відповідальності між підсистемами та спрощує масштабування функціоналу.

На нижньому рівні – рівні виконавчих пристроїв – зосереджені контролери

двигунів, схеми живлення та периферійні інтерфейсні модулі. Середній рівень охоплює мікроконтролерні та мікропроцесорні обчислювальні вузли, що реалізують алгоритми замкненого контуру керування та первинну обробку даних. Верхній рівень формує цільову поведінку системи: виконує планування маршруту, обробляє команди оператора та приймає рішення на основі ситуаційної моделі середовища.

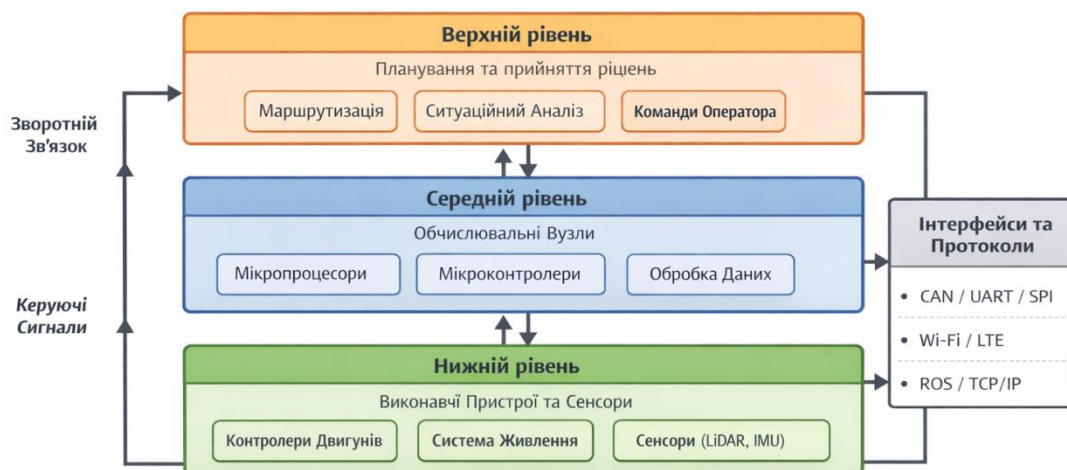


Рисунок 1– Автоматизована система керування колісним роботом

Взаємодія між рівнями здійснюється через стандартизовані інтерфейси та протоколи, що дозволяє замінювати окремі модулі без перепроєктування всієї системи. Така архітектура відповідає принципу «розділення обчислень та комунікацій», що є фундаментальним у проектуванні розподілених кіберфізичних систем.

Сучасні дослідження у галузі мобільної робототехніки все частіше орієнтуються на застосування імітаційного моделювання як основного інструменту перевірки алгоритмів управління, планування траєкторій та оцінки енергетичних показників системи. Це зумовлено кількома ключовими чинниками: по–перше, суттєвим скороченням матеріальних витрат порівняно з фізичними прототипами; по–друге, можливістю відтворення різноманітних сценаріїв функціонування в контрольованому середовищі; по–третє, відсутністю ризику пошкодження обладнання під час відпрацювання алгоритмів у позаштатних режимах.

Розроблена імітаційна модель (рисунок 2) системи керування колісним роботом ґрунтується на ієрархічному принципі побудови та передбачає декомпозицію загальної задачі управління на окремі функціональні рівні, що забезпечують формування траєкторії руху, генерацію керуючих впливів та відтворення фізичної динаміки платформи. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість системи, забезпечити її масштабованість і спростити процес налаштування окремих компонентів.

На верхньому рівні функціонує підсистема планування траєкторії, яка формує послідовність опорних точок руху відповідно до поставленого завдання. З метою уникнення різких змін напрямку та забезпечення плавності переміщення отримана траєкторія піддається додатковій обробці у блоці згладжування, що дозволяє мінімізувати динамічні перевантаження та покращити якість керування.

Результатом роботи цього рівня є еталонний опис руху, який слугує вхідними даними для наступних підсистем.

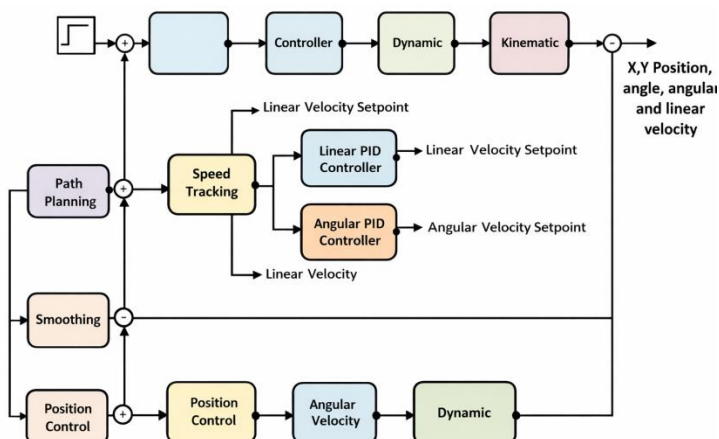


Рисунок 2—Імітаційна модель управління колісним роботом

Подальше перетворення геометричної траєкторії у керовані параметри руху здійснюється підсистемою відстеження швидкості, де визначаються необхідні значення лінійної та кутової швидкостей. Саме ці величини виступають як задані сигнали для регуляторів нижчого рівня. Важливою особливістю запропонованої структури є розділення каналів керування на два незалежні контури, що відповідають за поступальний і обертальний рухи платформи. Така декомпозиція дозволяє враховувати специфіку кожного виду руху та забезпечує більш точне налаштування системи.

Формування керуючих впливів реалізується за допомогою двох підрегуляторів типу PID, кожен з яких виконує стабілізацію відповідної швидкості. Лінійний регулятор забезпечує підтримання необхідної поступальної швидкості, тоді як кутовий відповідає за орієнтацію робота та точність відпрацювання поворотів.

$$u_v = K_p^v e_v + K_i^v \int e_v dt + K_d^v \frac{de_v}{dt}$$

Використання класичних PID-алгоритмів обумовлено їх універсальністю, простотою реалізації та здатністю забезпечувати прийнятні показники швидкодії та стійкості у широкому діапазоні умов експлуатації. Розділення каналів регулювання також сприяє зменшенню взаємного впливу керуючих сигналів і підвищує загальну стабільність системи.

Сформовані регуляторами сигнали подаються на динамічну підсистему, яка моделює фізичні процеси, що відбуваються у приводах робота. У цій частині враховуються параметри електромеханічної системи, зокрема характеристики двигунів постійного струму, інерційні властивості, сили тертя та можливі обмеження за швидкістю і моментом. Завдяки цьому забезпечується адекватне відображення реальної поведінки платформи у процесі руху. Кутовий PID-регулятор забезпечує орієнтацію робота у просторі:

$$u_\omega = K_p^\omega e_\omega + K_i^\omega \int e_\omega dt + K_d^\omega \frac{de_\omega}{dt}$$

Обчислюються координати центру мас та орієнтація платформи відносно вибраної системи координат, що дозволяє відтворити траєкторію руху у часі. Таким чином, кінематична підсистема виконує роль інтегратора стану системи.

Для реалізації поставлених у роботі задач обрано інтегроване середовище MATLAB/Simulink. Вибір зумовлений сукупністю технічних переваг цієї платформи: наявністю спеціалізованих бібліотек для робототехніки (Mobile Robotics Simulation Toolbox), підтримкою блочного візуального програмування в Simulink, можливістю реалізації ПД-регуляторів, передавальних функцій та нелінійних динамічних елементів без написання низькорівневого коду, а також вбудованими засобами візуалізації траєкторій і часових залежностей. Крім того, середовище забезпечує зручний інтерфейс для підключення фізичних пристроїв через пакет MATLAB Support Package for Raspberry Pi Hardware, що дозволяє перенести відпрацьовані в симуляції алгоритми безпосередньо на апаратну платформу [1].

Розроблена Simulink-модель (рисунок 3) колісного мобільного робота з диференціальним приводом являє собою ієрархічно організовану систему взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких відповідає за окремий аспект функціонування робота. Загальна архітектура побудована за принципом модульності: зміна параметрів одного блоку не порушує структуру інших, а кожна підсистема може бути замінена або доповнена незалежно.

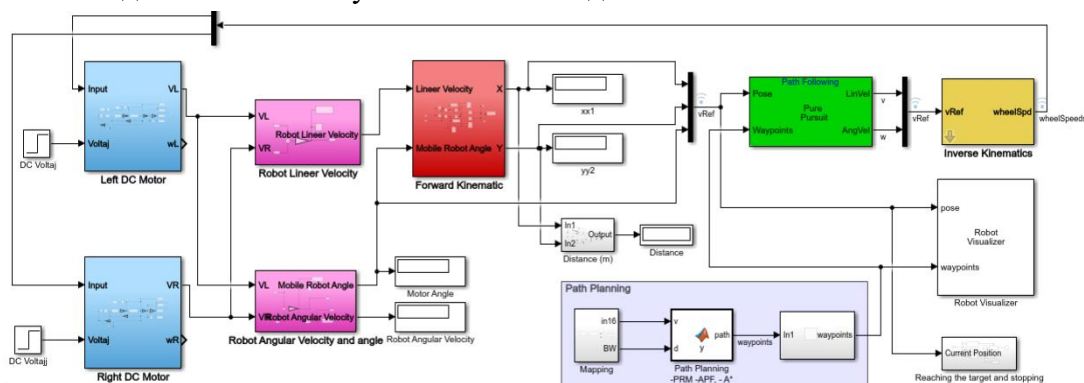


Рисунок 3– Simulink модель колісного робота

До складу моделі входять такі функціональні модулі:

- динамічна модель двигунів постійного струму з урахуванням нелінійних ефектів;
- кінематична модель диференціального приводу (пряма та зворотна кінематика);
- ПД-регулятор швидкості з можливістю налаштування коефіцієнтів;
- модуль планування траєкторії;
- алгоритм відстеження шляху Pure Pursuit;
- розширена модель оцінки енергоспоживання (моторна, сенсорна, керуюча складові);
- блок візуалізації руху Robot Visualizer.

Інформаційний потік у моделі організований таким чином: на вхід системи надходять координати вузлових точок маршруту (waypoints), які обробляються модулем планування. Згладжений опорний шлях передається до блоку

відстеження (Pure Pursuit), що формує цільові значення лінійної та кутової швидкостей. Ці значення надходять до ПД-регуляторів, які обчислюють управляючі напруги для лівого та правого двигунів. Динамічна модель перетворює напруги на кутові швидкості коліс, а кінематична модель – на поточні координати та орієнтацію робота. Паралельно з основним контуром управління здійснюється безперервний розрахунок енергетичних показників [2].

Кінематична модель описує взаємозв'язок між швидкісними характеристиками приводів робота та зміною його положення у просторі без урахування сил, що зумовлюють цей рух. Для диференційного приводу вона базується на умові кочення без ковзання та припущенні про рух по плоскій поверхні.

Миттєві зміни координат центру мас робота визначаються системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{x} = V \cdot \cos \theta, \quad \dot{y} = V \cdot \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega,$$

де V – лінійна швидкість центру мас (м/с);

ω – кутова швидкість (рад/с);

θ – поточний кут орієнтації робота відносно глобальної системи координат (рад);

x, y – поточні координати у площині руху (м).

Лінійна та кутова швидкості центру мас обчислюються через кутові швидкості лівого (ω_L) та правого (ω_R) коліс за формулами:

$$V = r \cdot (\omega_R + \omega_L) / 2, \quad \omega = r \cdot (\omega_R - \omega_L) / L,$$

де r – радіус ведучого колеса (м); L – колія між колесами (м). У розробленій Simulink-моделі пряма кінематика реалізована у вигляді окремої підсистеми, що приймає сигнали кутових швидкостей двигунів та видає вектор стану $[x, y, \theta, V, \omega]$ для передачі до блоку відстеження шляху та модуля візуалізації.

Динамічна модель є центральним елементом розробленої системи, оскільки саме вона відображає реальну фізику руху робота і служить основою для точного розрахунку енергоспоживання. На відміну від спрощених моделей, що використовують лише кінематичні рівняння, розроблена в межах даної роботи модель враховує сукупність внутрішніх і зовнішніх збурень, що діють на робота під час руху.

Кожен привід робота описується передавальною функцією двигуна постійного струму, яка встановлює зв'язок між прикладеною напругою і кутовою швидкістю валу[3]:

$$G_s(s) = \omega(s)/V(s) = K / [(L \cdot s + R_a)(J_m \cdot s + b_m) + K^2],$$

де $K = K_e = K_t$ – електромеханічна константа двигуна (В·с/рад); R_a – активний опір обмотки якоря (Ом); L – індуктивність якоря (Гн); J_m – момент інерції ротора (кг·м²); b_m – коефіцієнт в'язкого тертя (Н·м·с/рад). Параметри конкретного двигуна вводяться безпосередньо у вікні Simulink-моделі.

Загальний момент навантаження на вал двигуна формується з урахуванням фізичних взаємодій, що виникають при русі робота по реальній поверхні. Рівняння моменту навантаження має вигляд [3]:

$$T_m = (m/2) \cdot r^2 \cdot (d^2\theta/dt^2) + (m/2) \cdot g \cdot r \cdot \sin \beta + \mu k \cdot F_N \cdot \text{sign}(v) + (F_S - F_K) \cdot e^{(-cs|v|)} + b_z \cdot \omega,$$

де m – загальна маса робота з корисним навантаженням (кг); β – кут нахилу поверхні руху (рад); μ_k – коефіцієнт кінетичного тертя поверхні; $F_N = mg \cdot \cos \beta$ – нормальна сила реакції опори; $\text{sign}(v)$ – знак миттєвої швидкості (напрямок руху); FS та FK – сили статичного і кінетичного тертя відповідно; cs – коефіцієнт переходу від статичного до кінетичного тертя (ефект Стрибека); bz – коефіцієнт тертя кочення колеса.

Ефект Стрибека моделює нелінійну залежність сили тертя від швидкості при початку руху: в момент зрушення сила тертя стрибкоподібно зменшується від статичного до кінетичного значення. Цей ефект суттєво впливає на точність розрахунку пускового струму та відповідних витрат енергії. Також у моделі реалізовано обмеження максимальної швидкості ($V_{\max}$, $\omega_{\max}$) та максимального моменту ($T_{\max}$), що запобігає виходу системи за фізично можливі межі роботи приводу [4].

Управління швидкістю кожного колеса реалізовано за допомогою пропорційно–інтегрально–диференціального регулятора (ПІД). Регулятор формує управляючу напругу на основі різниці між заданою ω_{ref} та поточною ω кутовими швидкостями колеса. Закон управління описується виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot (de/dt),$$

де $e(t) = \omega_{\text{ref}} - \omega(t)$ – миттєва помилка регулювання; K_p , K_i , K_d – пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти відповідно. Налаштування коефіцієнтів здійснюється методом послідовного наближення з урахуванням характеристик динамічної моделі двигуна. Наявність двох незалежних ПІД–регуляторів (для лівого та правого коліс) забезпечує можливість різношвидкісного управління при виконанні поворотів.

Підсистема планування траєкторії формує геометрично допустимий маршрут між заданими вузовими точками (waypoints) з урахуванням можливих перешкод на карті середовища. У розробленій моделі передбачено можливість завантаження карти у форматі бінарного бітового зображення, де чорні пікселі позначають зони, недоступні для руху.

Вузові точки маршруту вводяться у відповідний компонент Waypoints. Перед передачею до блоку відстеження шлях проходить операцію згладжування, що зменшує кількість різких змін напряму і знижує пікові значення управляючих сигналів. Це позитивно позначається як на точності відтворення траєкторії, так і на загальному енергоспоживанні системи, оскільки згладжені траєкторії вимагають менших прискорень і гальмувань.

Відстеження траєкторії здійснюється за алгоритмом Pure Pursuit, який є одним з найбільш поширених методів геометричного контролю шляху. Принцип його роботи полягає у визначенні цільової точки на опорній траєкторії, що знаходиться на відстані look-ahead distance (ld) від поточного положення робота, та обчисленні кривизни дуги кола, яка з'єднує поточне положення з цією цільовою точкою. Необхідна кутова швидкість для проходження по цій дузі визначається як:

$$\omega = 2 \cdot V \cdot \sin(\alpha) / ld,$$

де α – кут між вектором орієнтації робота та напрямком на цільову точку; V – поточна лінійна швидкість. Значення ld є ключовим налаштувальним параметром

алгоритму: при малих значеннях робот точніше відтворює геометрію траєкторії, але схильний до нестійкості; при великих – рух стає плавнішим, але зростає відхилення від опорної лінії, особливо на ділянках з великою кривизною.

Моторна складова є найбільш складною та обчислювально інтенсивною частиною моделі, оскільки включає два взаємопов'язаних компоненти: корисну механічну роботу (E_s) та теплові втрати в обмотці двигуна (E_h).

Корисна механічна робота визначається через інтеграл потужності по часу:

$$E_s = P_k = \int T_{\max}(t) \cdot \omega(t) dt,$$

де P_k обмежується значенням $P_{\max} = T_{\max} \cdot \omega_{\max}$ при досягненні граничних швидкостей. Теплові втрати апроксимуються поліноміальною залежністю від часу та швидкості:

$$E_h = \int (\varepsilon \cdot t^2 + \sigma \cdot v + \lambda \cdot t) dt,$$

де ε та λ – теплові часові константи (Вт/с^2); σ – константа теплових втрат від швидкості ($\text{Вт}\cdot\text{с/м}$). Загальна моторна енергія: $E_{\text{motion}} = E_s + E_h$. Таке розділення дозволяє аналізувати не лише загальний баланс, але й співвідношення між корисною роботою та тепловими втратами при різних режимах навантаження.

У роботі розроблено та описано Simulink–модель диференційного мобільного робота, що охоплює всі ключові підсистеми: кінематичну та динамічну моделі, ПД–регулятор швидкості, алгоритм планування і відстеження траєкторії Pure Pursuit, а також розширену модель оцінки енергоспоживання.

Висновок. У роботі досліджено загальні принципи побудови систем керування колісними роботами, включаючи кінематичні та динамічні аспекти руху. Практична частина роботи присвячена розробці імітаційних моделей руху колісного робота. Зокрема, створено модель у середовищі MATLAB Simulink, яка дозволяє досліджувати динаміку системи керування та вплив керуючих сигналів на поведінку робота.

Таким чином, у роботі досягнуто поставлену мету – розроблено та досліджено математичну і імітаційну моделі колісного робота, проаналізовано особливості його керування та визначено шляхи підвищення ефективності функціонування в умовах впливу завад. Отримані результати можуть бути використані при подальшому проектуванні роботизованих систем, удосконаленні алгоритмів керування та впровадженні мобільних платформ у реальні прикладні задачі.

Перелік використаних джерел

1. Siegwart R. Introduction to autonomous mobile robots / R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza. – Cambridge : MIT Press, 2011. – 441 с.
2. Thrun S. Probabilistic robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. – Cambridge : MIT Press, 2005. – 647 с.
3. Corke P. Robotics, vision and control / P. Corke. – Berlin : Springer, 2017. – 693 с.
4. Siciliano B. Springer handbook of robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2016. – 2223 с.