МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОЦЕХОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ВАНТАЖІВ

Здобувача вищої освіти
Тесленко Аліни Олександрівни
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Кисельов В.Б.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Тесленко Аліни Олександрівни

1. Тема роботи: Автоматизована система навігації мобільних транспортних засобів для внутрішньоцехового переміщення вантажів

керівник роботи: _д.т.н., професор Кисельов В.Б._____

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 20.05.2026

3. Вихідні дані до роботи: система автоматичного керування просторовим рухом автономної мобільної платформи для внутрішньоцехової логістики, транспортування стандартизованих європалет масою до 1500 кг (інтервальна невизначеність маси від M_{min} до M_{max}.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати існуючі підходи до автоматизації транспортно-складських операцій та обґрунтувати вибір чотириколісної ромбоподібної схеми шасі для мобільних платформ; Обґрунтувати доцільність синтезу робастних регуляторів системи управління рухом на основі методу розширеного D-розбиття; Обґрунтувати необхідність врахування інтервальності параметрів та транспортного запізнювання в каналі управління під час розробки математичної моделі; Провести аналіз адекватності розробленої математичної моделі.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 2	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 3	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 4	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 І розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 ІІ розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 ІІІ розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВСТУП……..07
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ……...10
1.1. Огляд сучасних методів автоматизації логістичних та складських процесів із застосуванням мобільних керованих платформ ……...10
1.2. Огляд та критична оцінка відомих математичних моделей мобільних платформ і методів синтезу та аналізу систем автоматичного керування ……19
1.3. Аналітичний огляд методів синтезу систем керування рухом мобільних транспортних платформ ……23
Висновки до розділу 1 ……26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БОКОВИМ І ПОЗДОВЖНІМ РУХОМ МОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ……28
2.1. Побудова комп'ютерної моделі системи управління рухом транспортного засобу з використанням MATLAB ……28
2.2. Розробка експериментального макета і способу дослідження руху транспортного засобу ……34
2.3. Організація напівнатурного моделювання динаміки системи управління мобільним транспортним засобом ……42
2.4. Процес комп'ютерного проектування та симуляції системи керування просторовим рухом мобільної платформи в інтегрованому середовищі ADAMS та MATLAB ……48
2.5. Верифікація математичної моделі мобільної платформи та оцінка її адекватності за критерієм середньоквадратичного відхилення ……53
Висновки до розділу 2 ……...55
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І СИНТЕЗУ ЗАКОНУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ІНТЕРВАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ І ЗАПІЗНЕННЯМ В КАНАЛІ УПРАВЛІННЯ…….57
3.1. Створення комплексної моделі керування просторовим рухом автономної платформи ……...57
3.2. Синтез алгоритмів керування для об'єкта з інтервальними параметрами та запізнюванням ……60
Висновки до розділу 3 ……63
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……65
4.1. Організація та ергономічне забезпечення робочого місця розробника …….65
4.2. Забезпечення електробезпеки та захист від впливу електромагнітних випромінювань ……66
4.3. Безпека життєдіяльності та алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях ……..67
Висновки до розділу 4 ……69
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……72

АНОТАЦІЯ

Тесленко А. О. Автоматизована система навігації мобільних транспортних засобів для внутрішньоцехового переміщення вантажів. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено сучасні підходи до автоматизації логістичних процесів та розроблено комплексну систему автоматичного керування просторовим рухом автономних мобільних платформ із чотириколісним ромбоподібним шасі. Розроблено узагальнену математичну модель системи керування поперечним і поздовжнім рухом, що враховує апаратне (транспортне) запізнювання сигналів та інтервальну невизначеність параметрів, зумовлену динамічною зміною маси вантажу. Запропоновано та синтезовано алгоритми робастного керування (ПІД-, ПІ- та П-регулятори) на основі методу розширеного D-розбиття. Виконано комп'ютерне імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та MSC ADAMS, а також напівнатурне (гібридне) моделювання на розробленому апаратному лабораторному стенді на базі ПЛК Siemens. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробленої системи для проектування високонадійних алгоритмів навігації промислових транспортних роботів на сучасних підприємствах.

Об’єкт дослідження – процес автоматичного керування просторовим рухом автономної мобільної платформи в умовах внутрішньоцехової логістики.

Предмет дослідження – методи, математичні моделі та алгоритми робастного керування поздовжнім і поперечним рухом мобільного транспортного засобу з урахуванням інтервальних параметрів та запізнювання в каналі управління.

Мета роботи – теоретичне обґрунтування, розробка та комплексне дослідження системи автоматичного керування рухом мобільного транспортного робота для забезпечення високої точності навігації та стійкості до змін маси вантажу.

Методи дослідження – методи теорії автоматичного керування, метод розширеного D-розбиття, математичне моделювання, комп’ютерна віртуальна симуляція (MATLAB, ADAMS), гібридне напівнатурне моделювання.

Ключові слова: мобільний транспортний засіб, автоматизована логістика, робастне керування, метод D-розбиття, інтервальні параметри, транспортне запізнювання, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Teslenko A. O. Automated navigation system for mobile vehicles for intra-shop cargo movement. – Manuscript.

Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the bachelor's qualification work, modern approaches to the automation of logistics processes were investigated and a complex system for automatic control of spatial movement of autonomous mobile platforms with a four-wheeled diamond-shaped chassis was developed. A generalized mathematical model of the transverse and longitudinal movement control system was developed, which takes into account the hardware (transport) delay of signals and the interval uncertainty of parameters caused by the dynamic change in the mass of the cargo. Robust control algorithms (PID, PI and P controllers) based on the extended D-decomposition method have been proposed and synthesized. Computer simulation modeling in the MATLAB/Simulink and MSC ADAMS environments has been performed, as well as semi-real-life (hybrid) modeling on a developed hardware laboratory stand based on Siemens PLC. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed system for designing highly reliable navigation algorithms for industrial transport robots at modern enterprises.

The object of research is the process of automatic control of spatial movement of an autonomous mobile platform in the conditions of intra-shop logistics.

The subject of research is methods, mathematical models and algorithms for robust control of longitudinal and transverse movement of a mobile vehicle taking into account interval parameters and delay in the control channel.

The purpose of the work is the theoretical justification, development and comprehensive study of the automatic control system for the movement of a mobile transport robot to ensure high navigation accuracy and resistance to changes in the mass of the cargo.

Research methods are methods of automatic control theory, the method of extended D-decomposition, mathematical modeling, computer virtual simulation (MATLAB, ADAMS), hybrid semi-real-life modeling.

Keywords: mobile vehicle, automated logistics, robust control, D-partition method, interval parameters, transport delay, simulation modeling.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку промисловості та впровадження концепції «Індустрія 4.0» супроводжується стрімкою автоматизацією логістичних процесів. Ключовим елементом підвищення ефективності сучасних підприємств, складських комплексів та гнучких виробничих систем є використання автоматизованих транспортно-складських систем (АТСС) на базі автономних мобільних транспортних засобів (роботів). Їх застосування дозволяє виключити ручну працю, оптимізувати використання складських площ, прискорити виконання транспортних операцій та підвищити загальну безпеку на виробництві.

Найбільш оптимальним рішенням для транспортування стандартизованих вантажів (наприклад, європалет) по рівному підлоговому покриттю є використання мобільних платформ із чотириколісною ромбоподібною схемою шасі. Проте проектування систем автоматичного керування для таких роботів стикається з низкою серйозних науково-технічних проблем. Зокрема, у реальних умовах експлуатації маса транспортного засобу постійно змінюється (від порожнього стану до максимально завантаженого), що створює інтервальну невизначеність параметрів об'єкта керування. Крім того, процеси зчитування даних із сенсорів, обробки інформації мікроконтролером та передачі керівних впливів на двигуни неминуче призводять до виникнення транспортного запізнювання в каналі управління. Класичні методи синтезу регуляторів часто ігнорують ці фактори, що може призвести до втрати стійкості, зниження точності позиціонування або навіть виникнення аварійних ситуацій.

З огляду на це, розробка та дослідження комплексної системи керування просторовим рухом мобільної платформи, яка б забезпечувала робастну стійкість (нечутливість до зміни маси вантажу) та ефективно компенсувала апаратне запізнювання, є актуальним науково-технічним завданням.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності та точності навігації мобільних транспортних засобів шляхом розробки системи

автоматичного керування просторовим рухом, стійкої до інтервальної зміни маси вантажу та наявності транспортного запізнювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі підходи до автоматизації транспортно-складських операцій та обґрунтувати вибір кінематичної схеми шасі для мобільних платформ.

2. Розробити узагальнену математичну модель системи керування поперечним і поздовжнім рухом об'єкта з урахуванням інтервальності параметрів та запізнювання в каналі управління.

3. Обґрунтувати доцільність та здійснити синтез робастних регуляторів (ПІД, ПІ, П) системи управління рухом на основі методу розширеного D-розбиття.

4. Провести аналіз адекватності розробленої математичної моделі та синтезованих алгоритмів за допомогою віртуального (MATLAB/Simulink, MSC ADAMS) та гібридного (напівнатурного) моделювання на апаратному стенді.

Об’єкт дослідження – процес автоматичного керування просторовим рухом автономної мобільної платформи в умовах внутрішньоцехової логістики.

Предмет дослідження – методи, математичні моделі та алгоритми робастного керування поздовжнім і поперечним рухом мобільного транспортного засобу з урахуванням інтервальних параметрів та запізнювання в каналі управління.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що базується на застосуванні: методів класичної та сучасної теорії автоматичного керування (для опису динаміки системи); методу розширеного D-розбиття (для параметричного синтезу робастних регуляторів); методів комп’ютерного імітаційного моделювання в середовищах MATLAB/Simulink та MSC ADAMS (для дослідження кінематики та динаміки об'єкта); методів гібридного напівнатурного моделювання із застосуванням технологій ПЛК, SCADA та OPC-серверів (для експериментальної перевірки адекватності системи).

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні моделі та алгоритми параметричного синтезу можуть бути безпосередньо використані

інжиніринговими компаніями та конструкторськими бюро на етапі проектування систем навігації сучасних промислових автономних транспортних засобів (AGV). Створений гібридний лабораторний стенд та розроблена віртуальна 3D-модель становлять собою ефективний інструментарій для подальшого тестування, відлагодження програмного забезпечення та оптимізації алгоритмів керування мобільними роботами без необхідності створення дорогих фізичних прототипів.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

1.1 Огляд сучасних методів автоматизації логістичних та складських процесів із застосуванням мобільних керованих платформ

На сьогоднішній день у різноманітних виробничих галузях активно впроваджується величезний арсенал транспортно-складських систем. Специфіка організації їхнього безперебійного функціонування безпосередньо зумовлюється низкою факторів, серед яких ключовими є габарити складських приміщень, номенклатура та обсяги вантажів, що транспортуються, а також різновиди транспортної тари, типи використовуваних піддонів та доцільність залучення спеціалізованої контейнерної бази. Традиційно процес проектування новітніх складських комплексів спирається на базовий концепт «від внутрішнього до зовнішнього» (або «зсередини назовні»). Цей підхід передбачає сувору послідовність дій: на початковому етапі фахівці визначають оптимальний вид тари для зберігання конкретних матеріальних цінностей, наступним кроком стає підбір відповідних стелажних конструкцій та підйомно-транспортних механізмів, і лише на завершальній стадії розраховуються архітектурні габарити самої складської будівлі.

Впровадження автоматизованих транспортно-складських систем (надалі – АТСС) відкриває можливості для кардинального зменшення частки ручної праці, аж до її повного виключення з технологічного ланцюга. Такий ефект стає можливим завдяки глибокій інтеграції сучасних засобів обчислювальної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення. Саме ці електронні компоненти беруть на себе функції комплексного автоматизованого керування всім парком транспортно-складського устаткування, а також здійснюють безперервний і точний моніторинг просторового розміщення кожної одиниці вантажу на території підприємства.

Застосування АТСС дозволяє досягти максимально раціонального використання корисних площ складських приміщень, а також суттєво інтенсифікувати швидкість виконання як транспортних, так і суто складських

маніпуляцій. Саме ці беззаперечні переваги зумовлюють високу актуальність та науково-практичну значущість подальших досліджень у сфері розвитку подібних систем. Загальноприйнята класифікація АТСС спирається на кілька ключових критеріїв, зокрема: масо-габаритні характеристики та специфіку вантажних одиниць, що переміщуються, різновиди застосовуваних компонувальних рішень, специфікацію базового технологічного обладнання, а також загальний рівень впровадження автоматизованих процесів [9].

Досягнення високого рівня гнучкості в автоматизації транспортно-складських комплексів найчастіше реалізується через впровадження модульної архітектури їхньої побудови. Залежно від поточних виробничих завдань та потреб підприємства, такі модулі здатні легко видозмінюватися, масштабуватися та якісно розширювати загальний функціонал системи завдяки інтеграції нових блоків керування. З функціональної точки зору, самі модулі та їхні внутрішні складові гарантують чітку синхронізацію всіх супутніх виробничих етапів. Це, у свою чергу, нівелює стрибкоподібність (дискретність) робочих операцій і сприяє встановленню максимально рівномірного та стабільного ритму виробництва в цілому. Важливо зазначити, що архітектурна структура та просторове компонування модулів АТСС мають безпосередній і дуже вагомий вплив на загальну топологію тієї гнучкої виробничої системи, яку вони обслуговують.

Фундаментальною одиницею складської тари традиційно виступає піддон (палета). У сучасній логістиці найбільшого поширення набули стандартизовані європалети з габаритами 800 х 1200 х 144 мм, що розраховані на номінальну вантажопідйомність до 1500 кг. Альтернативним, але не менш популярним варіантом є використання палет, що відповідають міжнародному стандарту ISO 6780, розміри яких становлять 1000 х 1200 х 144 мм при ідентичних показниках максимального навантаження.

Для забезпечення компактного та надійного зберігання палетованих вантажів масово застосовуються багаторівневі стелажні конструкції. Їхня просторова конфігурація та схема розміщення в межах складського приміщення можуть суттєво варіюватися, адаптуючись під геометрію будівлі та логістичні потоки.

Процес безпосереднього завантаження складської тари в комірки стелажів найчастіше виконується спеціалізованими стелажними кранами-штабелерами. Втім, у ситуаціях, коли склад має масштабну інфраструктуру з великою кількістю багаторядних стелажів, застосування виключно кранів-штабелерів втрачає свою економічну доцільність. Це пов'язано з необхідністю закупівлі та обслуговування значного парку таких підйомних механізмів, по одному на кожен міжстелажний прохід. Більш сучасною та рентабельною альтернативою в таких умовах виступає використання інтегрованих маніпуляторів, встановлених безпосередньо на рухомому шасі мобільних транспортних роботів.

Транспортування палет за маршрутами «зона приймання – зона зберігання» та «зона зберігання – зона відвантаження» може здійснюватися різними технічними засобами: конвеєрними лініями, автоматизованими мобільними роботами або класичними електронавантажувачами. Остаточне рішення щодо вибору конкретного засобу доставки завжди спирається на ретельний аналіз його економічної ефективності для заданих умов. На рис. 1.1 наочно продемонстровано зони економічної доцільності використання електронавантажувачів у порівнянні з приводними роликовими конвеєрами. Цей вибір корелює з двома ключовими параметрами: інтенсивністю загального вантажопотоку λ (вимірюється в кількості піддонів за годину) та фізичною відстанню переміщення вантажів l, вираженою в метрах.

Аналізуючи графічні дані, наведені на рис. 1.1, можна зробити висновок, що за умов низької інтенсивності транспортних потоків у поєднанні зі значними відстанями транспортування (що є типовою ситуацією для зон складування готової продукції підприємства), найбільш фінансово виправданим є залучення саме парку електронавантажувачів.

Разом з тим, грамотний та обґрунтований підбір моделі мобільного транспортного робота відкриває шлях до його максимально глибокої інтеграції в загальну структуру АТСС. Це гарантує високу швидкість реакції системи на запити щодо виконання поточних транспортно-складських маніпуляцій, забезпечує абсолютно безпечний (безаварійний) трафік автономних машин

територією складу, а також гарантує прецизійну точність просторового позиціонування вантажних одиниць.

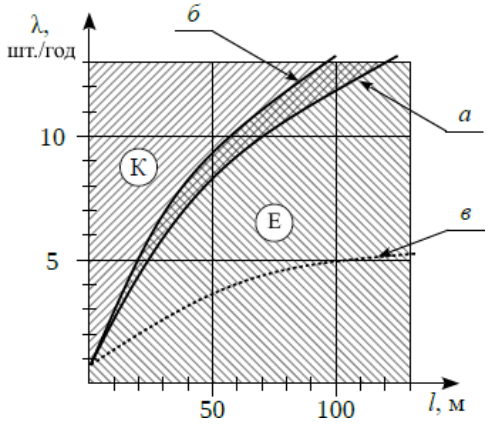


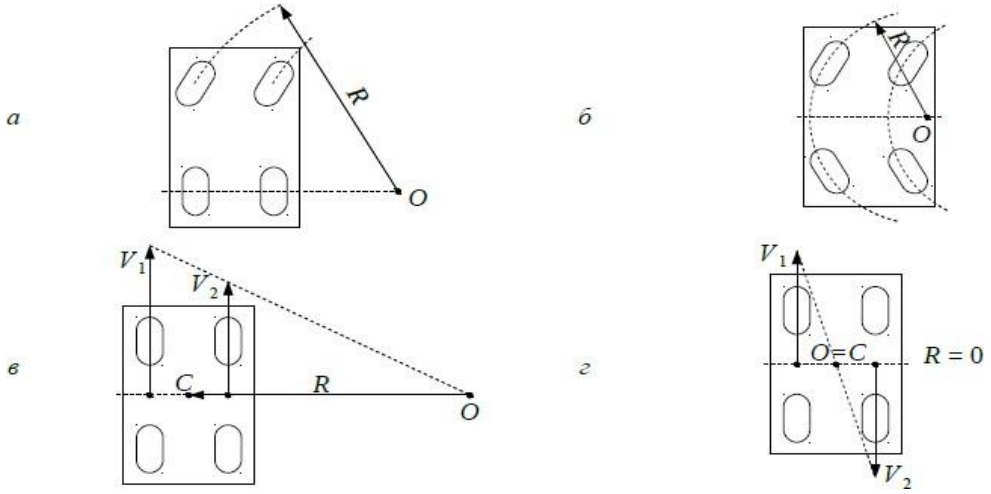
Рис. 1.1. Зони економічно виправданого використання різних типів транспортного обладнання: сегменти Е та К ілюструють сфери доцільності впровадження електронавантажувачів та приводних роликових конвеєрів відповідно; лінії а, б і в позначають межі розділення для конвеєрних систем із роликами перерізом 100 мм, 70 мм та з урахуванням витрат на холості проїзди.

У переважній більшості випадків промислові мобільні робототехнічні комплекси оснащуються колісним рушієм для переміщення по твердому підлоговому покриттю складу. Принципи зміни вектора руху такого автономного засобу можуть базуватися на двох основних підходах. Перший полягає у фізичному повороті рульових коліс навколо їхньої вертикальної осі. Другий метод ґрунтується на створенні різниці в швидкостях обертання та кутах повороту ведучих коліс по відношенню до горизонтальної осі (детальніше це проілюстровано на рис. 1.2) [9-13].

Варто зауважити, що кінематичні схеми, які передбачають повністю незалежне та автономне керування кожним окремим колесом транспортної платформи (де кожне колесо здатне індивідуально задавати напрямок і швидкість обертання), на практиці зустрічаються доволі рідко і не набули масового поширення через свою технологічну та алгоритмічну складність.

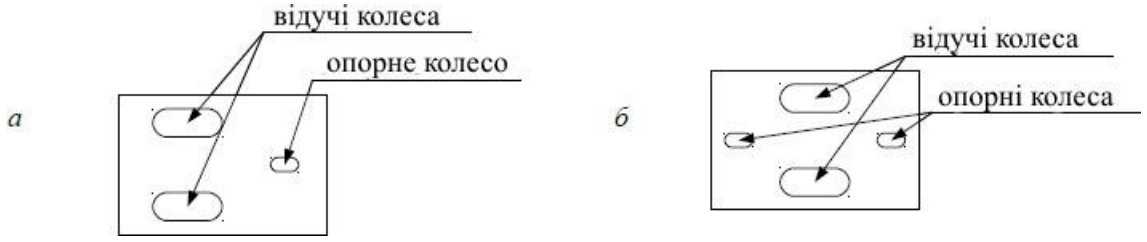
Натомість диференційний принцип керування, що ґрунтується на варіюванні швидкостей обертання лівого та правого ведучих коліс, наділяє транспортний засіб надзвичайно високою маневреністю, дозволяючи йому здійснювати розворот навколо власної осі практично на одному місці. У таких конструкціях головні рушійні колеса переважно монтуються на єдиній спільній

осі. Для забезпечення ж необхідної механічної стійкості всієї платформи в конструкцію інтегрують одне, два або навіть більшу кількість опорних коліс вільного обертання, що наочно продемонстровано на рис. 1.2 [14-16].



а – конфігурація з керованою передньою колісною парою; б – система з керованими обома осями (передньою та задньою); в – маневр платформи з некерованими (фіксованими) колесами за умови великого радіуса кривизни; г – розворот платформи з некерованими колесами на місці (нульовий радіус); де O та R позначають відповідно центр і радіус дуги повороту; V_1, V_2 – вектори лінійних швидкостей зовнішнього (забігаючого) та внутрішнього (відстаючого) бортів мобільного робота.

Рис. 1.2. Базові схеми реалізації маневрування для двовісних колісних роботизованих платформ



а – класична триколісна база з єдиним поворотним опорним колесом; б – чотириколісна конфігурація, оснащена двома пасивними роликами для стійкості.

Рис. 1.3. Варіанти топології розміщення ведучих та пасивних (опорних) коліс на шасі транспортних роботів

Безперечною технічною перевагою платформ, побудованих за триколісною схемою, є їхня чудова адаптивність до пересування по поверхнях зі значними нерівностями (це явище ілюструє рис. 1.4). На противагу цьому, чотириколісні шасі часто стикаються з проблемою відриву одного з коліс від підлоги при наїзді

на перешкоду. Цей суттєвий конструктивний недолік частково нівелюється шляхом монтажу спеціальних амортизаторів на вузли кріплення вільних коліс. Однак слід визнати, що за умови експлуатації техніки на ідеально плоских промислових підлогах, вказана проблема чотириколісних систем практично не проявляється.



а – поведінка шасі триколісного транспортного засобу; б – реакція підвіски чотириколісної мобільної платформи.

Рис. 1.4. Особливості кінематики під час подолання нерівностей підлогового покриття

Не менш важливим фактором є те, що реальні ходові та динамічні характеристики будь-якого мобільного транспортного робота критично залежать від просторового розташування його центру мас відносно точок контакту коліс із підлогою. Розробляючи робота з одним опорним (вільним) колесом, інженери змушені постійно шукати складний компроміс: необхідно збалансувати розподіл ваги таким чином, щоб не перевантажити опорне колесо, але при цьому втримати загальний центр мас у межах вертикальної площини, яка проходить чітко через вісь обертання головних ведучих коліс. Для забезпечення максимально ефективного зчеплення шин із робочою поверхнею переважна більшість маси апарата має тиснути саме на привідні вузли. Така умова ідеально виконується в чотириколісних моделях, якщо їхній центр ваги спроектовано прямо над віссю ведучого приводу. Зважаючи на вищевикладені аргументи, для завдань транспортування вантажів у межах сучасних виробничих складів із якісним і гладким покриттям, найбільш оптимальною та надійною визнана чотириколісна ходова схема з ромбоподібним розміщенням двох центральних ведучих та двох крайніх опорних коліс (що наведено на рис. 1.3, б).

Окрім механічної складової, критично важливим етапом у процесі організації функціонування автоматизованого складу є обґрунтований вибір

технології навігації для рухомого складу. Це завдання вимагає проведення глибокого аналітичного огляду та порівняння всіх існуючих навігаційних систем [16-18].

Вирішуючи проблему позиціонування мобільного робота, алгоритми системи керування повинні насамперед згенерувати еталонну траєкторію (або набір можливих маршрутів). Цей розрахунок базується на трьох ключових масивах даних: глобальному маршрутному завданні, поточних координатах транспортного засобу та фінальній точці його призначення. Процес вибору шляху може здійснюватися інтелектуальним ядром робота в режимі реального часу, враховуючи результати аналізу навколишнього середовища, виявлення перешкод, ідентифікації орієнтирів, а також фіксації векторів руху інших об'єктів. Незважаючи на привабливість таких автономних рішень, у сучасній практиці значно частіше віддають перевагу більш простому підходу – використанню заздалегідь жорстко визначених трас.

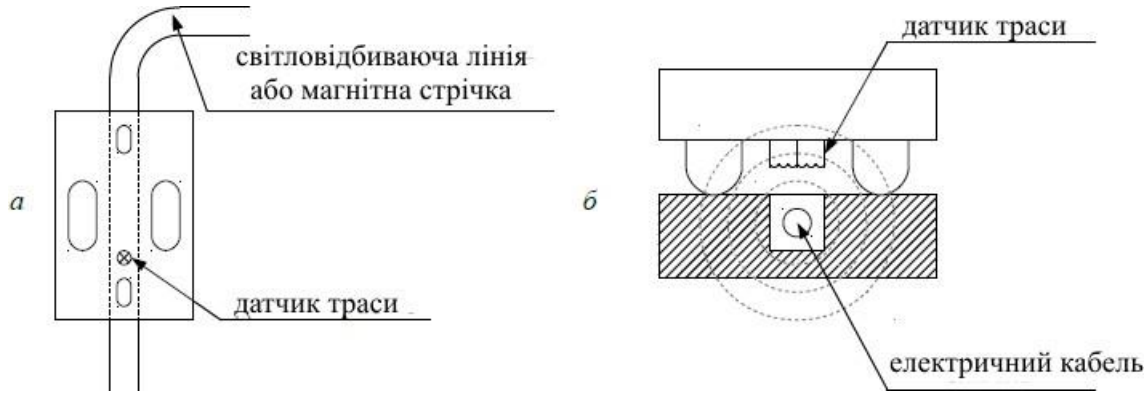
За фізичним принципом формування маршруту всі типи трас поділяють на механічні та інформаційні [15]. Механічна парадигма відрізняється феноменальною надійністю та експлуатаційною простотою напрямних елементів (рейки, стрілочні переводи, поворотні столи тощо). Головна перевага такого підходу – зведення до мінімуму вимог до систем відстеження самого робота. Однак цей метод має суттєвий недолік, який полягає у складності та високій вартості зміни загальної конфігурації траси.

Альтернативою є рух уздовж інформаційної траси. У цьому випадку завдання відстеження маршруту повністю покладається на систему управління мобільного пристрою, що базується на застосуванні кондукторного або програмного принципу. Кондукторний метод передбачає використання спеціального бортового датчика розпізнавання траси. Його функція – фіксувати наявність відхилення робота від еталонної лінії, вимірювати напрямок та величину цієї похибки, а також розпізнавати точки розгалуження чи зупинки. За своєю фізичною природою сенсори слідування можуть бути оптичними, магнітними або електромагнітними (рис. 1.5). Під час використання оптичного методу робот оснащується фотоелектричним сенсором та джерелом світла, тоді

як сама траса формується шляхом нанесення на поверхню руху світловідбиваючої смуги, що контрастує з фоном [15]. За аналогічним принципом працює і магнітна навігація з використанням намагніченої стрічки. Якщо ж підприємство обирає електромагнітний спосіб, то під покриттям прокладається провідник, по якому протікає змінний електричний струм.

Кожен із цих методів має свої обмеження. Оптичне слідування за лінією стикається із серйозними проблемами за умови високої запиленості, нерівномірної освітленості, а також є вразливим до потрапляння на трасу сторонніх предметів, що перекривають лінію. З іншого боку, магнітне та електромагнітне маркування не застосовується в зонах із наявністю потужних електромагнітних завад (наприклад, від важкого технологічного обладнання).

Більш гнучким є програмний принцип слідування. У такій архітектурі задана траєкторія зберігається в пам'яті системи керування роботом у вигляді набору параметрів ділянок прямолінійного руху, поворотів та математичних кривих Безьє [19-21]. Спираючись на ці дані, система управління безперервно генерує керівний вплив для виконавчих сервоприводів, які відповідають за корекцію положення машини в просторі відповідно до необхідних миттєвих характеристик руху. Занесення еталонної траєкторії в пам'ять найчастіше виконується методом інтерактивного навчання: оператор у ручному режимі самостійно проводить робота вздовж бажаного маршруту.



а – контрастної світловідбиваючої фарби або полімерної магнітної смуги, що фіксується безпосередньо на робочій поверхні; б – прихованого електричного провідника (кабелю), змонтованого в товщі підлоги складу.

Рис. 1.5. Реалізація кондукторної технології маршрутизації під час

маркування шляху переміщення шляхом застосування

Під час такого прогону електроніка запам'ятовує конфігурацію шляху для його подальшого автономного відтворення. Ще більш складний алгоритм передбачає здатність мобільного робота самостійно визначати власні глобальні координати і прокладати маршрут. Навігація в такому випадку може реалізовуватися за допомогою тріангуляційних систем на основі вимірювання дистанції до заздалегідь розставлених орієнтирів із використанням лазерних, ультразвукових або оптичних сканерів (рис. 1.6).

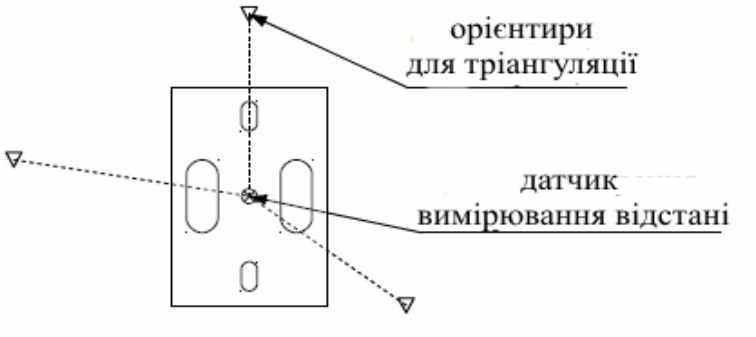
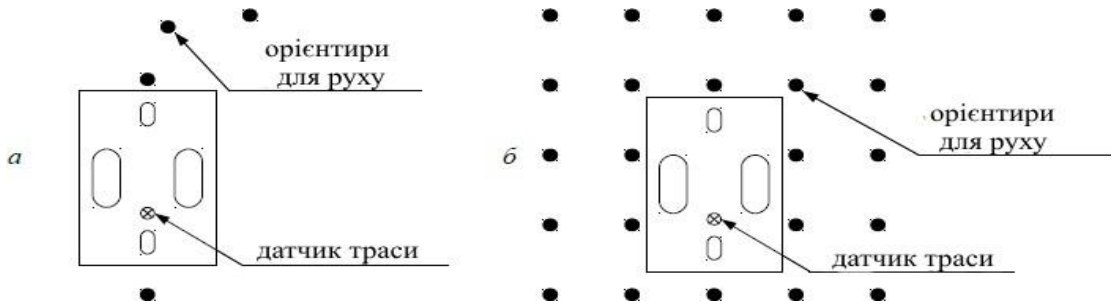


Рис. 1.6. Структурна схема функціонування тріангуляційної локаційної системи для позиціонування автономного транспортного засобу.

Окрім цього, виділяють змішаний (гібридний) принцип стеження. Його сутність полягає в тому, що маршрут задається у вигляді окремо розташованих на підлозі точкових орієнтирів (постійних магнітів або оптичних міток). Пересування ж між цими точками («сліпі» зони) здійснюється за траєкторією, яка розраховується процесором і коригується даними від гіроскопів, акселерометрів та датчиків швидкості обертання коліс (рис. 1.7).



а – лінійне розміщення позиційних реперів уздовж вектора руху; б – формування глобальної навігаційної сітки (матриці) орієнтирів.

Рис. 1.7. Принципи формування маршрутної мережі з використанням дискретних просторових маркерів

Загальний характер динаміки транспортного засобу на трасі під час вирішення навігаційних задач значною мірою лімітується механічними параметрами самого об'єкта управління (мобільної платформи). Зважаючи на це, під час синтезу системи автоматичного керування критично необхідно мати адекватну математичну модель цієї платформи. Це дозволить математично точно розрахувати оптимальний закон управління та спроектувати структуру бортової системи, яка гарантовано відповідатиме всім заданим вимогам щодо динамічних властивостей і точності руху.

1.2. Огляд та критична оцінка відомих математичних моделей мобільних платформ і методів синтезу та аналізу систем автоматичного керування

Процес проектування та подальшої імплементації високоефективних алгоритмів керування автономними транспортними засобами, а також створення відповідного програмного забезпечення, доцільно базувати на використанні адекватних математичних моделей. Такий підхід гарантує суттєве зменшення фінансових витрат та прискорює етапи розробки. Переваги математичного моделювання полягають передусім у тому, що на початкових стадіях відпадає гостра необхідність у створенні повноцінного фізичного прототипу робота, а також виключається потреба в оренді чи облаштуванні спеціалізованих полігонів і випробувальних трас для тестування його ходових характеристик.

Ґрунтовний теоретичний базис для формування математичних моделей мобільних робототехнічних комплексів із триколісною конфігурацією шасі та двома незалежними привідними колесами наведено в наукових працях [21-23]. У цих джерелах кінематика та динаміка об'єкта описуються в матричній формі із залученням електромеханічних рівнянь Лагранжа-Максвелла. Крім того, для подібних триколісних платформ було досліджено специфіку пускових режимів. Відповідна математична модель формалізується як комплексна система диференціальних рівнянь, що відображають як механічний рух самої платформи, так і перехідні процеси в колекторних двигунах постійного струму та редукторах, які обертають ведучі колеса. Додаткові аспекти моделювання

триколісних роботів висвітлено в публікаціях [23-24]. Проте варто зауважити, що вищезгадані теоретичні конструкції є релевантними виключно для триколісних апаратів і не можуть бути екстрапольовані на обрану нами чотириколісну конфігурацію шасі. Більше того, вони не дають змоги репрезентувати динаміку контуру керування у форматі класичної структурної схеми для дослідження динамічних властивостей на рівні базових підсистем. Через це детальне вивчення системи із застосуванням стандартних методів теорії керування (наприклад, у частотній області) стає надто обтяжливим завданням.

Значно простішою для розуміння та подальшого аналізу є структурна модель системи керування просторовим рухом чотириколісного транспортного засобу, оснащеного двома ведучими колесами, що запропонована в дослідженні [25]. У рамках цього підходу мобільна платформа розглядається як динамічний об'єкт, що в будь-який момент часу одночасно реалізує два незалежні вектори руху: нормальний (перпендикулярний) та тангенціальний (паралельний) відносно своєї головної поздовжньої осі. Наслідком першого типу руху є зміна поточного бічного зміщення, тоді як другий рух визначає варіацію поздовжньої координати відносно цільової траєкторії. Алгоритми керування кожним із цих переміщень формалізуються за допомогою структурних схем, які чітко ілюструють взаємодію між складовими частинами системи. При цьому кожен елемент математично описується відповідною передавальною функцією. Застосування таких відокремлених моделей поздовжнього та поперечного рухів дає змогу ідентифікувати локацію об'єкта відносно прокладеного маршруту. Однак, щоб розрахувати абсолютні глобальні координати робота у просторі, цей комплекс рівнянь необхідно обов'язково інтегрувати з математичною моделлю самої траси. Додатково слід враховувати, що канали керування поздовжнім і бічним рухом є тісно взаємопов'язаними, тому найбільш коректним є синтез та розгляд узагальненої моделі системи керування.

Критичним недоліком усіх проаналізованих вище математичних моделей є повне ігнорування ефекту чистого запізнювання в часі. Цей фактор неминуче виникає в реальних апаратних комплексах через затримки під час опитування сенсорів, обробки масивів даних процесором, а також під час генерації та

фізичної подачі керівних сигналів на виконавчі механізми. Врахування цих часових затримок набуває критичної ваги при реалізації алгоритмів віддаленого керування мобільним апаратом. Крім того, наявні моделі залишають поза увагою інтервальний характер (невизначеність) параметрів керованого об'єкта, що є надзвичайно важливим аспектом під час перевірки стійкості контурів регулювання.

Процедура вибору оптимального методу для перевірки стійкості та оцінки якості процесу керування прямо залежить від виду базової математичної моделі транспортного засобу. Якщо динаміка описується за допомогою передавальних функцій, модель може бути досліджена із залученням традиційного математичного апарату: критеріїв стійкості Ляпунова, Гурвіца, Михайлова, Найквіста чи логарифмічних методів. Проте під час математичного опису логістичного робота вкрай важливо враховувати нестаціонарність системи. Деякі ключові параметри моделі можуть динамічно змінюватися в процесі виконання чергової логістичної операції. Для прикладу, сумарна маса апарата буде суттєво коливатися під час транзиту між точками завантаження та вивантаження залежно від ваги готової продукції; так само рівень заряду акумуляторних батарей буде різним на початку та наприкінці робочого циклу. Деякі інші характеристики системи взагалі доцільно розглядати як змінні величини, щоб знайти їхнє оптимальне значення ще на етапі проектування (наприклад, геометричну відстань від сенсора бічного відхилення до центру мас платформи). З огляду на це, виникає складне завдання аналізу робастної стійкості системи керування транспортним роботом, де параметри не є жорстко детермінованими, а лежать у межах певних інтервалів, тобто об'єкт управління має яскраво виражену властивість інтервальності.

Детальний огляд сучасних підходів до визначення робастної стійкості динамічних систем наведено в публікаціях [20, 25]. Для систем, математична модель яких зводиться до дробово-раціональної передавальної функції з інтервальними коефіцієнтами, факт стійкості встановлюється шляхом локалізації коренів полінома знаменника для всього спектра допустимих значень параметрів. Згідно з теорією, система володіє робастною стійкістю тоді, коли її

характеристичне рівняння не має жодного кореня у правій півплощині комплексної площини або на уявній осі за будь-яких параметрів усередині заданого діапазону [26, 27].

Для гарантованого підтвердження стійкості цілої інтервальної системи є необхідним і достатнім перевірити розташування коренів лише для чотирьох кутових поліномів [27-30]. Подальше спрощення процедури аналізу робастної стійкості досягається шляхом застосування критерію, який зводить задачу до побудови та візуальної оцінки лише одного модифікованого частотного годографа Михайлова [31].

Однак усі перераховані аналітичні підходи орієнтовані на дослідження систем, чиї характеристичні рівняння не містять фактора запізнювання. Спроба проігнорувати наявність затримки в контурі керування може стати прямою причиною деградації динамічних характеристик або навіть призвести до повної нестійкості системи [32].

На сьогоднішній день великий масив наукових досліджень присвячено розробці критеріїв стійкості, здатних враховувати зміну часу запізнювання в заданих межах [33-35]. У цих працях здебільшого фігурують методи, що спираються на апарат Ляпунова, головна складність якого полягає у неочевидності вибору самого функціонала Ляпунова. До того ж такі методики припускають, що всі інші параметри системи (окрім часу запізнювання) є жорстко заданими і незмінними. Для систем із запізнюванням, характеристичне рівняння яких описується квазіполіномом, у рамках частотного підходу пропонується залучати тестуючі функції [36] або модифікований годограф Михайлова [40]. Однак це можливо лише за умови доведеної стійкості номінального квазіполінома (без зміни параметрів), що визначається за методиками, наведеними у [37-38]. Це, відповідно, вимагає проведення додаткового громіздкого аналізу системи.

У розглянутих наукових джерелах переважно розв'язується класична задача: досліджується стійкість інтервальних систем, де необхідно лише переконатися, що всі корені сімейства характеристичних поліномів лежать у лівій напівплощині. У більш узагальненому вигляді необхідно аналізувати належність

коренів сімейства рівнянь до певної специфічної області, конфігурація якої задається на основі жорстких вимог до якості функціонування системи — тобто досліджується робастна модальність. Наприклад, вимога розташування зони коренів на комплексній площині лівіше від вертикальної лінії $y = -\eta$, де $\eta > 0$, жорстко визначає необхідний ступінь стійкості системи [39].

У дослідженні [40] було сформульовано узагальнений частотний критерій, орієнтований на дослідження робастної модальності як лінійних неперервних, так і дискретних систем, коефіцієнти яких мають лінійну залежність від параметрів із накладеними еліптичними обмеженнями. Втім, запропонований критерій розрахований виключно на системи, які не мають фізичного запізнювання в каналі управління.

Таким чином, підсумовуючи вищевикладене, виникає гостра необхідність у розробці та обґрунтуванні простого та зручного критерію. Цей математичний апарат повинен дозволяти комплексно оцінювати робастну модальність систем керування, що представлені у вигляді передавальних функцій і містять ланку чистого запізнювання.

1.3. Аналітичний огляд методів синтезу систем керування рухом мобільних транспортних платформ

У ситуаціях, коли динаміка керованого об'єкта математично формалізується за допомогою апарату передавальних функцій, перед дослідниками відкривається широкий простір для застосування класичного інструментарію теорії автоматичного керування. Зокрема, питання параметричного синтезу робастних регуляторів невисокого порядку ґрунтовно розглядається у праці [41]. Запропонований там кореневий метод базується на жорсткій локалізації коренів інтервального характеристичного полінома в межах чітко визначеної області комплексної площини. З іншого боку, у дослідженні [21] для досягнення гарантованих показників робастної стійкості застосовується класичний метод D-розбиття, який реалізується в площині одного або двох варійованих настроювальних параметрів регулятора. Проте критичним обмеженням обох згаданих підходів є те, що вони орієнтовані виключно на ідеалізовані системи, в

яких повністю відсутнє чисте запізнювання сигналів.

Більш наближений до реальних умов спосіб синтезу класичного ПІД-регулятора наведено в роботі [26]. Цей метод дозволяє забезпечити таке просторове розташування коренів, яке задовольняє наперед задані критерії якості керування саме для систем із транспортним запізнюванням, спираючись на побудову граничних кривих D-розбиття. Втім, суттєвим недоліком цієї методики є її детермінований характер: вона абсолютно не бере до уваги можливу інтервальну невизначеність параметрів самого об'єкта керування, що в умовах експлуатації мобільних роботів є швидше правилом, аніж винятком.

Альтернативний підхід продемонстровано у публікації [23], де за допомогою апарату функцій Ляпунова було синтезовано безперервний закон керування для триколісного мобільного транспортного засобу, що функціонує в умовах неповної визначеності системних параметрів. Головна вразливість цієї концепції полягає у надзвичайній складності апріорного вибору математичної структури закону керування для об'єкта, динаміка якого описується складною системою диференціальних рівнянь. Практично це означає, що закон керування, успішно синтезований та оптимізований для триколісної кінематичної схеми, може виявитися абсолютно неефективним або навіть призвести до втрати керованості у разі його застосування для шасі іншої конфігурації (наприклад, чотириколісної).

Вузькоспеціалізоване рішення запропоновано в роботі [24], де автори використовують безітераційний алгоритм обчислення оптимальних налаштувань ПІД-регулятора для інтервальних систем, ускладнених наявністю запізнювання. Однак практична цінність отриманих аналітичних залежностей суттєво обмежується тим фактом, що вони виведені виключно для конкретного типу передавальної функції керованого об'єкта (строго другого порядку) та специфічної архітектури самого регулятора. Додатковим мінусом є те, що оптимізація здійснюється лише за критерієм забезпечення максимального ступеня стійкості замкнутого контуру, тоді як інші надзвичайно важливі показники якості перехідного процесу залишаються поза увагою дослідників.

Аналізуючи світовий досвід синтезу керуючих алгоритмів для інтервальних

систем із запізненням, варто відзначити низку праць, що спираються на сучасну теорію автоматичного керування. Наприклад, у статті [10] проблема компенсації часового запізнювання в інформаційному каналі успішно вирішується шляхом впровадження аналітичного екстраполятора в тандемі з розширеним фільтром Калмана. Проте і цей метод має слабке місце: математична модель припускає, що всі параметри системи є чітко заданими (детермінованими) константами, ігноруючи їхню можливу інтервальну варіативність.

Комплексний критичний аналіз новітніх методів проектування керуючих пристроїв для безінерційних систем (без запізнювання) здійснено авторами роботи [12]. За підсумками цього огляду, найбільш перспективним визнано метод аналітичного синтезу законів керування «за виходом та збурюючими впливами». Однак високі теоретичні переваги цього підходу неминуче супроводжуються його головним практичним недоліком — значним ускладненням апаратно-програмної реалізації самого пристрою керування.

Питання параметричної оптимізації в багатовимірному просторі станів піднімається в дослідженні [22]. Для досягнення робастної модальності тут активно застосовуються потужні чисельні методи пошуку оптимуму, але об'єктом дослідження знову ж таки виступає спрощена математична модель, що не враховує фактора транспортного запізнювання.

Окремої уваги заслуговує тенденція до впровадження інтелектуальних методів (нейронні мережі, нечітка логіка тощо) для гарантування робастності керування. Такий підхід неминуче призводить до необхідності проектування надзвичайно складних законів керування, реалізація яких на порядки важча порівняно з традиційними ПІД-алгоритмами. Відповідно, це висуває жорсткі вимоги до обчислювальної потужності бортового мікропроцесора. Крім того, виникає потреба у використанні спеціалізованих середовищ розробки для програмування логічних контролерів, що мають нативну підтримку інтелектуальних алгоритмів. Якщо ж такі інструменти відсутні, весь тягар низькорівневого програмування складних математичних структур лягає безпосередньо на плечі розробників системи, що суттєво збільшує час та вартість проекту.

Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати: на сучасному етапі проектування системи керування рухом мобільного транспортного робота постає гостра науково-технічна проблема. Вона полягає у необхідності розробки такого універсального аналітичного методу синтезу, який би гармонійно поєднував у собі переваги всіх розглянутих підходів. Новий метод повинен обов'язково оперувати інтервальними параметрами системи, ефективно компенсувати наявність чистого запізнювання в контурі управління та гарантувати досягнення необхідних динамічних і статичних показників якості. Окрім потужного математичного базису, критично важливою вимогою залишається простота практичної реалізації розробленого пристрою керування на базі стандартного промислового обладнання. Найбільш доцільним та економічно виправданим є орієнтація на архітектуру типових типових регуляторів (П, І, Д, ПІ, ПД, ІД, ПІД). Їхня апаратна база є масовою та загальнодоступною, а програмна імплементація підтримується абсолютною більшістю сучасних інтегрованих середовищ для розробки програмного забезпечення промислових контролерів та мікропроцесорних систем.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз стану автоматизації транспортно-складських операцій свідчить, що впровадження автоматизованих транспортно-складських систем дозволяє максимально раціонально використовувати корисні площі та суттєво інтенсифікувати швидкість виконання транспортних і складських маніпуляцій. Для завдань транспортування вантажів у межах сучасних виробничих складів найбільш оптимальною та надійною визнана чотириколісна ходова схема мобільного транспортного робота. Рух та просторову навігацію таких автономних пристроїв доцільно здійснювати вздовж інформаційних трас із застосуванням програмного або кондукторного принципу слідування.

Аналіз відомих математичних моделей мобільних платформ виявив, що існуючі структурні моделі чотириколісних транспортних засобів мають низку критичних недоліків. Зокрема, вони повністю ігнорують ефект чистого запізнювання в часі, який неминуче виникає через затримки під час опитування

сенсорів та обробки масивів даних процесором. Крім того, наявні моделі залишають поза увагою інтервальний характер параметрів об'єкта управління, які можуть динамічно змінюватися під час виконання чергових логістичних операцій, наприклад, через зміну маси вантажу або рівня заряду акумуляторних батарей.

Огляд існуючих методів синтезу систем керування рухом показав, що застосування класичних методів параметричного синтезу здебільшого обмежене ідеалізованими системами, в яких повністю відсутнє чисте запізнювання сигналів. Ті ж підходи, що здатні враховувати транспортне запізнювання, абсолютно не беруть до уваги можливу інтервальну невизначеність параметрів об'єкта керування. З іншого боку, використання інтелектуальних методів управління задля забезпечення робастності неминуче призводить до необхідності проектування надзвичайно складних законів керування, апаратна та програмна реалізація яких є значно важчою порівняно з традиційними алгоритмами.

З огляду на вищевикладене, постає гостра науково-технічна необхідність розробки універсального аналітичного методу синтезу системи керування рухом мобільного транспортного робота. Новий математичний метод повинен обов'язково оперувати інтервальними параметрами системи та ефективно компенсувати наявність чистого запізнювання в контурі управління, гарантуючи досягнення необхідних показників якості. При цьому критично важливою вимогою залишається простота практичної реалізації розробленого пристрою керування на базі стандартного промислового обладнання. Найбільш доцільною та економічно виправданою в цьому контексті є орієнтація на архітектуру типових промислових регуляторів (П, І, Д, ПІ, ПД, ІД, ПІД), які масово підтримуються сучасними мікропроцесорними системами.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БОКОВИМ І ПОЗДОВЖНІМ РУХОМ МОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

2.1. Побудова комп'ютерної моделі системи управління рухом транспортного засобу з використанням MATLAB

Початковий етап створення віртуальної імітаційної моделі переміщення транспортного апарата відносно заданого маршруту передбачає розв’язання двох ключових підзадач. Перша з них полягає у математичному трансформуванні маршруту, який початково задається у форматі локальних відхилень, у відповідну безперервну геометричну криву на глобальній декартовій площині координат XY. Друга підзадача зводиться до безперервного обчислення точних просторових координат мобільної платформи у цій же площині XY, спираючись на базову точку траєкторії та обов'язково враховуючи поточне значення поперечного (бічного) зміщення апарата.

Спираючись на раніше сформований теоретико-математичний апарат, що описує динаміку об'єкта, було спроектовано комплексну імітаційну модель у програмному розширенні Simulink, яке є інтегрованою частиною середовища MATLAB (візуальне представлення схеми наведено на рис. 2.1). Розроблена архітектура моделі надає можливість генерувати та аналізувати траєкторію переміщення роботизованої платформи у просторі XY, враховуючи при цьому наперед задані діапазони коливань інтервальних параметрів системи.

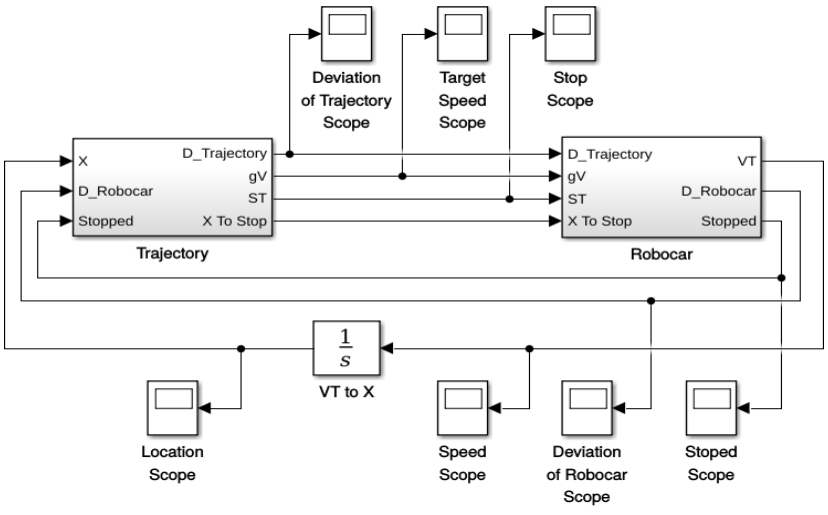


Рис. 2.1. Загальна структурна схема імітаційної моделі руху мобільного засобу в середовищі Simulink

Ключовим функціональним елементом запропонованої комп'ютерної схеми виступає програмний макроблок під назвою "Robocar". Його головне призначення полягає у практичній реалізації узагальненої структурної моделі контуру керування просторовим рухом автономної платформи. Детальна програмна архітектура цього макроблоку проілюстрована на рис. 2.2.

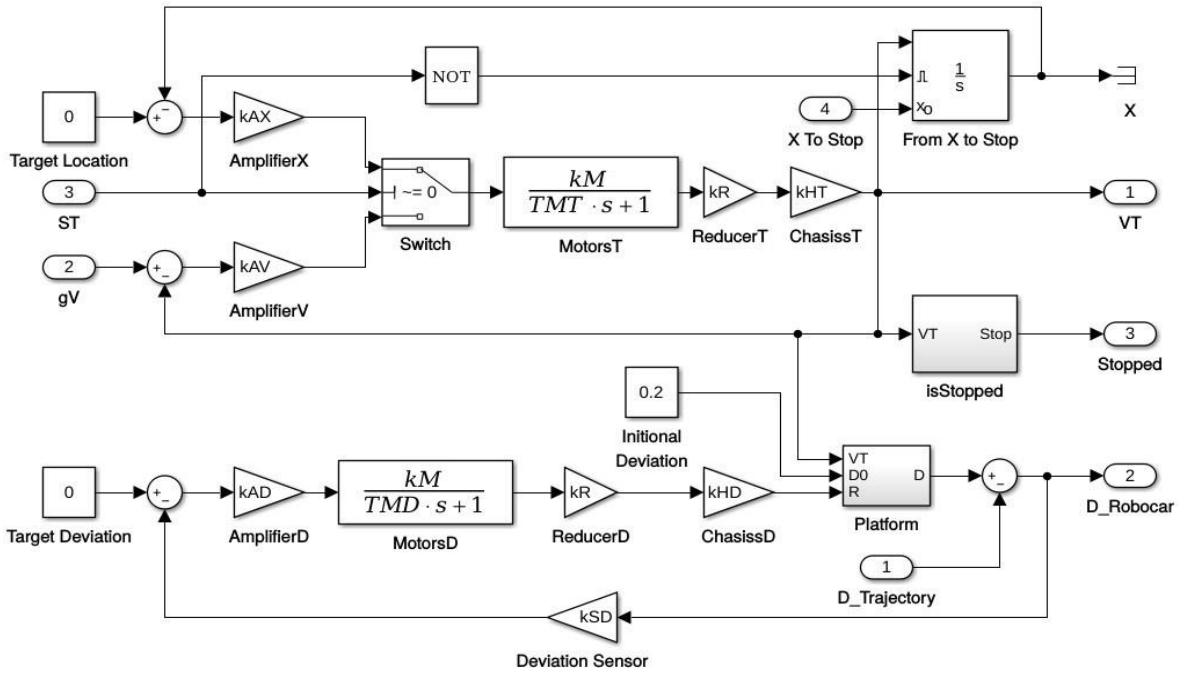


Рис. 2.2. Внутрішня архітектура та програмна імплементація керуючого модуля "Robocar"

Аналізуючи внутрішню топологію підсистеми "Robocar", яка відображена на рис. 2.2, можна виокремити специфічний набір вхідних та вихідних параметрів. До вхідних інформаційних сигналів належать: поточне відхилення реальної траси від ідеальної прямолінійної осі, еталонне (задане) значення швидкості поздовжнього переміщення, додатковий допоміжний сигнал, а також дистанція, що залишилася до цільової точки повної зупинки (яка зазвичай відповідає зоні виконання завантажувально-розвантажувальних операцій). Зі свого боку, на виході макроблоку генеруються такі динамічні показники: фактична швидкість руху вздовж поздовжньої осі, величина поточного бічного відхилення транспортного засобу від еталонного маршруту, а також спеціальний логічний сигнал статусу. Цей статусний маркер набуває значення логічної одиниці виключно в момент повної зупинки платформи, залишаючись нульовим

протягом усього періоду активного руху.

Алгоритм безперервної перевірки стану повної зупинки мобільного робота фізично інкапсульовано у спеціалізований підблок з ідентифікатором "IsStopped", внутрішню логіку якого наведено на рис. 2.3. Відповідно до закладених математичних критеріїв, об'єкт вважається повністю нерухомим лише за умови, що його поздовжня швидкість, лінійне прискорення та перша похідна від прискорення (ривок) одночасно дорівнюють нулю, з урахуванням наперед заданого допустимого ступеня обчислювальної точності.

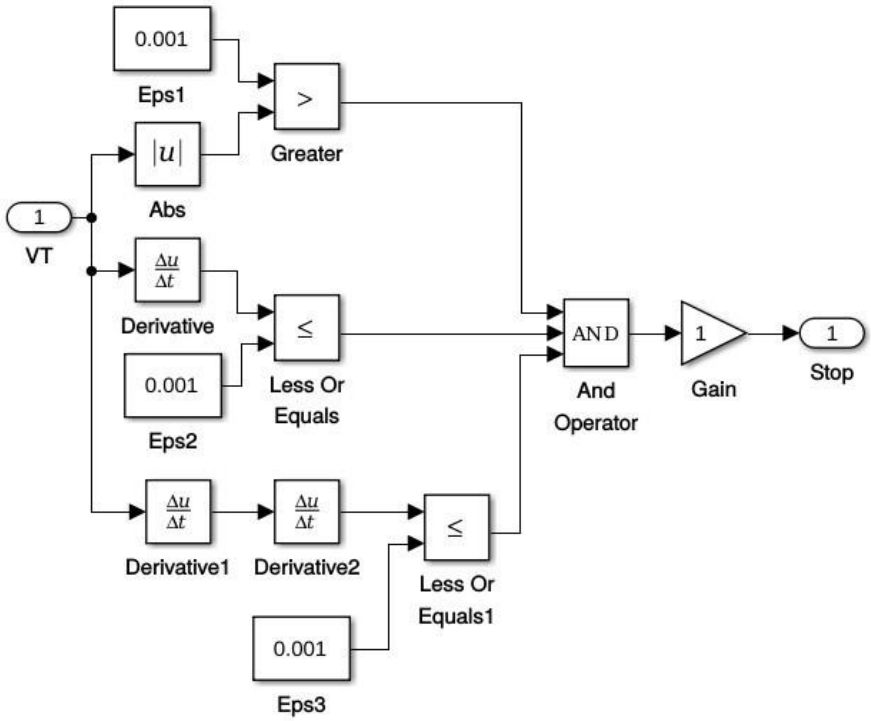


Рис. 2.3. Структурна схема алгоритму детектування зупинки у підблоці "IsStopped"

Динамічні масиви даних, що генеруються на виходах макроблоку "Robocar", слугують базовими вхідними сигналами для наступного важливого вузла — блоку "Trajectory" (схему якого зображено на рис. 2.4). Головна функція цього модуля зводиться до безперервного перерахунку координатних точок цільової траси у глобальній горизонтальній системі відліку XY. Крім того, блок визначає актуальне просторове положення транспортного механізму відносно цієї ідеальної лінії у кожен дискретний момент модельного часу. Сформовані вихідні сигнали блоку "Trajectory" повертаються на входи підсистеми "Robocar", утворюючи замкнутий контур управління. Отримані результати цифрового симулювання, що представлені у вигляді масивів координат XY для заданої та

фактично змодельованої траєкторій, автоматично експортуються та зберігаються у глобальній робочій області (Workspace) системи MATLAB. Це забезпечує можливість їхньої зручної подальшої графічної побудови та візуалізації.

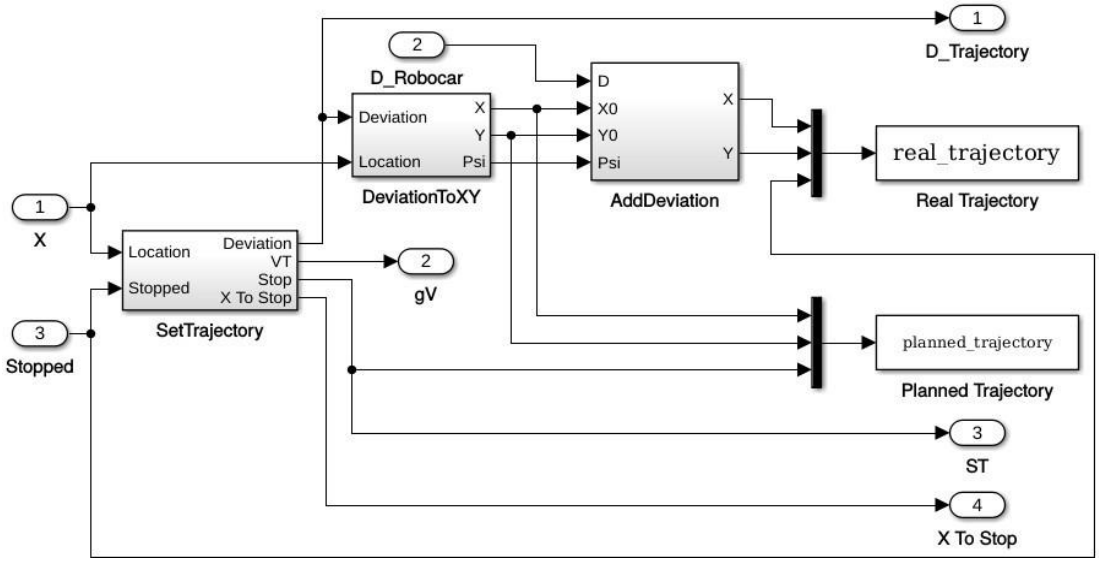


Рис. 2.4. Топологія обчислювального вузла «Trajectory» для прокладання маршруту

У межах підсистеми «Trajectory» автономно функціонує вкладений модуль «SetTrajectory» (його програмний вигляд подано на рис. 2.5). Цей компонент бере на себе виконання низки відповідальних математичних та логічних операцій: він розраховує величину відхилення маршрутної лінії від прямолінійного вектора на наступному кроці системного моделювання; здійснює інтелектуальний вибір оптимального значення для заданої швидкості поздовжнього переміщення; формує відповідний керівний сигнал, спираючись на поточні глобальні координати платформи на трасі; а також обчислює точну відстань до фінальної точки зупинки у випадку активації підсистеми просторового позиціонування.

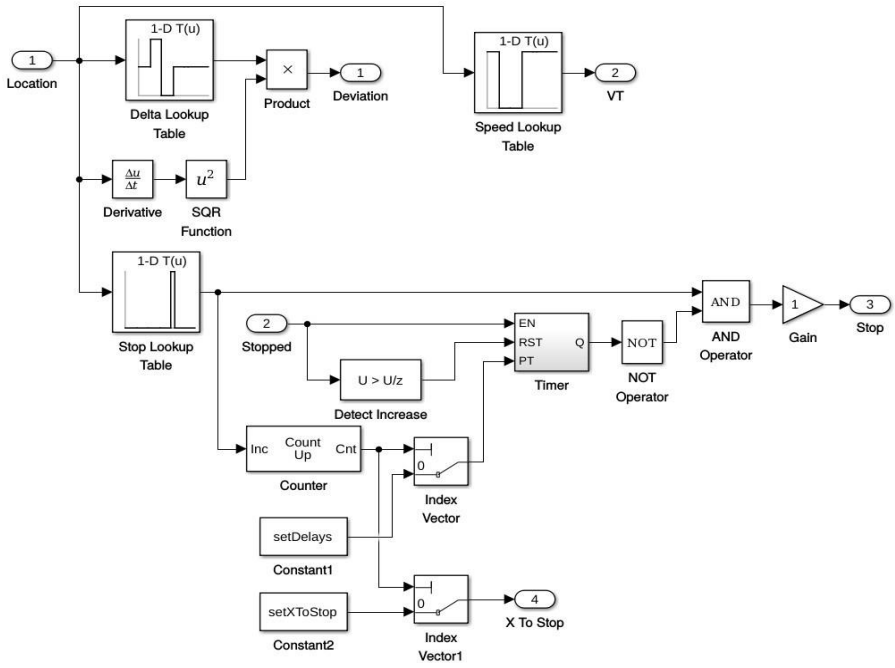


Рис. 2.5. Схема конфігурації маршрутних завдань у модулі «SetTrajectory»

Володіючи актуальною інформацією про поточне розташування транспортного засобу на конкретному відрізку шляху, а також маючи дані щодо відхилення маршруту від прямолінійної осі, алгоритм здатен предиктивно розраховувати координати наступної точки траєкторії для подальшого кванту модельного часу. Відповідні тригонометричні та алгебраїчні обчислення апаратно реалізовані у програмному вузлі «DeviationToXY» (див. рис. 2.6).

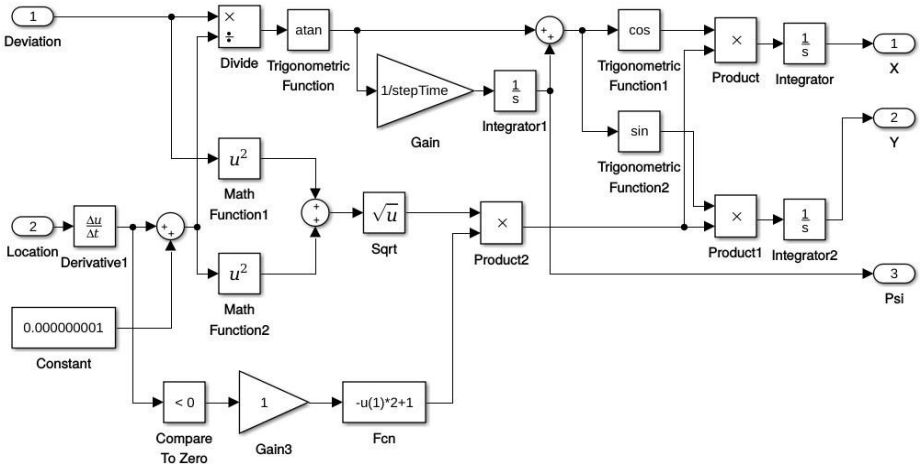


Рис. 2.6. Алгоритм розрахунку координат наступної точки маршруту в підсистеми «DeviationToXY»

На фінальному етапі координати наступної цільової точки траси, що були успішно згенеровані модулем «DeviationToXY» (рис. 2.6), підлягають просторовій корекції. До цих координат, з обов'язковим урахуванням поточного

кута напрямку самої траси, векторно додається фактичне бічне (поперечне) відхилення мобільного робота. Зазначена інтегруюча операція виконується в блоці «AddDeviation» (його будову показано на рис. 2.7). У результаті цих перетворень на виході модуля система отримує абсолютно точні та вивірені координати транспортного апарата у двовимірній декартовій площині XY.

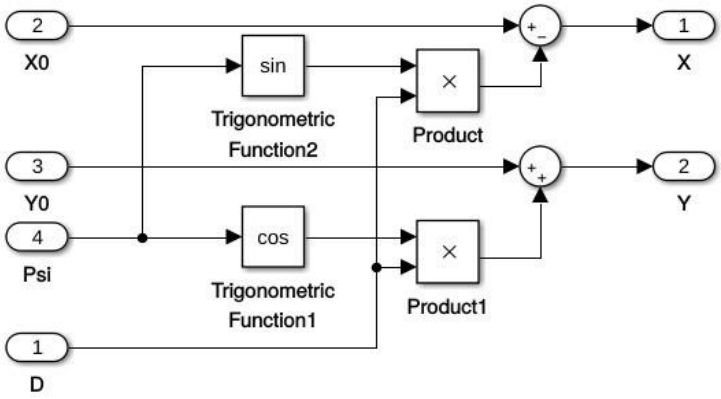


Рис. 2.7. Програмна імплементація обчислення фінальних просторових координат у вузлі «AddDeviation»

Наочний приклад результатів роботи створеної імітаційної моделі руху продемонстровано за допомогою графіка на рис. 2.8. У рамках проведеного експерименту цільова траєкторія була складена з двох послідовних топологічних сегментів: прямолінійної стартової ділянки, протяжність якої становить 2 метри, та подальшої криволінійної ділянки, що імітує поворот ліворуч. Процес автоматично керованого руху успішно моделювався з навмисним врахуванням наявності початкового бічного відхилення шасі, щоб перевірити робастні властивості алгоритму стабілізації.

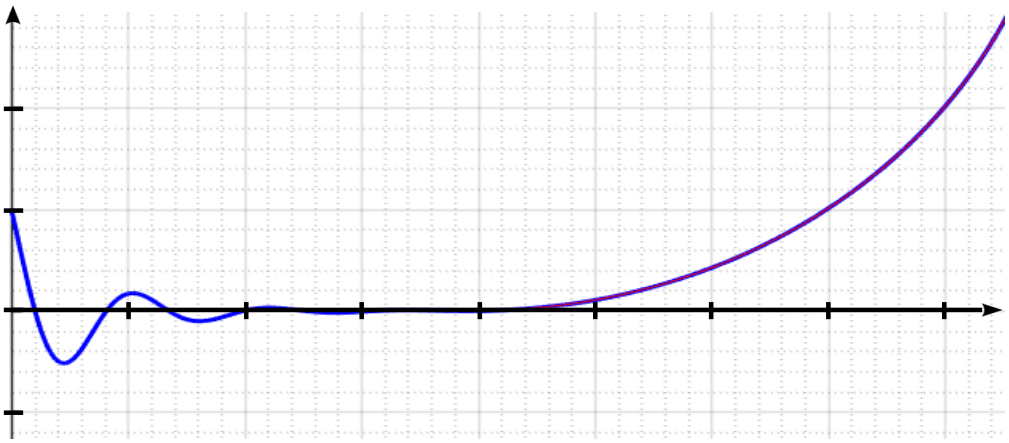


Рис. 2.8. Візуалізація результатів комп'ютерного моделювання переміщення мобільної платформи вздовж складеної траєкторії

Варто резюмувати, що функціональні можливості розробленої комп'ютерної моделі не обмежуються виключно графічною побудовою просторової траєкторії у площині XY. Програмний інструментарій також дозволяє генерувати, накопичувати та виводити для детального подальшого аналізу часові розгортки (графіки) змін ключових кінематичних показників: динаміки бічного відхилення, профілю поздовжньої швидкості та графіка лінійного пройденого шляху відносно заданої маршрутної лінії.

2.2. Розробка експериментального макета і способу дослідження руху транспортного засобу

Сформований раніше математичний опис становить собою потужний інструмент для глибокого аналізу законів керування просторовим переміщенням мобільного транспортного робота. Втім, низка допущень та спрощень, які неминуче закладаються на етапі теоретичної побудови моделі, об'єктивно знижують загальний рівень її адекватності реальним фізичним процесам. Цей фактор створює нагальну потребу у залученні методів фізичного моделювання та проведенні натурних експериментальних досліджень динаміки контуру управління. Отримані під час таких дослідів емпіричні дані є критично важливими для подальшої верифікації та порівняння з результатами, які демонструє суто математична симуляція.

Методологія фізичного моделювання знаходить своє застосування у двох ключових напрямах: безпосередньо під час натурного тестування та відлагодження алгоритмів організації трафіку парку автономних платформ, а також для прецизійного вимірювання окремих фізичних параметрів складових елементів системи. Зібрані таким чином характеристики згодом використовуються для уточнення та підвищення адекватності базових математичних моделей.

Проте обидва класичні підходи мають суттєві обмеження. Суто математичні моделі страждають від зниженої адекватності через неможливість абсолютно точного опису всіх нелінійностей та нюансів реальної конструкції. З іншого боку, повноцінне фізичне моделювання вимагає створення дорогих

повномасштабних прототипів транспортних засобів та будівництва спеціалізованих випробувальних полігонів (автодромів), здатних імітувати різні типи та стани дорожнього покриття. Це неминуче призводить до колосальних фінансових та часових витрат. Для вирішення цієї дилеми в рамках даного дослідження було імплементовано гібридний (напівнатурний) підхід до моделювання динаміки мобільного робота. Ця концепція гармонійно акумулює в собі сильні сторони як віртуально-математичного, так і фізичного апаратного моделювання [27].

Апаратна (фізична) частина розробленої гібридної моделі реалізована у вигляді спеціалізованого експериментального лабораторного стенда (загальний вигляд якого наведено на рис. 2.9) [22]. Базовою конструкцією стенда є рухома платформа 1, що спирається на дві головні опори, виконані у формі похилих стійок 2. Нижні кінці цих стійок жорстко зафіксовані на несучій рамі 3, тоді як верхні зчленовані з самою платформою 1. Додатково платформа 1 оснащена ще двома точками опори, які просторово зорієнтовані за ромбоподібною топологією відносно стійок 2. Ці додаткові опори конструктивно реалізовані як осі 4 двох головних привідних коліс 5 досліджуваного мобільного робота. Колеса безпосередньо контактують і спираються на спеціальні обертові кругові платформи 6 (імітатори дорожнього полотна), які жорстко насаджені своїми геометричними центрами на вертикальні осі 7. У свою чергу, нижні хвостовики цих осей інтегровані в опорні підшипникові вузли 8, які надійно закріплені на станині 3. На нижню площину кожної кругової платформи 6 по периметру нанесені спеціальні контрастні світловідбивні маркери. На загальній рамі, безпосередньо під обертовими майданчиками, змонтовано вертикальні кронштейни, що утримують оптичні сенсори кутової швидкості 9. Сигнальні виходи цих сенсорів через спеціалізований модуль вводу-виводу 10 підключені до вхідних портів головного бортового мікроконтролера 11. Керівні виходи контролера 11, проходячи через той самий комутаційний пристрій 10 та силовий блок сполучення 12, комутуються безпосередньо з якірними обмотками тягових колекторних двигунів постійного струму 13.

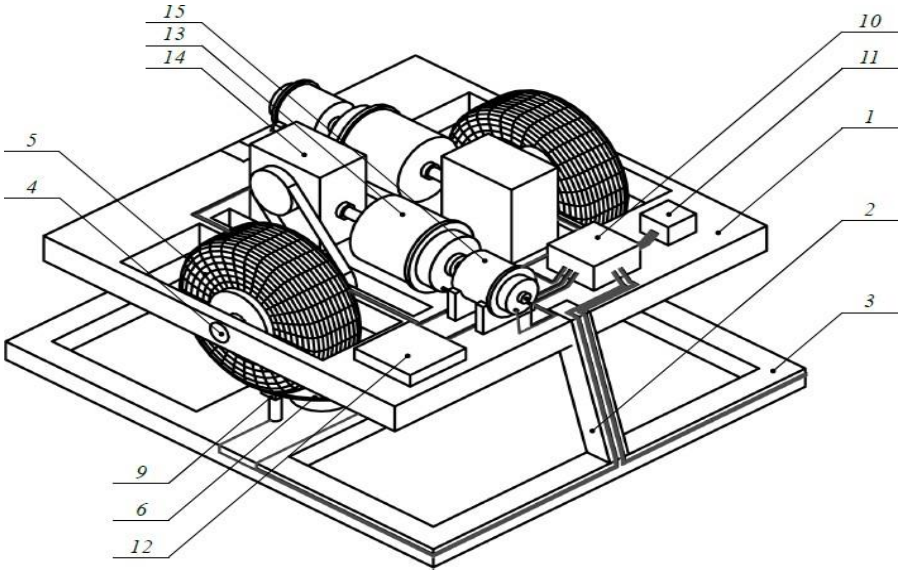


Рис. 2.9. Конструктивна схема та компонування лабораторного випробувального стенда для дослідження характеристик системи керування просторовим рухом мобільної платформи

Кінематична передача обертового моменту від валів тягових електродвигунів до ведучих коліс 5 здійснюється через механічні редуктори 14. Водночас вали двигунів мають жорстку механічну зв'язку з роторами тахогенераторів постійного струму 15. Аналогові сигнали з цих тахогенераторів, аналогічно до сигналів від тензометричних сенсорів 17, транслюються через блок вводу-виводу 10 на аналого-цифрові входи бортового процесора 11. Самі тензодатчики 17 конструктивно розташовані під опорними підшипниковими вузлами 8 вертикальних осей 16. Останні кінематично пов'язані з центрами обертових платформ за допомогою гвинтової пари (гвинт-гайка) із фіксуючою контргайкою (деталізація вузла на рис. 2.10). Головний бортовий мікроконтролер 11 підтримує безперервний двосторонній інформаційний обмін із персональною електронно-обчислювальною машиною (ПЕОМ) верхнього рівня 18, яка інтегрована в локальну комп'ютерну мережу. Живлення всіх електричних кіл, сенсорів та електронних платформ бортової системи забезпечується від стабілізованого лабораторного джерела живлення.

Загальний алгоритм функціонування випробувального комплексу наочно ілюструє структурна схема, подана на рис. 2.11. Конструкція платформи 1 спирається на чотири опорні точки: дві похилі стійки 2 (що слугують жорсткою

зв'язкою між станиною 3 та самою платформою 1) та дві осі 4, розміщення яких утворює ромбоподібну конфігурацію відносно похилих стійок.

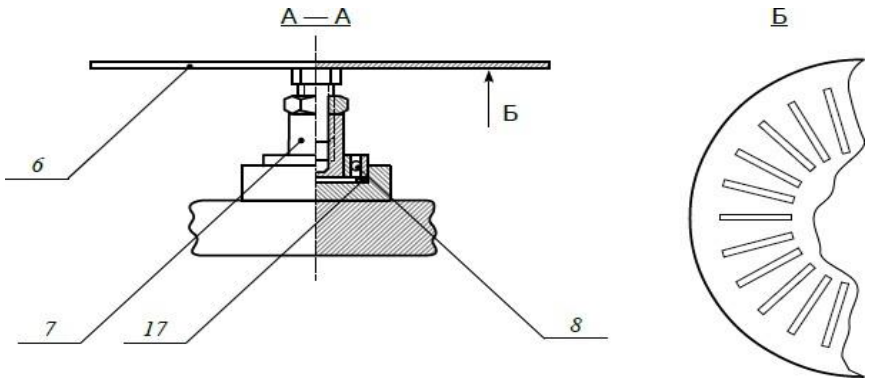


Рис. 2.10. Деталізована схема монтажу тензометричних датчиків під вузлами опорних підшипників вертикальних валів, що зчленовані з обертовими дисками через гвинтовий механізм із контргайкою

Бортовий мікропроцесорний модуль 11, використовуючи інтерфейс вводу-виводу 10 та силовий драйвер сполучення 12, реалізує алгоритм керування робочою напругою, що подається на обмотку якоря кожного електромотора. Саме цей рівень напруги жорстко детермінує кутову швидкість обертання відповідного двигуна постійного струму 13. Згенерований обертовий рух від кожного двигуна 13 через систему валів синхронно передається на вимірювальний тахогенератор 15 та, проходячи через понижувальний редуктор 14, приводить у рух вісь відповідного тягового колеса 5. Колесо, маючи фрикційний контакт із круговою платформою-імітатором 6, змушує її обертатися.

Оптичні енкодери (сенсори швидкості) 9, змонтовані під круговими платформами, фіксують імпульси відбитого світлового випромінювання від маркерних смужок. Частота генерації цих імпульсів має пряму пропорційну залежність від кутової швидкості обертання імітаційного диска 6. Відповідно, електричний сигнал, що формується на виході датчика 9, є абсолютно точним еквівалентом лінійної швидкості руху колеса по поверхні.

Конструктивне рішення щодо з'єднання центрів обертових дисків 6 із підшипниковими вузлами 8 через механізм «гвинт-гайка» надає унікальну можливість прецизійно регулювати силу притискання ведучих коліс мобільної

платформи до поверхні імітатора 6. Цей механізм дозволяє фізично моделювати варіації нормального тиску коліс 5 на дорожнє покриття, що виникають у реальних умовах під час зміни маси вантажу, який транспортується роботом. Наявність контргайки у вузлі гарантує надійну фіксацію положення гвинта відносно гайки-втулки під час інтенсивного обертання платформи 6. Нижня частина втулки обертається синхронно з гвинтовим штоком. Сам опорний підшипник 8 безпосередньо спирається на чутливий елемент тензодатчика 17. Верхня частина гвинтового штока виконана у формі шестигранника. Це дозволяє за допомогою стандартного інструменту обертати гвинт відносно гайки і тим самим дозувати вертикальне зміщення кругової платформи 6. Кожна зміна висоти диска 6 прямо пропорційно впливає на силу тиску колеса на поверхню, яка через гвинт, втулку та підшипник 8 транлюється на тензорезистор 17. Отже, конструкція стенда забезпечує можливість тонкого механічного регулювання навантаження на тягові колеса 5 та його одночасного точного вимірювання за допомогою тензометричної апаратури 17.

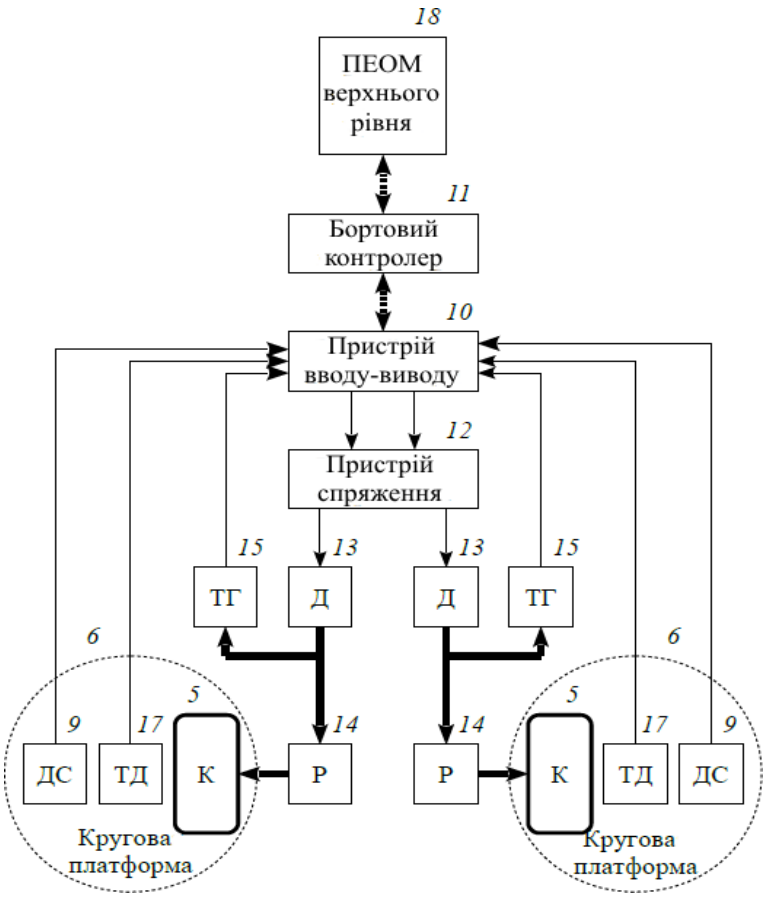


Рис. 2.11. Базова функціонально-структурна схема гібридного моделюючого комплексу для дослідження мобільної платформи

Електричні сигнали, що безперервно генеруються оптичними енкодерами 9, ваговими тензодатчиками 17 та аналоговими тахогенераторами 15 (які відповідно несуть інформацію про лінійну швидкість імітаторів поверхні 6, нормальне навантаження на осі та кутову швидкість обертання роторів двигунів 13), транслюються комунікаційними магістралями до блоку вводу-виводу 10. Завданням цього блоку є попередня обробка та передача всього масиву телеметрії безпосередньо до бортового контролера 11.

Спеціалізоване програмне забезпечення із графічним інтерфейсом, розгорнуте на керуючій ПЕОМ верхнього рівня 18, надає оператору інструментарій для синтезу складних маршрутів, програмування законів керування та візуалізації віртуального переміщення платформи у просторі (розрахунок якого ведеться на базі швидкості обертання дисків-імітаторів 6). Паралельно на монітор виводяться графіки зміни динамічного навантаження на осі (на основі даних від тензометрів 17) та розраховуються коефіцієнти поздовжнього прослизання для кожного привідного колеса 5. Алгоритм розрахунку прослизання спирається на обчислення диференціалу (різниці) між теоретичною лінійною швидкістю (отриманою від тахогенератора 15) та фактичною швидкістю руху поверхні під колесом (дані від енкодера 9). Наявність мережевого підключення ПЕОМ 18 відкриває можливості для проведення повноцінних експериментальних досліджень у дистанційному (віддаленому) режимі.

Фотографічне зображення повністю змонтованого та готового до роботи експериментального комплексу представлено на рис. 2.12 [4]. Регулювання обертів тягових електромоторів реалізовано за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги, що подається на якірні обмотки, за умови підтримання номінального незмінного струму в обмотках збудження. Трансмісія крутного моменту від валу двигуна до колісної осі здійснюється через надійні черв'ячні одноступеневі редукторні механізми. Вони виконують функцію понижувальної передачі, що дозволяє суттєво наростити крутний момент на колесі за рахунок пропорційного зниження кутової швидкості. Силовий пристрій сполучення виконує роль гальванічної та логічної розв'язки між

слабкострумовими виходами мікроконтролера та потужними ланцюгами живлення двигунів постійного струму. Конструктивно він виконаний у вигляді спеціально розробленої друкованої плати, ключовими елементами якої є потужні польові MOSFET-транзистори (VT1, VT2) з ізольованим затвором. Високочастотне перемикання (відкриття/закриття) цих транзисторів забезпечує формування потужних ШІМ-імпульсів, що живлять електродвигуни. Детальна електрична принципова схема цього силового драйвера наведена на рис. 2.13.



Рис. 2.12. Фотофіксація загального вигляду та компонування апаратного лабораторного стенда

Інтегровані в електронну схему напівпровідникові випрямні діоди VD1 та VD2 відіграють життєво важливу захисну роль. Вони функціонують як шунти, створюючи безпечний замкнутий контур для розсіювання струмів, що генеруються високою електрорушійною силою (ЕРС) самоіндукції обмоток двигуна під час комутації. Мостові діодні випрямлячі VD3 та VD4 задіяні в системі перетворення: вони випрямляють змінну напругу величиною 110 В, яка надходить зі вторинних обмоток понижувальних трансформаторів, що підключені до стандартної промислової електромережі 220 В.

Функцію "мозку" системи, що безпосередньо виконує алгоритми керування рухом, покладено на промисловий програмований логічний контролер (ПЛК) моделі Siemens Simatic S7-200 CPU 224. Цей мікропроцесорний модуль

оснащений бортовим інтерфейсом вводу-виводу, який налічує 14 дискретних (цифрових) вхідних каналів та 10 транзисторних виходів, розрахованих на комутацію напруги 24 В постійного струму. Зазначені вихідні порти фізично з'єднані з керуючими затворами силових польових транзисторів на платі драйвера сполучення. Водночас два швидкісні цифрові входи ПЛК зарезервовані для підключення оптичних енкодерів, які генерують послідовність імпульсів, частота яких строго пропорційна швидкості обертання коліс (схема комутації показана на рис. 2.14). Додатково цей ПЛК підтримує повноцінний двосторонній обмін даними з ПЕОМ верхнього рівня через стандартизований послідовний інтерфейс.

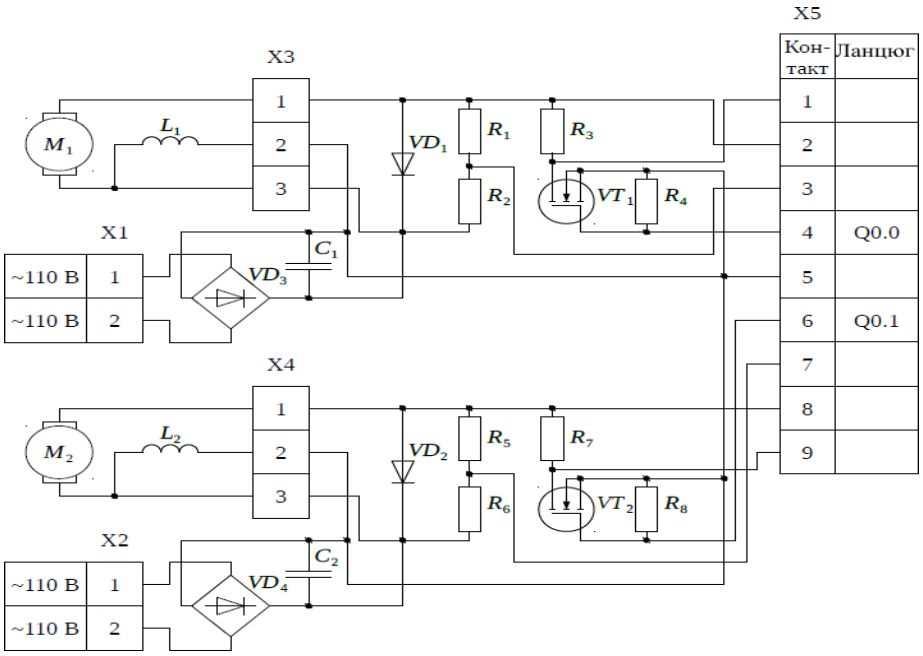


Рис. 2.13. Електрична принципова схема силового драйвера для сполучення мікропроцесора та тягових електромоторів

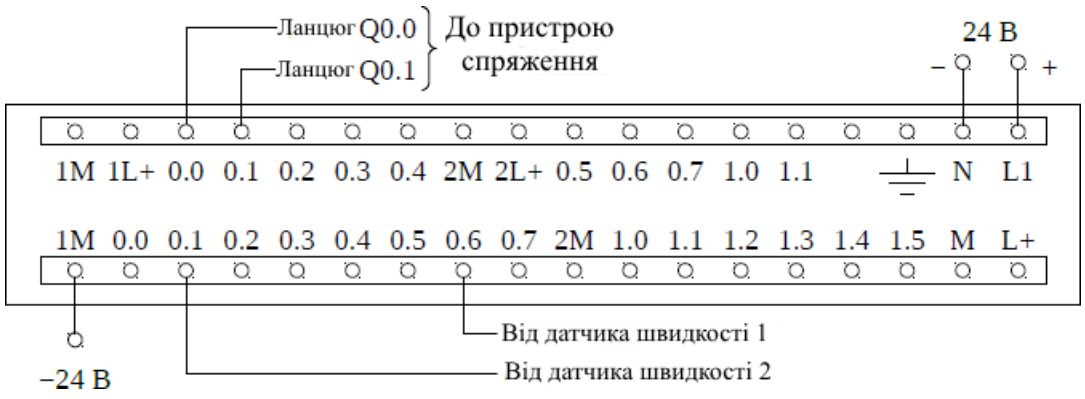


Рис. 2.14. Схема електричної комутації портів ПЛК Siemens Simatic S7-200 CPU 224 з оптичними сенсорами та силовими модулями двигунів

Процесор ПЛК регулює шпаруватість ШІМ-імпульсів, що надходять на драйвери двигунів, шляхом високочастотної комутації логічних рівнів на своїх апаратних виходах Q0.0 та Q0.1. Цифрові сенсори кутової швидкості (енкодери) фізично підключені до вхідних клем 10.1 та 10.6. Ці специфічні порти мікроконтролера налаштовані на роботу в режимі апаратних високошвидкісних лічильників, що дозволяє знімати покази без залучення ресурсів основного процесорного ядра (програмно-незалежний режим).

Завдяки інтеграції в архітектуру стенда потужного промислового контролера Siemens реалізується надійна трансляція масивів телеметричних даних (поточні швидкості дисків-імітаторів) та прийом командних керуючих впливів (для тягових коліс) від ПЕОМ верхнього рівня. Фізичний лінк між ПЛК та комп'ютером організовано через нуль-модемний кабель за протоколом RS-232. У разі інтеграції керуючої ПЕОМ у глобальну чи локальну мережу, архітектура системи дозволяє проводити повноцінні дистанційні сесії керування та моніторингу роботи експериментального комплексу [33].

2.3. Організація напівнатурного моделювання динаміки системи управління мобільним транспортним засобом

Спираючись на попередньо розроблений математичний апарат, що детально описує динаміку мобільної платформи, та враховуючи наявні апаратні можливості спроектованого експериментального стенда, доцільно перейти до концепції змішаного (гібридного або напівнатурного) моделювання руху транспортного засобу. Такий підхід передбачає синергію фізичного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення, яке в режимі реального часу відтворює математичну модель динаміки об'єкта. У межах цієї парадигми ключові силові та електромеханічні компоненти системи автоматичного керування (а саме: електронні підсилювальні каскади, тягові електродвигуни постійного струму та механічні редуктори) реалізовані фізично на базі лабораторного стенда. Натомість такі критичні змінні, як поточна величина бічного відхилення платформи від ідеальної траси та сигнал помилки

неузгодженості, повинні безперервно генеруватися програмним шляхом. Їхній розрахунок базується на вирішенні систем диференціальних рівнянь, вхідними даними для яких слугують фактичні кутові швидкості обертання кругових платформ-імітаторів, що безпосередньо контактують із тяговими колесами транспортного засобу. Такий глибокий архітектурний поділ загальної моделі на апаратну (фізичну) та софтверну (математичну) складові ініціює специфічну топологію обміну інформацією. Формуються складні та взаємопов'язані потоки даних, що циркулюють між трьома основними вузлами: безпосередньо апаратним стендом, центральним ЕОМ-сервером верхнього рівня та численними віддаленими ЕОМ-клієнтами (загальну архітектуру цієї взаємодії наочно ілюструє рис. 2.15).



Рис. 2.15. Глобальна топологія інформаційних потоків між базовими підсистемами гібридного моделюючого комплексу

Процес формування та маршрутизації потоків даних безпосередньо на нижньому (апаратному) рівні експериментального стенда (наведено на рис. 2.16) відбувається у суворій відповідності до базової функціональної схеми, яка була представлена раніше (див. рис. 2.1). Ключовою особливістю цього етапу є те, що параметр бічного відхилення не вимірюється фізичним датчиком, а синтезується обчислювальним шляхом. Базою для цього розрахунку є початкові просторові координати транспортного робота та поточні вектори швидкостей обертання його коліс. Ці швидкісні параметри знімаються за допомогою оптичних

енкодерів, встановлених під круговими платформами-імітаторами. Важливо відзначити, що головний бортовий мікроконтролер у цій архітектурі бере на себе не лише функції регулятора, але й виступає в ролі інтелектуального концентратора, забезпечуючи первинну обробку та маршрутизацію (ввід-вивід) усіх сенсорних і керівних сигналів.

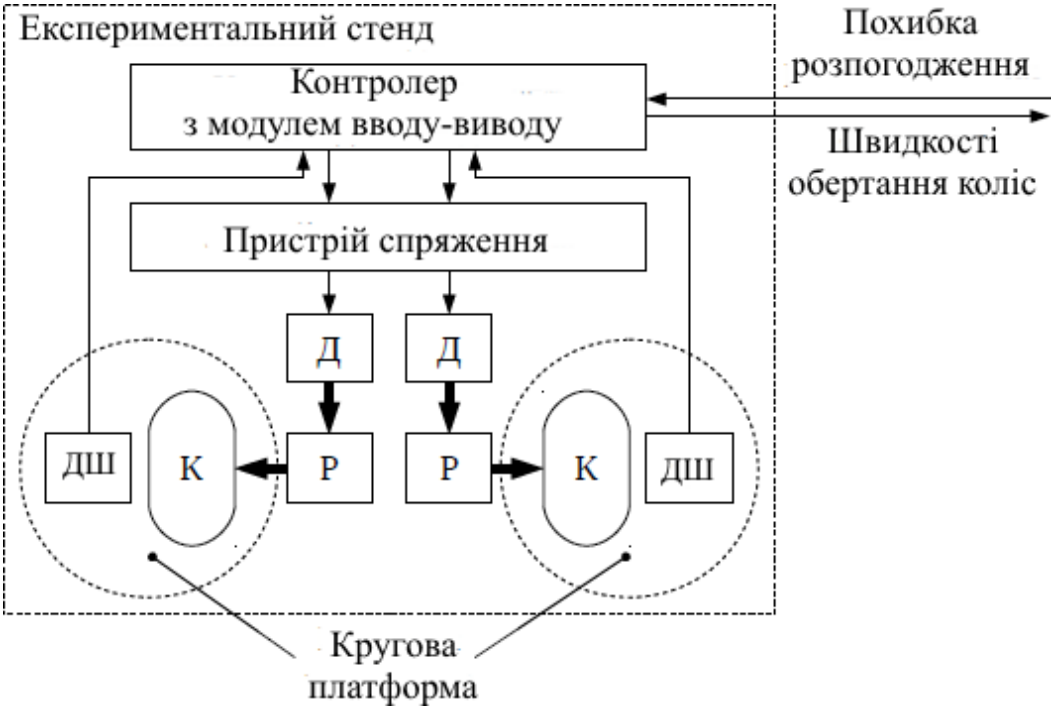


Рис. 2.16. Структура генерації та обробки локальних інформаційних потоків на рівні експериментального стенда

Що стосується програмної реалізації математичного опису, то вона може бути інкапсульована у форматі виконуваного скрипту, окремого підключеного модуля або спеціалізованої підпрограми, яка циклічно виконується в операційному середовищі центрального сервера верхнього рівня (логіку цього процесу відображено на рисунку 2.17). Спираючись на безперервний потік даних про швидкості обертання імітаційних платформ, серверний алгоритм у кожен квант часу розраховує віртуальну дистанцію x(t), яку пройшов мобільний робот, а також його поточне поперечне (бічне) відхилення Δ(t) відносно тієї точки на цільовій траєкторії, яка відповідає обчисленій пройденій відстані. Ця пара значень (координати) вичерпно та однозначно описує просторове розташування мобільної платформи відносно ідеальної кінематичної траси в заданий момент часу. Масив таких послідовно згенерованих координатних точок утворює цілісну

віртуальну траєкторію. Це саме той шлях, який фізично подолав би робот, якби його колеса котилися по реальному твердому покриттю цеху, а не спиралися на обертові ролики стенда. При цьому алгоритм розрахунку бічного відхилення обов'язково повинен компенсувати значення локального зміщення Δ0(t) самої еталонної траєкторії від вектора прямолінійного руху апарата на даній ділянці маршруту.

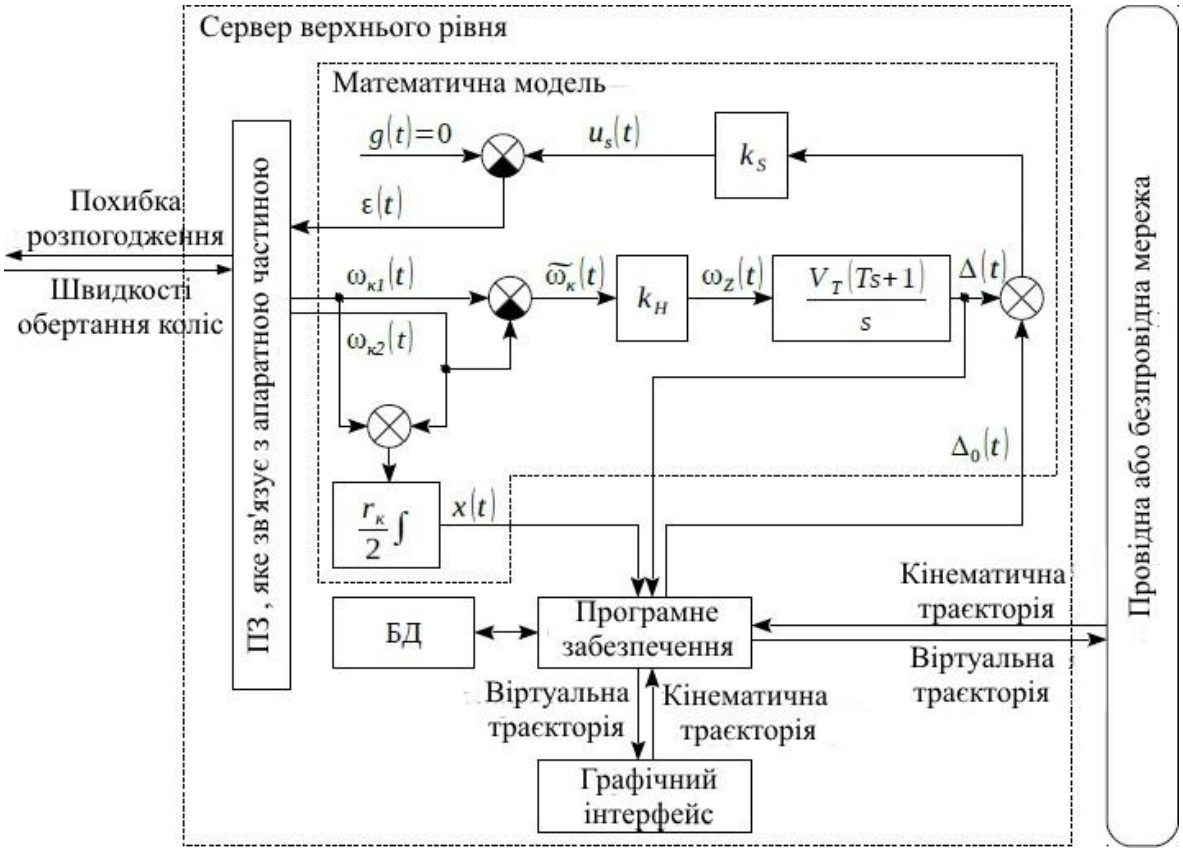


Рис. 2.17. Алгоритм формування обчислювальних потоків даних у середовищі ЕОМ-сервера верхнього рівня

Уся критично важлива інформація, зокрема координати ідеальної (заданої) та фактичної (віртуальної) траєкторій руху у вигляді структурованих масивів точок або наборів параметричних рівнянь, автоматично експортується та надійно зберігається в реляційній базі даних (БД) комплексу. Крім навігаційних масивів, БД слугує сховищем для розрахованих телеметричних і динамічних характеристик руху, результатів оптимізації, а також містить реєстр користувачів із відповідними правами доступу, які авторизовані для проведення експериментів на стенді.

Програмний код, що відповідає за візуалізацію процесів (графічний інтерфейс користувача — GUI), має гнучку архітектуру і може бути розгорнутий як локально на стороні сервера, так і дистанційно на стороні клієнта (структура клієнтських потоків зображена на рис. 2.18). Така кросплатформеність надає дослідникам потужний інструментарій: вони можуть інтерактивно задавати нові маршрути, спостерігати в режимі реального часу за синхронним відмальовуванням кінематичної (еталонної) та віртуальної (реальної) траєкторій, а також аналізувати графіки зміни динамічних параметрів руху. Причому цей функціонал доступний як з робочої станції, що безпосередньо з'єднана зі стендом, так і з будь-якої віддаленої ЕОМ, підключеної до мережі.



Рис. 2.18. Логіка формування та обробки користувацьких запитів (потоків даних) на стороні ЕОМ-клієнта

Детальний аналіз діаграм, наведених на рис. 2.17 та 2.18, чітко вказує на те, що для гарантування безперебійного, синхронізованого та надійного обміну масивами даних між гетерогенними обчислювальними процесами всередині гібридної моделі, критично необхідною є інтеграція спеціалізованого зв’язуючого програмного забезпечення (Middleware), архітектура якого показана на рис. 2.19.

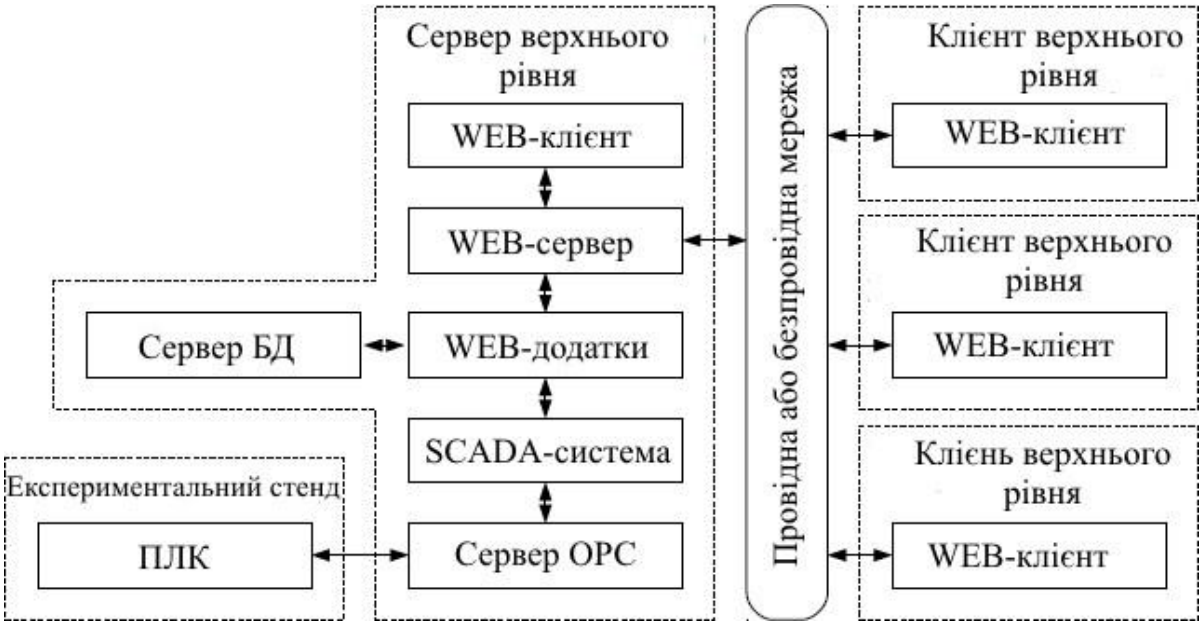


Рис. 2.19. Архітектура взаємодії компонентів зв’язуючого програмного забезпечення (Middleware)

Низькорівневий апаратний зв'язок між персональною ЕОМ та промисловим контролером стенда забезпечується за допомогою стандартизованого OPC-сервера (OLE for Process Control). Наступним рівнем ієрархії виступає SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition), яка виконує роль потужної проміжної транзитної ланки. Її завдання — агрегувати «сирі» дані від OPC-сервера та транслювати їх до спеціалізованого WEB-додатка. Саме цей WEB-додаток є ядром системи: він у режимі реального часу обчислює математичну модель динаміки транспортного засобу та паралельно керує транзакціями обміну даними з основною БД.

Можливість глобального віддаленого доступу до випробувального комплексу реалізована завдяки розгортанню WEB-сервера, який інкапсулює телеметрію та керуючі команди у стандартні пакети протоколу HTTP для передачі через Інтернет або локальну мережу. На стороні кінцевого користувача виступають стандартні WEB-клієнти (браузери), які забезпечують рендеринг графічного інтерфейсу та надають зручний інструментарій для повноцінної інтерактивної роботи дослідника з гібридною моделлю.

2.4. Процес комп'ютерного проектування та симуляції системи керування просторовим рухом мобільної платформи в інтегрованому середовищі ADAMS та MATLAB

Як відомо, будь-який базовий математичний опис динамічної системи синтезується з використанням певного ряду спрощень та ідеалізованих припущень. Для того щоб об'єктивно підтвердити ступінь адекватності розробленої теоретичної бази, виникає гостра необхідність у більш детальному та прецизійному відтворенні динаміки переміщення автономного транспортного засобу по реальному покриттю складського приміщення. Вирішення цього складного завдання стає можливим завдяки залученню сучасного спеціалізованого програмного інструментарію, призначеного для глибокого віртуального (імітаційного) моделювання механічних процесів.

З цією метою в потужному середовищі інженерного аналізу MSC ADAMS було спроектовано повноцінну тривимірну віртуальну модель чотириколісного транспортного апарата, ходова частина якого побудована за ромбоподібною кінематичною топологією (ілюстрація наведена на рис. 2.20). Щоб забезпечити можливість проведення комплексних досліджень, у програмному середовищі Simulink, яке є інтегрованою частиною математичного пакета MATLAB, було додатково розроблено архітектуру системи керування рухом для створеного віртуального прототипу. Головна функція цієї керуючої підсистеми полягає в безперервному моніторингу поточного стану об'єкта та оперативному генеруванні відповідних коригувальних впливів. Структурно комп'ютерна імітаційна модель у середовищі MATLAB Simulink розділена на два фундаментальні макроблоки: модуль алгоритмів керування під назвою «ControlBlock» та спеціалізований інтерфейсний модуль взаємодії з механічною моделлю «VehicleWithSensors» (детальніше архітектуру показано на рис. 2.21).

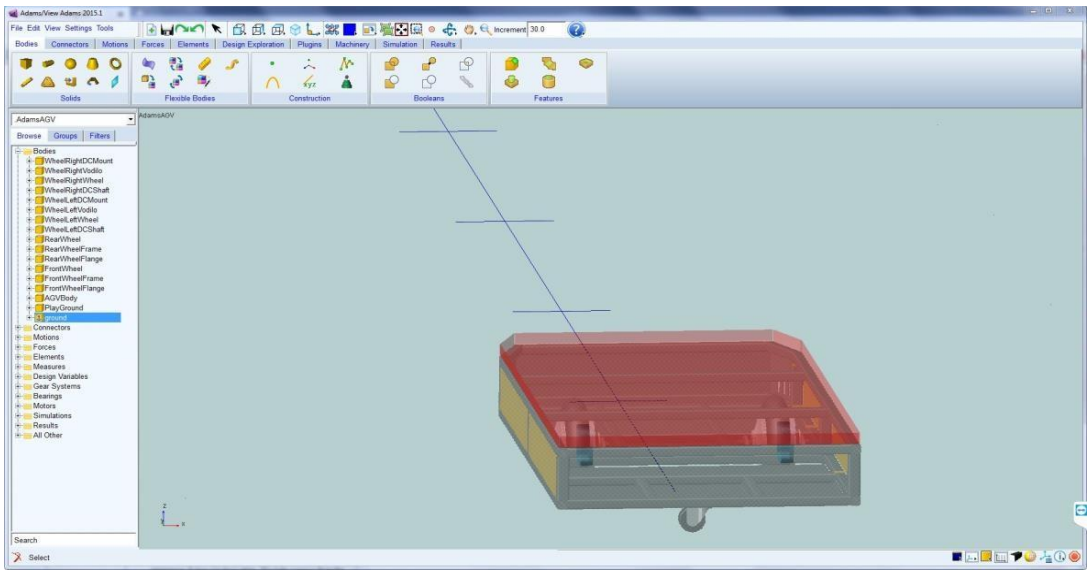


Рис. 2.20. Тривимірний віртуальний прототип ходової частини мобільної платформи, розроблений у комплексі MSC ADAMS

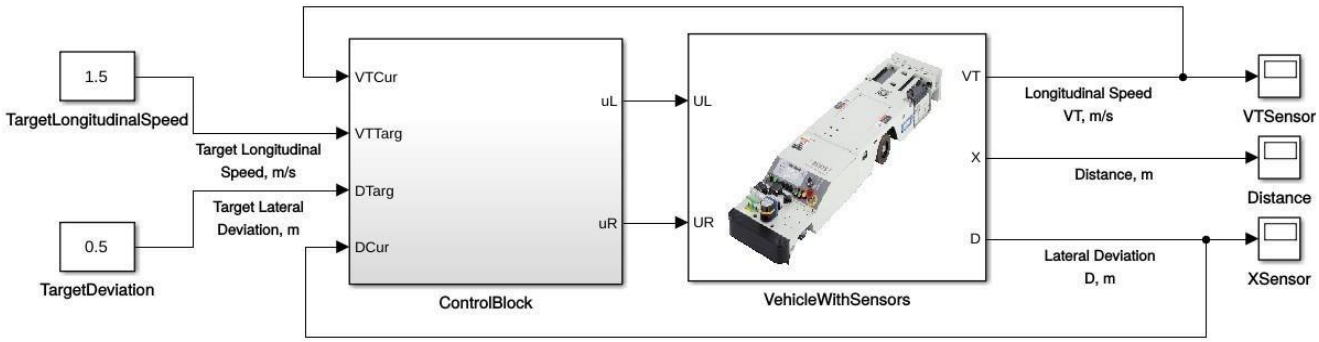


Рис. 2.21. Глобальна структура комп'ютерної моделі контуру керування транспортним засобом у середовищі MATLAB

Програмна реалізація підсистеми «VehicleWithSensors» оперує вхідними електричними параметрами — значеннями напруги, що подаються безпосередньо на лівий та правий тягові електродвигуни. Центральним ядром цього вузла виступає вкладений блок «AdamsWithMatlabMotors». Інформаційні сигнали на виході цього макроблоку еквівалентні кутовим швидкостям обертання роторів моторів. Згодом саме ці швидкісні параметри перераховуються у вектор поздовжньої лінійної швидкості та просторові координати поточного положення мобільної платформи, формуючи таким чином кінцеві вихідні змінні блоку «VehicleWithSensors» (функціональну схему

наведено на рис. 2.22).

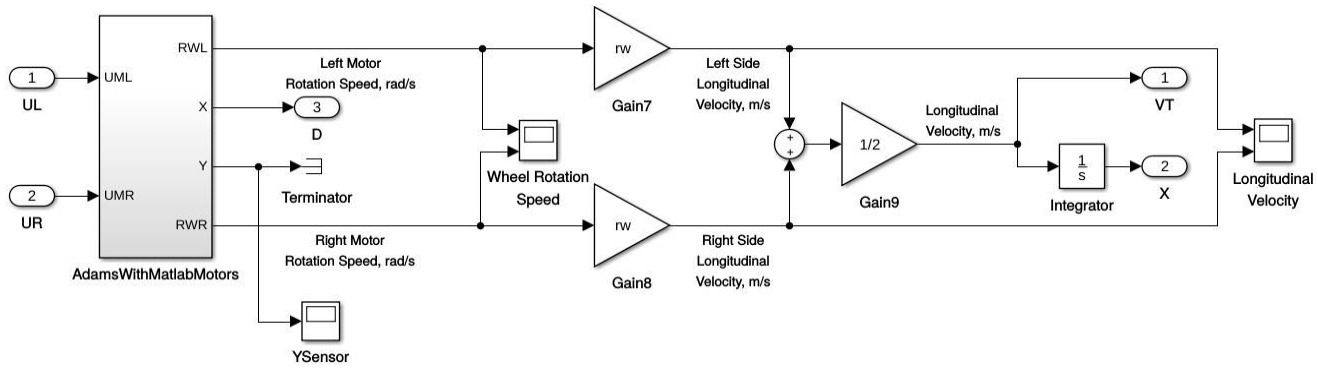


Рис. 2.22. Внутрішня алгоритмічна реалізація інтерфейсного блоку «VehicleWithSensors»

Заглиблюючись у внутрішню архітектуру вузла «AdamsWithMatlabMotors», варто відзначити, що в ньому засобами візуального програмування MATLAB Simulink відтворено точну математичну модель колекторних двигунів постійного струму. Згенерована керуюча електрична напруга конвертується в механічний обертовий момент. Цей силовий фактор, після відповідного математичного перерахунку та узгодження розмірностей фізичних величин, виступає як прямий вхідний збурювальний вплив для тривимірної механічної моделі транспортного робота, що розраховується в ядрі MSC ADAMS (деталізовано на рис. 2.23).

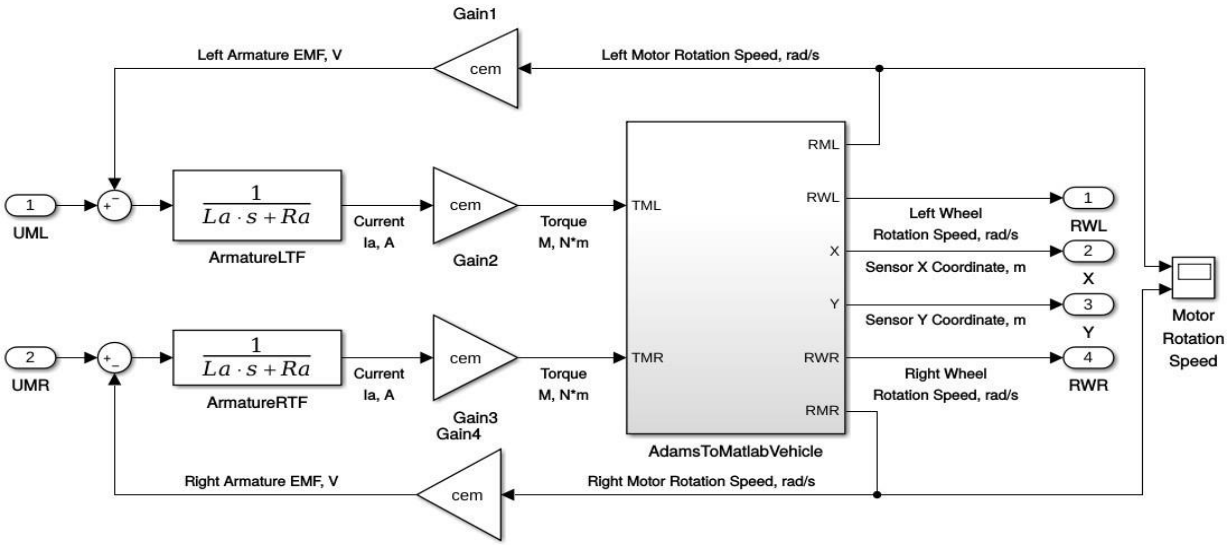


Рис. 2.23. Схема трансляції крутного моменту в підсистемі «AdamsWithMatlabMotors»

Аналізуючи модуль управління «ControlBlock» розробленої віртуальної моделі, можна виділити два ключові субблоки регуляторів: «DControl» (відповідає за мінімізацію бічних відхилень) та «VTControl» (регулює швидкісні режими). Архітектура цих субблоків є максимально відкритою та гнучкою, що дозволяє легко імплементувати й тестувати всередині них будь-які бажані математичні закони автоматичного керування як поперечним зміщенням, так і поздовжньою динамікою транспортного апарата (як це проілюстровано на рис. 2.24).

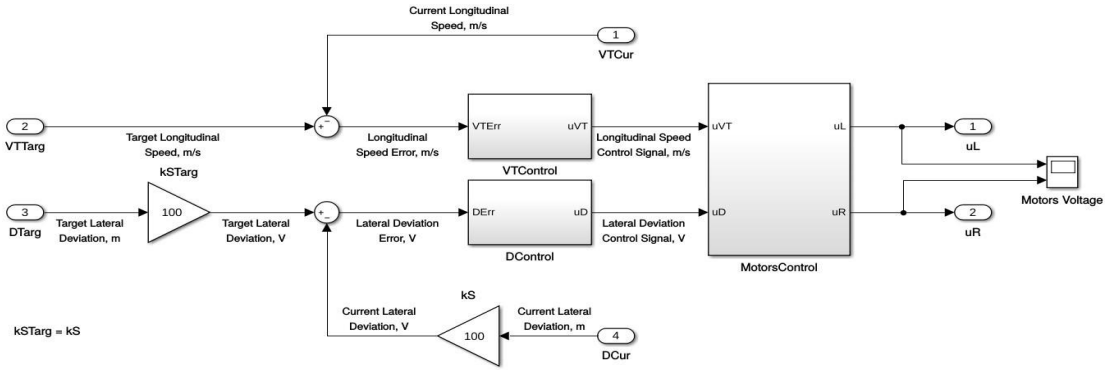


Рис. 2.24. Топологія регуляторів усередині керуючого модуля «ControlBlock»

Після обробки та корекції сформовані сигнали керування бічним відхиленням і поздовжньою швидкістю транслюються на вхідні порти трансляційного модуля «MotorsControl». Головне завдання цього блоку полягає у конвертації абстрактних логічних керуючих впливів у фізичні еквіваленти електричної напруги, яка індивідуально і пропорційно подаватиметься на лівий та правий приводні електродвигуни шасі (див. рис. 2.25).

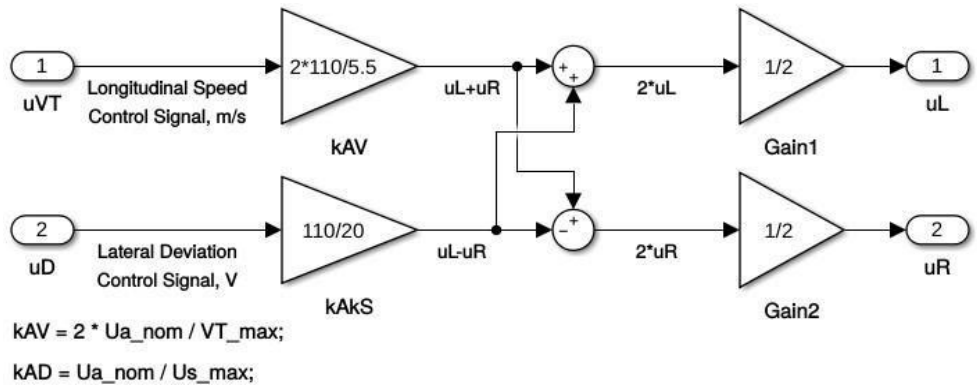


Рис. 2.25. Блок-схема перетворення керівних впливів у модулі «MotorsControl»

Наочний приклад результатів роботи віртуального імітаційного комплексу продемонстровано на рис. 2.26 (графіки виведено через постпроцесор ADAMS). У цьому конкретному досліді моделювався рух платформи, яка на старті перебувала у стані спокою (нульова швидкість) та мала початкову помилку позиціонування (бічне відхилення від ідеальної осі траси) на рівні 0,2 метра. Завданням системи було виведення об'єкта на прямолінійну ділянку маршруту зі стабілізацією цільової швидкості на позначці 0,5 м/с. Згідно з алгоритмом місії, після подолання 9 метрів дистанції система автоматично перемикається в режим прецизійного позиціонування, мета якого — забезпечити плавну і точну зупинку робота суворо на відмітці 10 метрів від точки старту.

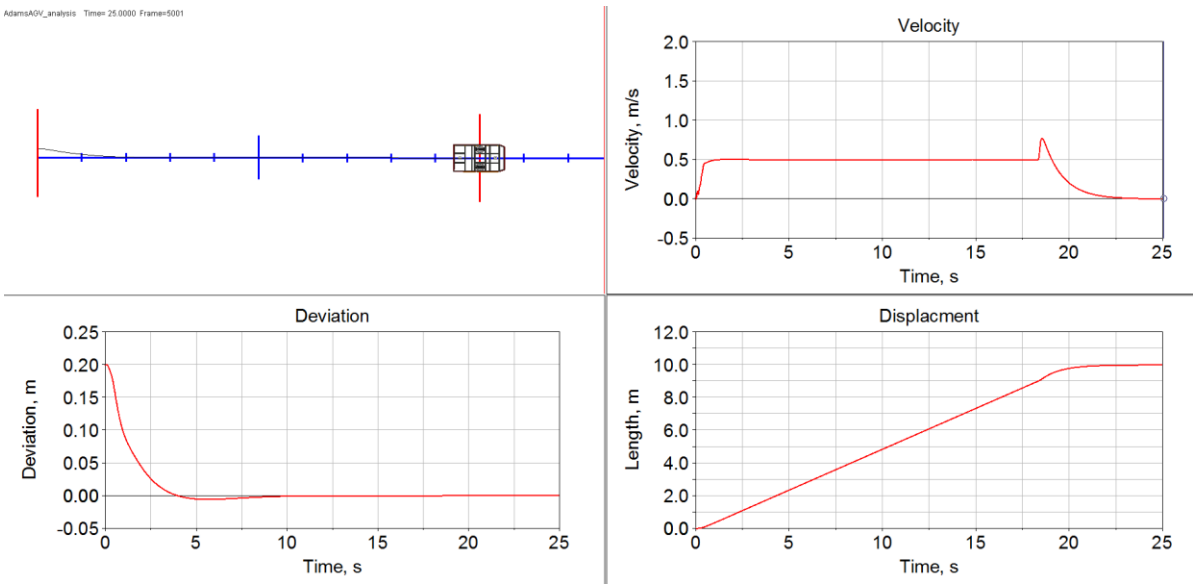


Рис. 2.26. Графічна візуалізація результатів імітаційного моделювання, згенерована в постпроцесорі середовища ADAMS

Отримані в результаті комплексного віртуального моделювання масиви даних стали переконливим підтвердженням правильності попередніх математичних розрахунків. Вони верифікували ефективність параметричного синтезу налаштувань регуляторів та довели високу стабільність інтервальної системи керування, яка успішно нівелює транспортне запізнювання в каналі зв'язку. Експерименти засвідчили, що за умов різних комбінацій значень інтервальних параметрів (варіацій загальної маси вантажу та різних уставок для поздовжньої швидкості), час перехідного процесу в каналі бічного відхилення не

перевищує гранично допустимого. Крім того, в контурі керування поздовжньою швидкістю була зафіксована повна відсутність статичної похибки, а під час фінального поздовжнього позиціонування система успішно уникнула ефекту перерегулювання (проскоку цільової точки).

Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати, що створена гібридна комп'ютерна модель, яка спирається на синергію MATLAB та віртуального прототипу шасі в MSC ADAMS, кардинально спрощує процес дослідження систем керування складськими мобільними роботами. Цей потужний інструментарій дає змогу з високою реалістичністю враховувати складні механічні явища: сили реакцій у зчленуваннях кінематичної схеми, нелінійні сили тертя, імовірність прослизання головних ведучих коліс, збурювальний вплив від пасивних опорних роликів, а також динамічний перерозподіл вагового навантаження по осях під час інтенсивних маневрів.

2.5. Верифікація математичної моделі мобільної платформи та оцінка її адекватності за критерієм середньоквадратичного відхилення

З метою об'єктивного підтвердження достовірності та точності синтезованого математичного апарату було проведено комплексний порівняльний аналіз. Базою для оцінювання слугували емпіричні масиви даних, паралельно отримані в процесі гібридного (напівнатурного) тестування на апаратному стенді та шляхом комп'ютерного віртуального моделювання динаміки контуру керування. Експериментальний сценарій передбачав старт транспортного засобу зі стану абсолютного спокою (нульова початкова швидкість) за наявності початкової помилки позиціонування, де стартове бічне зміщення становило 0,2 м. Еталонним маршрутом слугував прямолінійний відрізок шляху загальною протяжністю 10 метрів. Важливою умовою досліду була наявність фіксованої цільової точки зупинки в кінці дистанції, причому алгоритм керування автоматично перемикався в режим прецизійного позиціонування рівно за 1 метр до досягнення фінальної координати.

Для перевірки робастності та стабільності системи, випробування були навмисно проведені на граничних межах (екстремумах) заданих інтервальних

параметрів. Зокрема, досліджувався вплив зміни фізичної маси M керованої платформи, імітуючи її рух як у повністю завантаженому стані ($M = M_{max}$), так і порожнем ($M = M_{min}$). Синхронно з цим варіювалися вимоги до цільової швидкості поздовжнього переміщення V_T, яка випробовувалася на нижній (V_{Tmin} = 0.5 м/с) та верхній (V_{Tmax} = 1.5 м/s) межах експлуатаційного діапазону.

Кількісна оцінка ступеня адекватності математичної моделі здійснювалася за допомогою методів математичної статистики. Основними критеріями виступали відносна середньоквадратична похибка (позначається як δ) та пікова (найбільша) відносна похибка δ_{max}. Ці статистичні метрики розраховувалися для ключових динамічних сигналів системи автоматичного керування (деталізовано в Таблиці 2.1). До уваги бралися: динаміка бічного відхилення шасі від ідеальної траси Δ(t), а також профіль зміни поздовжньої швидкості $V_T(t)$ як на етапі інтенсивного розгону (рушання з місця), так і на етапі гальмування під час фінального позиціонування. Для забезпечення репрезентативності результатів, усі розраховані похибки були нормовані. Так, похибка каналу бічного керування приводилася до початкового зміщення у 0,2 м; швидкісні флуктуації нормувалися відносно еталонного завдання швидкості; а похибка просторового положення масштабувалася відносно метрової дистанції, виділеної на процес зупинки.

Таблиця 2.1.

Зведені статистичні показники верифікації математичної моделі на основі даних натурного та віртуального експериментів

№ п/п	Значення інтервальних параметрів	Похибка	Сигнал системи управління			
			$\Delta(t)$	$V_T(t)$ (початок руху)	$V_T(t)$ (зупинка)	$X(t)$
1	$M=M_{max}$, $V_T=V_{Tmax}$	σ, %	7,2	4,1	1,2	0,9
		σ_{max}, %	20,9	11,5	9,1	2,85
2	$M=M_{max}$, $V_T=V_{Tmin}$	σ, %	7,9	6,4	0,9	0,2
		σ_{max}, %	23,1	27,9	6,2	0,5
3	$M=M_{min}$, $V_T=V_{Tmax}$	σ, %	4,3	4,1	1,75	2,3
		σ_{max}, %	17,1	23,2	24,3	8,8
4	$M=M_{min}$, $V_T=V_{Tmin}$	σ, %	6,0	2,9	1,7	1,8
		σ_{max}, %	16,9	12,3	14,4	6,8

Детальний порівняльний аналіз теоретичних розрахунків та практичних експериментальних даних засвідчив високу якість розробленої моделі. Було встановлено, що загальне відносне середньоквадратичне відхилення протягом усього циклу руху не перетинає межу в ±10%. Більше того, фазовий аналіз руху виявив важливу закономірність: після завершення етапу розгону, коли транспортний апарат переходить у номінальний (усталений) режим функціонування, адекватність моделі кардинально зростає. Це пояснюється тим, що під час рівномірного руху домінуючим фактором опору стає стабільна сила тертя кочення, яка є значно меншою і легше піддається математичному опису, ніж імпульсні сили тертя спокою, характерні для моменту рушання з місця. Крім того, в усталеному режимі суттєво мінімізуються негативні ефекти від кінематичного прослизання головних ведучих коліс та паразитного опору з боку пасивних (опорних) роликів. Як наслідок, на маршових ділянках траєкторії точність моделювання сягає максимуму, а відносне середньоквадратичне відхилення звужується до надзвичайно малого діапазону, що не перевищує ±3%.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено комплексне дослідження, проектування та верифікацію системи управління рухом мобільного транспортного засобу. Для детального вивчення динаміки об'єкта було розроблено комп'ютерну імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Створена програмна архітектура дозволяє генерувати та аналізувати просторову траєкторію переміщення роботизованої платформи, безперервно обчислюючи фактичну швидкість руху та величину поточного бічного відхилення від еталонного маршруту. Крім того, для глибшого аналізу механічних процесів було спроектовано тривимірний віртуальний прототип ходової частини в середовищі інженерного аналізу MSC ADAMS, який функціонує в єдиному комплексі з алгоритмами керування MATLAB Simulink. Застосування цього інструментарію дало змогу максимально реалістично врахувати складні нелінійні явища: сили тертя, прослизання ведучих коліс та динамічний перерозподіл вагового навантаження під час маневрів.

З метою підвищення адекватності результатів та подолання обмежень суто

математичного (віртуального) моделювання, було розроблено спеціалізований експериментальний лабораторний стенд для гібридного (напівнатурного) дослідження. Цей стенд апаратно реалізує фізичну взаємодію коліс із круговими платформами-імітаторами дорожнього полотна, тоді як керування силовими модулями здійснюється за допомогою промислового логічного контролера Siemens Simatic S7-200. У рамках цього підходу успішно організовано архітектуру напівнатурного моделювання, яка безшовно об'єднує фізичне обладнання (двигуни, датчики, контролер) та математичну обчислювальну складову. Це стало можливим завдяки інтеграції спеціалізованого зв’язуючого програмного забезпечення, що включає OPC-сервер, SCADA-систему та WEB-додатки, дозволивши в режимі реального часу відтворювати процеси управління на базі фактичних вимірювань кутових швидкостей.

На фінальному етапі проведена верифікація математичної моделі за критерієм середньоквадратичного відхилення повністю підтвердила її високу точність та адекватність. Порівняльний аналіз експериментальних та віртуальних даних показав, що загальне відносне середньоквадратичне відхилення протягом усього циклу руху не перевищує ±10%. Разом з тим було встановлено, що в номінальному (усталеному) режимі переміщення, де суттєво мінімізуються збурювальні впливи сил тертя спокою та прослизання, похибка моделювання звужується до надзвичайно малого значення, що не перевищує ±3%.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І СИНТЕЗУ ЗАКОНУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ІНТЕРВАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ І ЗАПІЗНЕННЯМ В КАНАЛІ УПРАВЛІННЯ

3.1 Створення комплексної моделі керування просторовим рухом автономної платформи

Аналіз конструктивних рішень для складської логістики доводить доцільність використання мобільних платформ із чотириколісним ромбоподібним шасі (два ведучі мотор-редуктори на поперечній осі та два пасивні ролики на поздовжній). Керування рухом (рис. 3.1) здійснюється мікроконтролером через ШІМ-регулювання напруги на двигунах. Для навігації застосовується винесений уперед датчик відхилення від оптичної лінії та сенсор міток для точної зупинки. Обробка цих сигналів апаратною частиною неминуче вносить транспортне запізнювання в контур керування. Спрощення математичної моделі досягається завдяки припущенням про рух ідеально рівною поверхнею без прослизання, нехтуванню впливом пасивних коліс та динамічним перерозподілом ваги. Це дає змогу використовувати лінійний математичний апарат для роздільного опису поздовжньої та поперечної динаміки з подальшим їх об'єднанням.

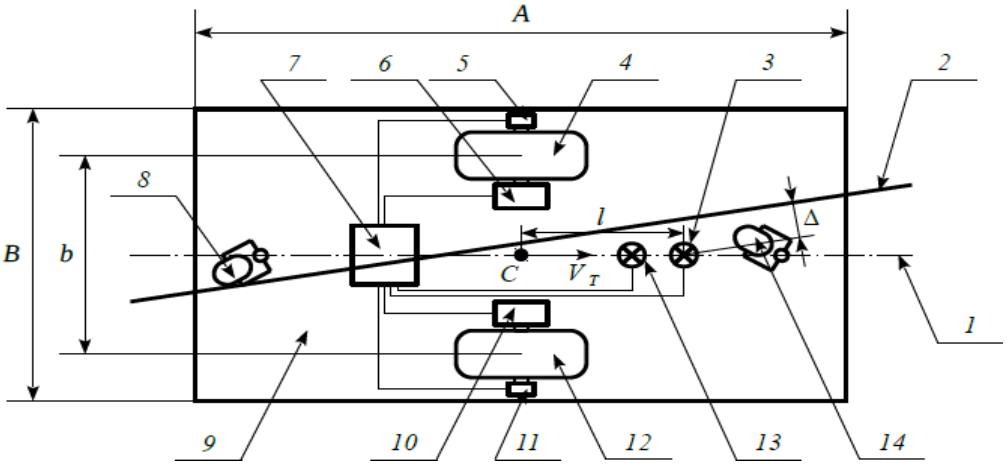


Рис. 3.1. Схема будови автономного візка з ромбоподібним розташуванням коліс

Удосконалена модель контуру поперечної стабілізації (рис. 3.2) враховує динаміку редукторів, підсилювача та наявність запізнювання. Оскільки еталонне бічне відхилення дорівнює нулю, система реагує виключно на похибку, формуючи різницю напруг для правого та лівого двигунів. Електроприводи представлені як аперіодичні ланки (формули 3.1–3.3).

$$k_M = \frac{1}{c_{em}} \tag{3.1}$$

$$T^{\pm}_{MD} = T_m + T^{\pm}_{mZ}. \tag{3.2}$$

$$T_m = \frac{R_a J}{c^2_{em}}. \tag{3.3}$$

Їхня інтервальна стала часу та зведений момент інерції критично залежать від маси вантажу, що може змінюватися від нуля до максимуму. Кінематичний зв'язок $k_R = \frac{1}{i_R}.$ перетворює різницю швидкостей коліс на кутову швидкість повороту платформи. Кінцева передавальна функція $W_P(s) = \frac{\Delta(s)}{\Omega_Z(s)} = \frac{l^{\pm} \cdot s + V^{\pm}_T}{s^2}.$ ілюструє, що бічне зміщення формується шляхом подвійного інтегрування кутової швидкості, причому винесене вперед розташування датчика забезпечує ефект форсування (фазового випередження), що покращує керованість.

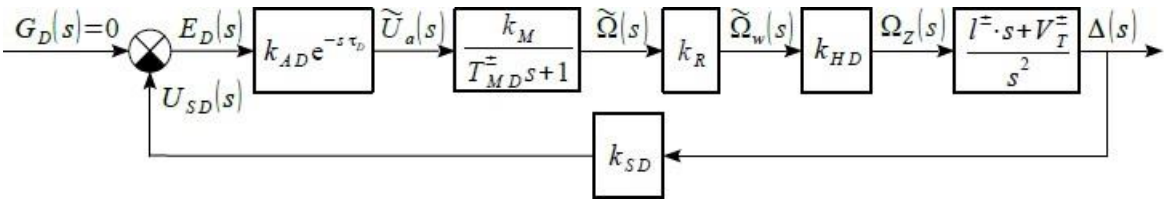


Рис. 3.2. Блок-схема контуру регулювання поперечного зміщення візка

Керування поздовжнім рухом розділене на режими стабілізації лінійної швидкості та точного позиціонування. У швидкісному контурі (рис. 3.3) контролер компенсує похибку між заданою та фактичною швидкостями, формуючи сумарну напругу для моторів. Динаміка розгону також лімітується інтервальною масою платформи $T^{\pm}_{MT} = T_m + T^{\pm}_{mT}$. Для нівелювання статичної похибки швидкості доцільно використовувати ПІ-регулятор. Режим

позиціонування (рис. 3.4) активується перед зупинкою і перетворює швидкість коліс на пройдену дистанцію через інтегруючу ланку.

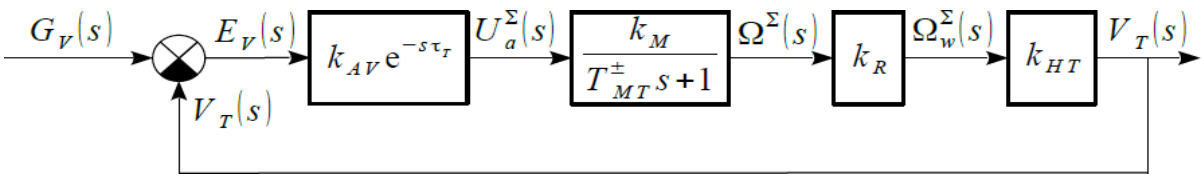


Рис. 3.3. Структура контуру стабілізації лінійної швидкості

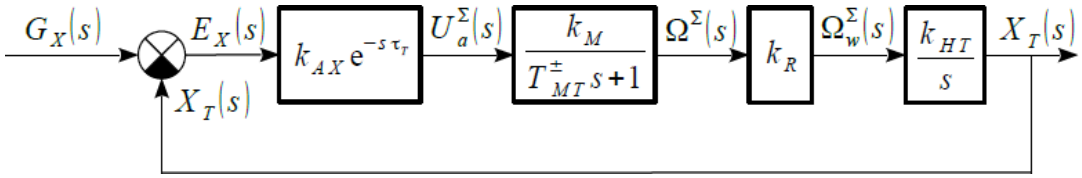


Рис. 3.4. Схема алгоритму зупинки у заданій точці

Оскільки швидкість впливає на швидкість зміни бічного відхилення, а виконавчі механізми є спільними, ізольовані контури об'єднано в комплексну модель (рис. 3.5). Вона містить логічний перемикач: під час маршового руху система стабілізує швидкість, а за 1 метр до цільової мітки переходить у режим гальмування та точного позиціонування. Вплив змінної швидкості на бічну динаміку відображено у структурі самої платформи (рис. 3.6). Крім того, під час проходження криволінійних ділянок маршруту зміна вектора траси діє як зовнішнє збурення, що автоматично відпрацьовується системою поперечної стабілізації (рис. 3.7).

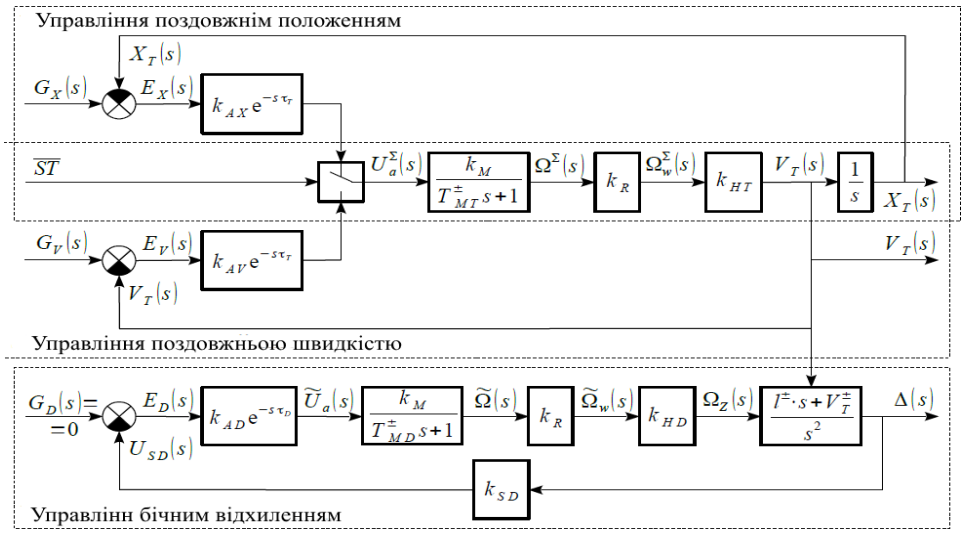


Рис. 3.5. Комплексна структурна схема керування мобільним роботом

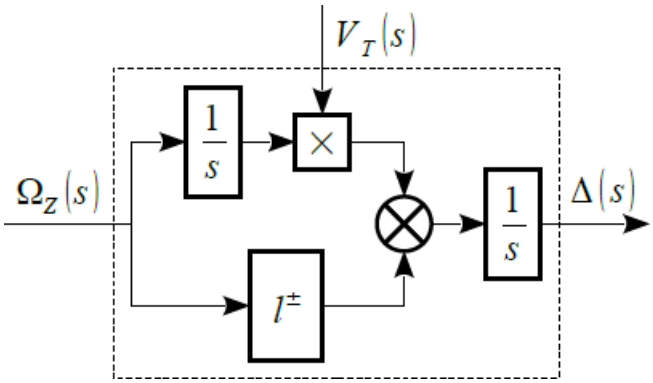


Рис. 3.6. Динамічна модель платформи зі змінною лінійною швидкістю

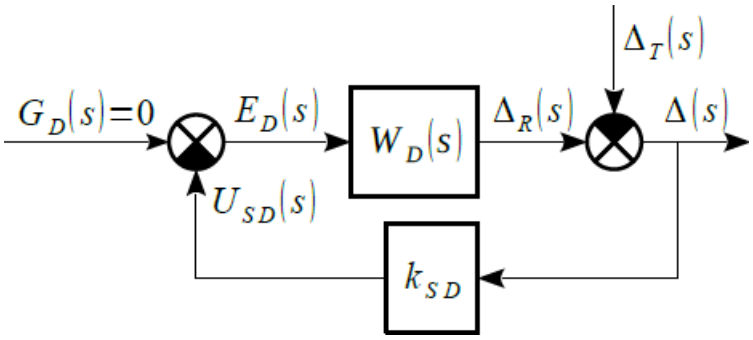


Рис. 3.7. Реакція системи поперечної стабілізації на криволінійні ділянки маршруту

Підсумовуючи другий розділ, зазначимо: для складської логістики оптимальним є чотириколісний робот з оптико-штрихкодовою навігацією. Створена комплексна математична модель адекватно описує взаємозв'язки між усіма режимами руху, враховуючи як апаратне запізнювання, так і інтервальну невизначеність маси вантажу.

3.2 Синтез алгоритмів керування для об'єкта з інтервальними параметрами та запізнюванням

Для гарантування стабільності руху за умов зміни ваги вантажу застосовано метод розширеного D-розбиття. Характеристичне рівняння замкненої системи $D^{\pm}(s)=\boldsymbol{M}^{\pm}(s)\boldsymbol{K}+C^{\pm}(s)=0.$, $\boldsymbol{K}_1=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{K}_2)$, розділяється на незалежні та залежні коефіцієнти регулятора. Головна мета синтезу — знайти таку робочу зону параметрів, де всі корені рівняння гарантовано лежатимуть лівіше заданої межі

стабільності $\Lambda = -\delta(\omega) + j\omega$, для всього діапазону інтервальних змінних. Розв'язання системи матричних рівнянь дозволяє $\boldsymbol{A}^0(\xi)\boldsymbol{K}_1 + \boldsymbol{B}^0(\xi)\boldsymbol{K}_2 + \boldsymbol{C}^0(\xi) = 0$, побудувати відповідні криві та визначити оптимальні налаштування.

Цей математичний апарат було застосовано для розрахунку ПІД-регулятора в контурі поперечного відхилення (рис. 3.8). Характеристичний поліном

$$k_D\left(k_{PD}s + k_{ID} + k_{DD}s^2\right)\left(l^{\pm}\cdot s + V_T^{\pm}\right)e^{-s\tau_D} + \left(T_{MD}^{\pm}s + 1\right)s^3 = 0,$$

аналізується через незалежні (пропорційний і диференціальний) та залежний (інтегральний) коефіцієнти. Жорсткі вимоги до часу перехідного процесу та перерегулювання формують допустиму зону розташування коренів (рис. 3.9). Побудовані за цими критеріями межі D-розбиття (рис. 3.10) дали змогу виділити спільну область робастності, всередині якої обрано єдиний набір налаштувань ПІД-регулятора, що забезпечує стабільність незалежно від маси візка.

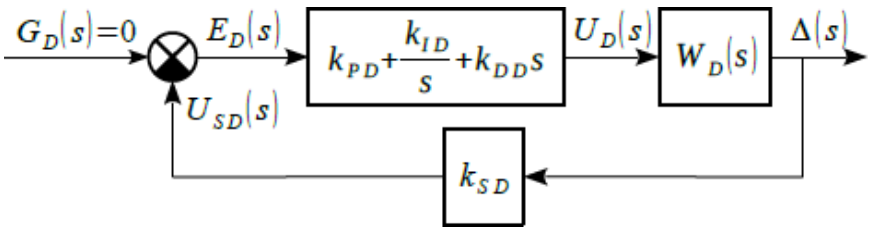


Рис. 3.8 Введення ПІД-регулятора в контур поперечного зміщення

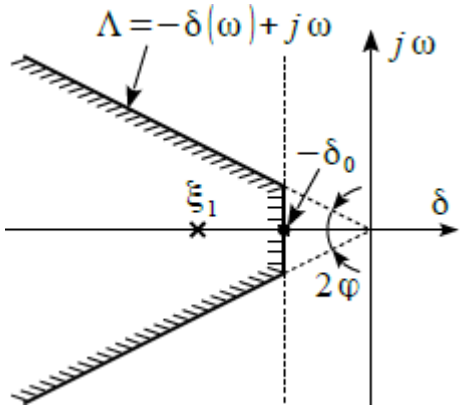


Рис. 3.9 Граничні зони розподілу коренів для забезпечення робастності

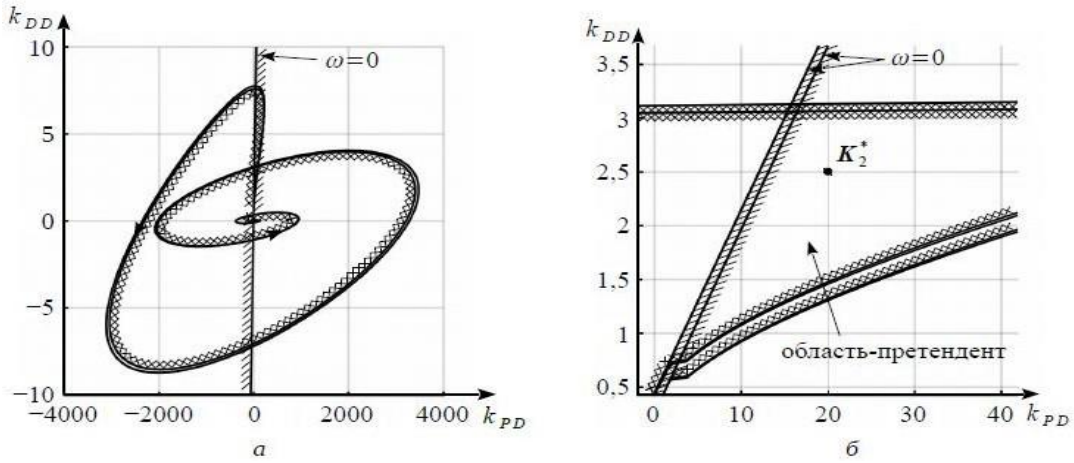


Рис. 3.10 Графіки D-розбиття та локалізація робочої зони налаштувань

Аналогічний алгоритм використано для оптимізації поздовжньої динаміки. Для усунення статичної похибки в контурі швидкості синтезовано ПІ-регулятор $\left(k_{PV}s+k_{IV}\right)k_V^{\pm}\mathrm{e}^{-\tau_T s}+s\left(T_{MT}^{\pm}s+1\right)=0,$. Водночас для контуру точного зупинення виявилося достатнім застосування простого П-регулятора $k_{PX}k_V^{\pm}\mathrm{e}^{-\tau_T s}+s\left(T_{MT}^{\pm}s+1\right)=0,$, коефіцієнт якого також знайдено через побудову кривих D-розбиття.

Верифікація налаштувань підтвердила робастну модальність системи. Локалізація коренів, апроксимованих рядом Паде (рис. 3.11), та аналіз частотних годографів (рис. 3.12) довели безумовну стійкість контурів навіть за наявності транспортного запізнювання. Побудовані графіки перехідних процесів (рис. 3.13) для граничних комбінацій маси та швидкості підтвердили, що динамічні показники не виходять за встановлені допуски, гарантуючи надійне та плавне переміщення вантажів.

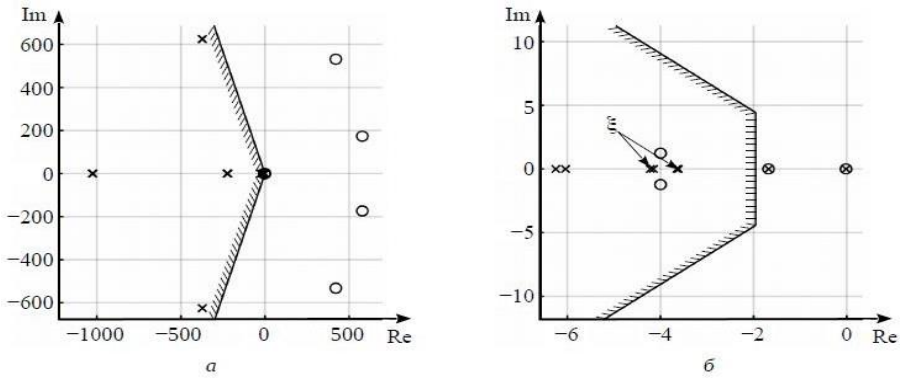


Рис. 3.11 Локалізація коренів скоригованої моделі на комплексній площині

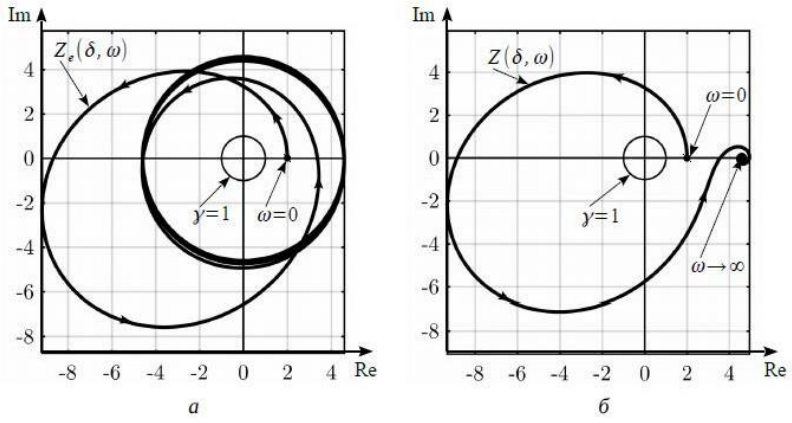


Рис. 3.12 Частотні характеристики (годографи) оптимізованої системи

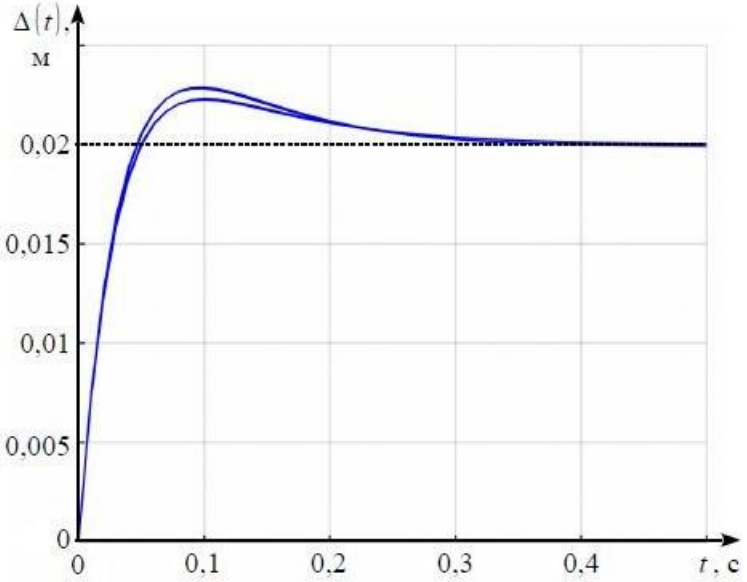


Рис. 3.13 Сімейство перехідних процесів при екстремальних значеннях параметрів

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було розроблено систему керування та синтезовано алгоритми управління рухом мобільного транспортного засобу. Зокрема, розроблено комплексну математичну модель керування просторовим рухом мобільної платформи з чотириколісним ромбоподібним шасі. Ця модель адекватно описує складні взаємозв'язки між режимами поздовжнього і поперечного руху. Важливою її перевагою є здатність враховувати як апаратне (транспортне) запізнювання в контурі керування, так і інтервальну

невизначеність параметрів керованого об'єкта, зокрема динамічну зміну маси вантажу від нуля до максимально допустимого значення.

Для забезпечення необхідних динамічних та статичних показників якості функціонування системи було обґрунтовано використання перевірених класичних законів керування. Відповідно, синтезовано ПІД-регулятор для контуру мінімізації поперечного відхилення, ПІ-регулятор для надійного усунення статичної похибки в контурі стабілізації поздовжньої швидкості, а також П-регулятор для режиму прецизійного позиціонування під час зупинки. Безпосередній розрахунок оптимальних налаштувань цих регуляторів було здійснено із застосуванням методу розширеного D-розбиття. Використання цього потужного математичного апарату дозволило виділити спільні області робастності та прецизійно визначити такі параметри регуляторів, за яких усі корені характеристичних рівнянь гарантовано розташовуються лівіше заданої межі стабільності для всього діапазону коливань інтервальних змінних.

На завершальному етапі було проведено ґрунтовну верифікацію синтезованих алгоритмів, яка повністю підтвердила робастну модальність розробленої системи. Детальна локалізація коренів, здійснена з використанням апроксимації за рядом Паде, а також глибокий аналіз частотних годографів переконливо довели безумовну стійкість усіх контурів керування навіть за умов наявності значного транспортного запізнювання. Додатково побудовані графіки перехідних процесів для екстремальних комбінацій параметрів маси та швидкості підтвердили, що ключові динамічні показники надійно залишаються в межах жорстко встановлених допусків, гарантуючи абсолютно безпечне, стабільне та плавне переміщення складських вантажів.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Система охорони праці являє собою комплексний механізм, що інтегрує нормативно-правові, соціально-економічні, санітарно-гігієнічні та організаційні заходи, спрямовані на збереження здоров'я та високої працездатності фахівців у процесі їхньої професійної діяльності. Стрімкий науково-технічний прогрес кардинально трансформував умови роботи фахівців інтелектуальної сфери, зокрема інженерів-програмістів та розробників автоматизованих систем. Їхня праця відзначається високою інтенсивністю та вимагає значної концентрації розумової, зорової і нервово-емоційної енергії. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність застосування комплексного ергономічного підходу до організації робочого простору та суворої регламентації режимів праці й відпочинку. У даному розділі проведено детальний аналіз організації робочого місця інженера-програміста, розглянуто питання забезпечення електробезпеки та визначено алгоритми дій персоналу в разі виникнення надзвичайних ситуацій.

4.1. Організація та ергономічне забезпечення робочого місця розробника

Робоче місце інженера-програміста — це чітко локалізована зона простору, оснащена необхідними технічними засобами, де фахівець здійснює свою професійну діяльність та проводить переважну частину робочого часу. Раціонально організований простір, що враховує антропометричні, фізіологічні та психологічні особливості людини, гарантує підтримання зручної робочої пози, що мінімізує фізичну втому та психоемоційне напруження. Практика свідчить, що дотримання ергономічних стандартів здатне підвищити загальну продуктивність праці інженера на 8–20 відсотків.

Проектування робочої зони повинно здійснюватися з урахуванням нормативних вимог, які регламентують просторове компонування елементів. Оптимальна організація робочого місця розробника програмного забезпечення вимагає виконання низки базових умов: раціонального розміщення комп'ютерної техніки та периферії, забезпечення достатнього простору для вільних рухів, дотримання норм природного та штучного освітлення, а також жорсткого

контролю рівня акустичного шуму.

Основними апаратними елементами робочого місця є спеціалізований письмовий стіл та ергономічне крісло, оскільки базовою робочою позою програміста є положення сидячи. Саме така поза за умови правильної підтримки хребта викликає найменше м'язове стомлення. Важливим концептом у проектуванні є «моторне поле» — визначений простір, у межах якого людина здійснює рухові маніпуляції. Найбільш затребувані засоби праці (клавіатура, маніпулятор «миша», документація) повинні розташовуватися в зоні оптимальної досяжності, що обмежується дугами руху передпліч при фіксованих ліктьових суглобах.

Конструкція робочого столу має забезпечувати вільне розміщення ніг, виключати появу світлових відблисків на робочій поверхні та містити висувні ящики для зберігання технічної документації і носіїв інформації. Своєю чергою, робоче крісло повинно гарантувати фізіологічно правильну підтримку тіла. Воно має оснащуватися механізмами регулювання висоти сидіння, мати злегка увігнуту поверхню та регульований кут нахилу спинки для забезпечення динамічної зміни поз протягом робочої зміни.

4.2. Забезпечення електробезпеки та захист від впливу електромагнітних випромінювань

Професійна діяльність інженера-розробника безперервно пов'язана з експлуатацією електронно-обчислювальних машин, периферійної техніки, серверного обладнання та лабораторних апаратних стендів, які живляться від промислової електричної мережі. Незважаючи на те, що сучасна офісна техніка має високий клас ізоляції, завжди існує потенційний ризик ураження працівника електричним струмом унаслідок пошкодження кабелів живлення, пробою ізоляції або виникнення короткого замикання. Відповідно до нормативних документів, приміщення для роботи з обчислювальною технікою класифікуються як приміщення без підвищеної небезпеки, однак це не скасовує необхідності суворого дотримання правил електробезпеки.

Основним технічним заходом захисту від ураження електричним струмом є

надійне захисне заземлення всіх металевих неструмоведучих частин обладнання (корпусів системних блоків, стійок, лабораторних стендів), які можуть опинитися під напругою внаслідок аварії. Категорично забороняється використання подовжувачів або розеток із відсутнім заземлюючим контактом. Крім того, на робочому місці повинні бути виключені будь-які можливості одночасного дотику працівника до корпусу комп'ютера та заземлених металевих конструкцій будівлі (наприклад, труб центрального опалення або водопостачання). До організаційних заходів безпеки належить регулярний візуальний огляд цілісності ізоляції проводів перед початком роботи та сувора заборона на самостійний ремонт техніки під напругою.

Ще одним важливим аспектом є захист фахівця від впливу неіонізуючих електромагнітних полів (ЕМП) та накопичення статичної електрики. Працююча комп'ютерна техніка генерує електромагнітні випромінювання в широкому спектрі частот. Хоча рівень цього випромінювання в сучасних пристроях є мінімальним, його тривалий сумарний вплив протягом робочого дня може призводити до підвищеної втомлюваності, головного болю та зниження імунітету. Для мінімізації цього впливу робочі місця повинні розташовуватися на безпечній відстані одне від одного (не менше 1,2 метра між бічними панелями моніторів різних робочих місць).

Проблема накопичення статичної електрики вирішується шляхом підтримання оптимального мікроклімату в приміщенні (зокрема, відносної вологості повітря на рівні 40–60%). У разі необхідності застосовуються спеціальні антистатичні покриття для підлоги та проводиться регулярне вологе прибирання приміщення. Виконання цих нескладних, але обов'язкових правил гарантує безпечну взаємодію інженера з електронними пристроями та знижує ризик розвитку професійних захворювань.

4.3. Безпека життєдіяльності та алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях

Абсолютно кожна сфера професійної діяльності супроводжується певним рівнем потенційних ризиків, що генеруються впливом різноманітних

небезпечних факторів техногенного чи природного походження. У штатному виробничому середовищі небезпека переважно має прихований характер, проте за умови збігу ряду критичних обставин — таких як активізація джерела небезпеки, перебування працівника в зоні ураження та відсутність або неспрацювання надійних засобів захисту — вона миттєво перетворюється на реальну загрозу. Сама ж надзвичайна ситуація класифікується за чіткими критеріями: це раптове виникнення прямої загрози здоров'ю та життю персоналу, ймовірність завдання масштабних економічних збитків підприємству або ж ризик стрімкого погіршення екологічного стану навколишнього середовища.

Специфіка роботи інженера-програміста передбачає безперервну експлуатацію електронно-обчислювальних машин, серверних комплексів та супутнього периферійного обладнання. У цьому контексті найбільш імовірними сценаріями розвитку аварійних подій вважаються ризики ураження персоналу електричним струмом, виникнення коротких замикань із подальшим пожежним займанням апаратури, а також раптові аварії в комунальних системах водопостачання чи теплових мережах будівлі.

З метою мінімізації ризиків та запобігання тяжким наслідкам на підприємствах впроваджується суворий алгоритм превентивних та оперативних дій. Зокрема, інженер зобов'язаний миттєво припинити виконання робочих завдань, повністю знеструмити закріплене за ним обладнання та невідкладно сповістити безпосереднє керівництво в разі фіксації будь-яких критичних відхилень. До таких тривожних ознак належать виявлення видимих механічних руйнувань чи термічного оплавлення ізоляції електрокабелів і корпусів приладів, поява нетипового стороннього шуму, іскріння контактів або аномально високого виділення тепла від апаратної частини. Крім того, безумовною підставою для аварійної зупинки роботи є постійне нестабільне мерехтіння чи візуальні артефакти на дисплеї монітора, виникнення стійкого різкого запаху горілого пластику чи диму в приміщенні, а також будь-яке несанкціоноване раптове припинення централізованого постачання електроенергії.

У ситуації, коли відбувається відкрите займання, першочерговим обов'язком

працівника є оперативне відключення всієї техніки від електромережі та негайне ініціювання виклику підрозділів пожежно-рятувальної служби. Одночасно з інформуванням керівництва та виключно за умови повної відсутності загрози власному життю, фахівець повинен спробувати локалізувати осередок вогню, використовуючи наявні первинні засоби пожежогасіння, такі як вуглекислотні або спеціальні порошкові вогнегасники. Якщо ж унаслідок розгортання аварійної ситуації хтось із персоналу отримав травму, найголовнішим завданням стає швидке та безпечне звільнення потерпілого від руйнівної дії травмуючого фактора. Після цього необхідно терміново викликати бригаду екстреної медичної допомоги та надати постраждалому першу долікарняну допомогу, намагаючись при цьому максимально зберегти недоторканою обстановку на місці інциденту для забезпечення об'єктивного подальшого розслідування причин аварії. У разі ж виникнення проривів інженерних комунікацій, наприклад водопровідних чи опалювальних труб, персонал має негайно вжити всіх доступних заходів для фізичної ізоляції серверного та комп'ютерного обладнання від залиття водою і терміново викликати профільну аварійну службу.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було сформульовано та обґрунтовано комплекс санітарно-гігієнічних і технічних вимог до організації безпечного робочого середовища інженера-програміста. Встановлено, що ретельне дотримання ергономічних стандартів просторового компонування комп'ютерної техніки є запорукою мінімізації психофізіологічної втоми фахівця. Крім того, детальний аналіз вимог щодо електробезпеки довів критичну важливість застосування систем захисного заземлення та контролю за рівнем статичної електрики і електромагнітних випромінювань у робочому приміщенні. Реалізація наведених умов праці та чітке дотримання розроблених алгоритмів дій під час виникнення надзвичайних ситуацій дозволяє не лише зберегти здоров'я працівника, але й гарантує стабільне підвищення показників продуктивності та безпеки його інтелектуальної праці.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання — розроблено та досліджено комплексну систему автоматичного керування просторовим рухом мобільних транспортних засобів (роботів) для внутрішньоцехової логістики. На основі аналізу сучасних методів автоматизації логістичних процесів обґрунтовано доцільність використання мобільної платформи з чотириколісним ромбоподібним шасі та оптико-штрихкодовою системою навігації. Встановлено, що для забезпечення високої точності руху математичні моделі та алгоритми керування повинні обов'язково враховувати апаратне запізнювання сигналів і значну інтервальну невизначеність параметрів, насамперед динамічну зміну маси вантажу.

Для вирішення цього завдання розроблено узагальнену математичну модель системи керування поперечним і поздовжнім рухом об'єкта. Для глибокого аналізу динаміки та врахування складних нелінійних явищ, таких як сили тертя та прослизання, створено тривимірний віртуальний прототип робота в середовищі MSC ADAMS, який успішно інтегровано з алгоритмами керування в MATLAB/Simulink.

З метою практичної перевірки теоретичних результатів спроектовано та зібрано апаратний лабораторний стенд на базі промислового логічного контролера Siemens Simatic S7-200. Організовано гібридну (напівнатурну) архітектуру моделювання із застосуванням зв’язуючого програмного забезпечення, що включає OPC-сервер та SCADA-систему. Проведена верифікація за критерієм середньоквадратичного відхилення довела високу адекватність розробленої моделі: похибка в номінальному (усталеному) режимі руху звужується до надзвичайно малого діапазону і не перевищує ±3%.

Для забезпечення робастної стійкості системи керування успішно застосовано метод розширеного D-розбиття. На його основі розраховано оптимальні налаштування класичних регуляторів: ПІД-регулятора для контуру мінімізації бічного відхилення, ПІ-регулятора для стабілізації лінійної швидкості та П-регулятора для прецизійного зупинення. Оцінка модальності скоригованої

системи підтвердила, що синтезовані закони керування гарантують безумовну стійкість та високу якість перехідних процесів. Роботою досягнуто повної відсутності перерегулювання та статичної похибки при будь-яких допустимих варіаціях маси вантажу та швидкості, навіть за наявності значного транспортного запізнювання.

Крім того, у роботі розроблено комплекс технічних, ергономічних та санітарно-гігієнічних заходів для організації безпечного робочого місця інженера-програміста. Визначено необхідні вимоги до електробезпеки та сформовано чіткі алгоритми оперативних дій персоналу в разі виникнення надзвичайних і аварійних ситуацій.

Створена система повністю відповідає поставленим завданням і може бути успішно використана для подальшого проектування та впровадження високонадійних алгоритмів навігації промислових транспортних роботів на сучасних підприємствах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1) Автоматизовані транспортно-складські системи та комплекси / [Кисельов В.Б., Петренко О.І., Мельник А.О.]: Підручник. — Київ: 2021. — 312 с.
2) Системи керування автономними транспортними засобами / [Ткаченко В.М., Сидоренко О.В.]: Монографія. — Львів: 2019. — 245 с.
3) Робототехніка та мехатроніка у виробничій логістиці / [Іванов С.М., Коваленко П.П.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 288 с.
4) Autonomous Mobile Robots and Multi-Robot Systems / [Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D.]: Textbook. — Berlin: 2018. — 353 p.
5) Навігація мобільних роботів у невизначеному середовищі / [Григоренко В.М., Романенко І.О.]: Монографія. — Дніпро: 2017. — 234 с.
6) Control of Wheeled Mobile Robots / [Becker A., Khaishev M.]: Monograph. — London: 2019. — 290 p.
7) Проектування кінематичних схем транспортних роботів / [Савченко М.І., Кравчук О.М.]: Навчальний посібник. — Вінниця: 2021. — 180 с.
8) Мобільні робототехнічні системи: динаміка та керування / [Поліщук В.В., Кравченко О.П.]: Підручник. — Одеса: 2020. — 310 с.
9) Гнучкі виробничі системи та автоматизована логістика / [Тарасов В.О., Костенко І.В.]: Монографія. — Запоріжжя: 2017. — 240 с.
10) Industrial Robotics and Automation in Warehouses / [Muller P., Schmidt H.]: Monograph. — Munich: 2020. — 415 p.
11) Основи теорії автоматичного керування / [Марченко Б.Г., Лисенко О.В.]: Підручник. — Київ: 2019. — 410 с.
12) Робастне керування динамічними об'єктами з інтервальними параметрами / [Куценко О.В., Павленко В.Д.]: Навчальний посібник. — Харків: 2021. — 275 с.
13) Оптимізація законів керування в системах із транспортним запізнюванням / [Дмитренко О.В., Шевченко О.М.]: Монографія. — Львів: 2018. — 195 с.
14) Robust Control Design for Mechatronic Systems / [Gu D.W., Petkov P., Konstantinov M.]: Textbook. — London: 2017. — 450 p.

15) Сучасні підходи до параметричного синтезу систем керування / [Василенко В.І., Павленко О.В.]: Монографія. — Київ: 2019. — 215 с.

16) Синтез цифрових регуляторів для мобільних платформ / [Литвиненко В.А.]: Підручник. — Дніпро: 2020. — 380 с.

17) PID Control System Analysis and Design / [Zhuang L., Atherton D.]: Monograph. — Berlin: 2018. — 310 p.

18) Динаміка багатомасових систем у транспортній техніці / [Гусак О.М., Романюк А.В.]: Монографія. — Харків: 2021. — 205 с.

19) Fundamentals of D-partition Method in Control Theory / [Koval D., Müller S.]: Monograph. — Vienna: 2020. — 198 p.

20) Теорія електромеханічних систем автоматичного керування / [Шевченко В.В., Коваль П.С.]: Підручник. — Одеса: 2019. — 340 с.

21) Automated Guided Vehicles: Design, Navigation and Control / [Barth R., Klemmer H.]: Textbook. — Stuttgart: 2021. — 260 p.

22) Методи забезпечення робастної стійкості систем / [Руденко О.Г., Сидоренко М.В.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 240 с.

23) Advanced Control Engineering / [Smith J., Taylor P.]: Monograph. — Oxford: 2018. — 420 p.

24) Телекомунікаційні технології в системах автоматизації / [Коваль П.С., Мельнікова Л.І.]: Монографія. — Київ: 2018. — 210 с.

25) Математичне моделювання транспортних засобів / [Савенко В.І.]: Монографія. — Львів: 2017. — 280 с.

26) Робастне та адаптивне керування / [Медведєв В.М., Бойчук О.В.]: Підручник. — Харків: 2021. — 310 с.

27) Конструювання та моделювання мехатронних модулів / [Павлюк В.І.]: Навчальний посібник. — Тернопіль: 2017. — 225 с.

28) Modeling and Simulation with MATLAB and Simulink / [Fischer K., Weber M.]: Textbook. — Frankfurt: 2019. — 350 p.

29) Моделювання електромеханічних систем у MATLAB / [Бойко В.І., Шевченко О.М.]: Практикум. — Київ: 2022. — 198 с.

30) Програмне забезпечення для імітаційного моделювання / [Григоренко О.В.,

Макаров В.М.]: Практикум. — Львів: 2020. — 175 с.

31) Virtual Prototyping with MSC ADAMS / [Hoffmann T., Schmidt A.]: Monograph. — Munich: 2018. — 280 p.

32) Імітаційне моделювання динаміки в середовищі MSC ADAMS / [Карпенко В.М., Соколов О.І.]: Практикум. — Київ: 2019. — 210 с.

33) Напівнатурне моделювання мехатронних та робототехнічних систем / [Сидоренко М.В., Пономаренко В.С.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 230 с.

34) Промислові контролери Siemens Simatic у системах керування / [Петренко І.В.]: Практикум. — Київ: 2022. — 185 с.

35) Інтеграція SCADA-систем у виробничі процеси логістики / [Лисенко В.О.]: Навчальний посібник. — Львів: 2018. — 215 с.

36) Електропривод та автоматизація промислових установок / [Олешко В.П., Кравчук О.М.]: Підручник. — Вінниця: 2021. — 420 с.

37) Застосування ШІМ у керуванні двигунами постійного струму / [Марченко О.І.]: Монографія. — Харків: 2017. — 165 с.

38) Sensor Networks and Autonomous Vehicles / [Schmidt A., Becker O.]: Textbook. — Berlin: 2020. — 320 p.

39) Кінематика та динаміка колісних роботів / [Марченко О.І., Ткаченко В.М.]: Навчальний посібник. — Київ: 2019. — 210 с.

40) Інформаційно-вимірювальні системи мобільних роботів / [Василенко В.І.]: Підручник. — Київ: 2019. — 290 с.

41) Сучасні методи синтезу лінійних систем керування / [Пономаренко В.С.]: Підручник. — Харків: 2021. — 290 с.

42) Охорона праці в галузі ІТ та робототехніки / [Гавриш С.А., Гавриш А.С.]: Підручник. — Київ: 2021. — 440 с.

43) Ергономіка та безпека життєдіяльності на виробництві / [Навакатікян А.О., Кальніш В.В.]: Навчальний посібник. — Київ: 2018. — 298 с.

44) Occupational Health and Safety in Engineering / [Weber M., Hoffmann T.]: Monograph. — Geneva: 2018. — 180 p.

45) Ергономіка робочих місць операторів ЕОМ та інженерів / [Кравченко О.С.]:

Монографія. — Одеса: 2019. — 160 с.

46) Основи охорони праці на підприємствах ІТ-сфери / [Ткаченко А.В.]: Підручник. — Львів: 2020. — 245 с.

47) Електробезпека та пожежна безпека на виробництві / [Сидоренко М.М., Ковальчук І.В.]: Навчальний посібник. — Харків: 2021. — 195 с.

48) Санітарно-гігієнічні вимоги до організації робочих приміщень / [Ковальчук І.В.]: Довідник. — Київ: 2018. — 140 с.

49) Захист від електромагнітного випромінювання на робочому місці / [Демченко О.П.]: Монографія. — Львів: 2019. — 155 с.

50) Алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях на виробництві / [Савенко І.М.]: Практичний посібник. — Дніпро: 2022. — 130 с.

51) Workplace Ergonomics and Safety Guidelines / [Wagner L., Braun J.]: Monograph. — London: 2020. — 150 p.

52) Системи технічного зору та оптична навігація в логістиці / [Романюк А.В., Макаров В.М.]: Підручник. — Харків: 2022. — 335 с.

53) Логістика складських процесів: сучасні рішення / [Бойчук О.В.]: Підручник. — Київ: 2019. — 315 с.

54) Теорія випадкових процесів у задачах навігації / [Левченко В.І., Бондаренко О.О.]: Монографія. — Одеса: 2016. — 260 с.

55) Динаміка і керування електромеханічними об'єктами з параметричною невизначеністю / [Кисельов В.Б.]: Монографія. — Київ: 2023. — 305 с.