

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій

Дипломна магістерська робота

На тему «Автоматизована система переміщення виробів мобільними
транспортними засобами»

Виконала: студентка 2 курсу, групи МгАк-20
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

Коптєва Наталія Юріївна

Науковий керівник к.е.н, доц. Ігор ПОНОМАРЕНКО

Рецензент д.т.н., проф. Ігор ПАНАСЮК

Київ - 2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій
Спеціальність 151 - автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології
Освітня програма – комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та
виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІТВТ

_____ Шибицька Н.М.

“ ___ ” _____ 2021 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коптєвій Наталії Юріївні

1. Тема роботи «Автоматизована система переміщення виробів мобільними транспортними засобами», науковий керівник роботи Пономаренко Ігор Віталійович, к.е.н., доц, затверджені наказом вищого навчального закладу від 8 жовтня 2021 року, №286-уч.
2. Строк подання студентом роботи - 9 грудня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: нульова початкова швидкість, початкове бічне відхилення від заданої траси 0,2 м, задана поздовжна швидкість 0,5 м/с, відносне середньоквадратичне відхилення результатів, отриманих за допомогою математичної моделі від експериментальних не більше $\pm 10\%$.
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Аналіз стану автоматизації транспортно-складських операцій. Розробка узагальненої моделі системи управління боковим і повздовжнім рухом мобільного транспортного засобу. Розробка системи управління і синтезу закону управління рухом транспортного засобу з інтервальними параметрами

і запізненням в каналі управління. Експериментальне дослідження переміщення виробів мобільними транспортними засобами. Загальні висновки.

5. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Пономаренко І.В., доцент		
Розділ 1	Пономаренко І.В., доцент		
Розділ 2	Пономаренко І.В., доцент		
Розділ 3	Пономаренко І.В., доцент		
Висновки	Пономаренко І.В., доцент		

6. Дата видачі завдання 5 жовтня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи (проекту)	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	21.10.2021	
2	Розділ 1	28.10.2021	
3	Розділ 2	10.11.2021	
4	Розділ 3	19.11.2021	
5	Розділ 4	23.11.2021	
6	Висновки	29.11.2021	
7	Оформлення магістерської роботи (чистовий варіант)	03.12.2021	
8	Підготовка анотації іноземною мовою	03.12.2021	
9	Здача магістерської роботи на кафедру для рецензування	06.12.2021	
10	Перевірка магістерської роботи на наявність ознак плагіату	06.12.2021	
11	Подання роботи у відділ магістратури для перевірки виконання додатку до індивідуального навчального плану	10.12.2021	
12	Подання роботи на затвердження завідувачу кафедри	09.12.2021	

Студентка

_____ (підпис)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

Директор НМЦПФ

_____ (підпис)

Коптєва Н.Ю.

(прізвище та ініціали)

к.е.н. Пономаренко І.В.

(прізвище та ініціали)

Григорєвська О.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Коптєва Н. Ю. Автоматизована система переміщення виробів мобільними транспортними засобами

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021 рік.

Дипломна магістерська робота присвячена підвищенню ефективності роботи транспортно-складської системи шляхом автоматизації виконання операцій прийому виробів на склад і відвантаження їх зі складу за допомогою мобільних транспортних засобів.

Запропоновано використання робастної системи управління рухом мобільних транспортних засобів при автоматизації переміщення вантажів у транспортно-складській системі, яка дозволяє усунути недоліки існуючих автоматизованих систем переміщення виробів. Запропоновано і досліджено імітаційну модель автоматизованого складу, алгоритм його функціонування та автоматизовану систему управління рухом мобільного транспортного засобу по заданій трасі.

Показано підвищення ефективності функціонування транспортно-складських систем шляхом використання мобільних керованих транспортних засобів і автоматизації операцій переміщення виробів при використанні методу синтезу лінійних регуляторів з інтервальними параметрами, що заснований на побудові областей розширеного D-розбиття у діапазоні вибору коефіцієнтів регулятора.

Ключові слова: транспортно-складська система, мобільний транспортний засіб, робастна система керування, початкове бічне відхилення, лінійна система керування з інтервальними параметрами.

АННОТАЦИЯ

Коптева Н. Ю. Автоматизированная система перемещения изделий мобильными транспортными средствами

Дипломная магистерская работа по специальности 151 – Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии, Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев, 2021 год.

Дипломная магистерская работа посвящена повышению эффективности работы транспортно-складской системы путем автоматизации выполнения операций приёма изделий на склад и отгрузки их со склада с помощью мобильных транспортных средств.

Предложено использование робастной системы управления движением мобильных транспортных средств при автоматизации перемещения грузов в транспортно-складской системе, позволяющей устранить недостатки существующих автоматизированных систем перемещения изделий. Предложены и исследованы имитационная модель автоматизированного склада, алгоритм его функционирования и автоматизированная система управления движением мобильного транспортного средства по заданной трассе.

Показано повышение эффективности функционирования транспортно-складских систем путем использования мобильных управляемых транспортных средств и автоматизации операций перемещения изделий при использовании метода синтеза линейных регуляторов с интервальными параметрами, основанного на построении областей расширенного D-разбиения в диапазоне выбора коэффициентов регулятора.

Ключевые слова: транспортно-складская система, мобильное транспортное средство, робастная система управления, начальное боковое отклонение, линейная система управления с интервальными параметрами.

ANNOTATION

Kopteva N. Yu. Automated system for moving products by mobile vehicles

Master's degree work in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies, Kiev National University of Technology and Design, Kiev, 2021.

The master's thesis is devoted to improving the efficiency of the transport and warehouse system by automating the operations of receiving products at the warehouse and shipping them from the warehouse using mobile vehicles.

The use of a robust control system for the movement of mobile vehicles is proposed for automating the movement of goods in a transport and warehouse system, which makes it possible to eliminate the disadvantages of existing automated systems for moving products. A simulation model of an automated warehouse, an algorithm for its functioning and an automated control system for the movement of a mobile vehicle along a given route are proposed and investigated.

An increase in the efficiency of the functioning of transport and warehouse systems is shown by using mobile controlled vehicles and automating the operations of moving products when using the method of synthesis of linear controllers with interval parameters, based on the construction of regions of extended D-partitioning in the range of choice of controller coefficients.

Key words: transport and storage system, mobile vehicle, robust control system, initial lateral deviation, linear control system with interval parameters.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ	12
1. .Аналіз підходів до автоматизації транспортно- складських операцій на базі мобільних керованих транспортних засобів	12
1.2. Аналіз існуючих моделей транспортних засобів, методів аналізу і синтезу систем управління	20
1.3.Методи синтезу пристроїв управління рухом мобільних транспортних засобів	23
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БОКОВИМ І ПОЗДОВЖНІМ РУХОМ МОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	27
2.1.Аналіз передумов при побудові математичної моделі системи управління рухом мобільного транспортного засобу	27
2.2.Модифікація математичної моделі системи управління боковим рухом, що враховує інтервальність параметрів об'єкта і запізнювання в каналі управління	29
2.3.Урахування інтервальності параметрів об'єкта в математичній моделі системи управління поздовжнім рухом мобільного транспортного засобу	37
2.4.Розробка узагальненої моделі системи управління рухом транспортного засобу по заданій трасі, що враховує інтервальність об'єкта і запізнювання в каналі управління	40
Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І СИНТЕЗУ	

ЗАКОНУ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ІНТЕРВАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ І ЗАПІЗНЕННЯМ В КАНАЛІ УПРАВЛІННЯ	44
3.1. Розробка методу синтезу регулятора, що забезпечує робастну модальність системи з інтервальними параметрами і запізненням на основі розширеного d-розбиття	44
3.2 Синтез регулятора робастної системи управління боковим відхиленням методом розширеного D-розбиття	51
3.3.Синтез регулятора робастної системи управління поздовжнім рухом методом розширеного D-розбиття	56
3.4. Дослідження динаміки робастної системи управління боковим відхиленням з синтезованим регулятором	61
Висновки до розділу 3	63
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИРОБІВ МОБІЛЬНИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ	65
4.1.Побудова комп'ютерної моделі системи управління рухом транспортного засобу з використанням MATLAB	65
4.2.Розробка експериментального макета і способу дослідження руху транспортного засобу	70
4.3.Організація напівнатурного моделювання динаміки системи управління мобільним транспортним засобом	78
4.4.Комп'ютерне проектування системи управління рухом транспортного засобу з використанням ADAMS і MATLAB	82
4.5.Оцінка адекватності математичної моделі транспортного засобу за методом середньоквадратичного відхилення	86
Висновки до розділу 4	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

ВСТУП

Актуальність теми магістерської дипломної роботи. Для ефективної роботи транспортно-складської системи потрібна своєчасна доставка необхідних виробів для їх відвантаження. Робота складу, потребує вирішення питань раціонального складування, контролю надходження, наявності та відпуску виробів.

Великою потенційною можливістю в підвищенні ефективності транспортно-складської системи є автоматизація виконання операцій прийому виробів на склад і відвантаження їх зі складу за допомогою мобільних транспортних засобів, при цьому необхідно забезпечити безаварійне переміщення виробів у відповідності з обраним швидкісним режимом із зони прийому в зону складування і із зони складування в зону відвантаження, позиціонуванням мобільних транспортних роботів [1-4] в місці розташування необхідної стелажної комірки. Усунення ручної праці при проведенні переміщення готової продукції веде до зниження фінансових та трудових витрат, зниження собівартості продукції, прискорення процесів транспортування виробів, виключення людського фактору і вирішення соціальних завдань.

Таким чином, актуальним є завдання автоматизації переміщення виробів в транспортно-складській системі за допомогою мобільних транспортних засобів [5-8]. При автоматизації переміщення вантажів у транспортно-складській системі важливим завданням є розробка робастної системи управління рухом мобільних транспортних засобів, при якій необхідно мати зручну та адекватну математичну модель мобільного транспортного засобу, методами аналізу і синтезу робастного керування з урахуванням особливостей моделі, проаналізувати сучасний стан питань автоматизації складів, , аналізу і синтезу робастних систем із запізненням, що дозволить визначити недоліки існуючих автоматизованих систем переміщення виробів мобільними транспортними засобами і намітити шляхи

їх удосконалення.

Мета магістерської дипломної роботи - підвищення ефективності виробництва шляхом використання мобільних транспортних засобів при переміщенні виробів і сировинних продуктів на складі.

Завдання магістерської дипломної роботи - розробка імітаційної моделі автоматизованого складу, алгоритму його функціонування та удосконалення комп'ютерної моделі автоматизованої системи управління рухом мобільного транспортного засобу по заданій трасі; розробка методу аналізу руху мобільного транспортного засобу з урахуванням інтервальності його параметрів і запізнювання в каналі управління.

Об'єктом дослідження є процес переміщення виробів у транспортно-складській системі за допомогою мобільних транспортних засобів.

Предметом дослідження є автоматизована система переміщення виробів мобільними транспортними засобами,

Наукова новизна магістерської дипломної роботи:

- узагальнена математична модель системи управління рухом складського транспортного засобу з інтервальними параметрами, що відрізняється наявністю взаємозв'язку систем управління бічним відхиленням від траси, поздовжньою швидкістю і поздовжнім положенням з урахуванням запізнювання в каналі управління;

- удосконалений метод синтезу лінійних регуляторів для лінійних систем з інтервальними параметрами, заснований на побудові областей розширеного D-розбиття в просторі коефіцієнтів регулятора, що відрізняється можливістю застосування до синтезу систем із запізненням.

Практична цінність магістерської дипломної роботи полягає в:

- підвищенні ефективності транспортно-складських систем шляхом використання мобільних керованих транспортних засобів і автоматизації операцій переміщення виробів;

- запропонованій удосконалений інженерній методиці аналізу та синтезу систем управління рухом мобільних транспортних засобів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань в

магістерській дипломній роботі застосовані методи теорії автоматичного керування, у тому числі робастного керування, математичного та комп'ютерного керування, а також автоматизованого проектування. Для обробки результатів експериментальних досліджень застосовані методи обробки результатів експериментів та математичної статистики.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

1. Аналіз підходів до автоматизації транспортно-складських операцій на базі мобільних керованих транспортних засобів

Існує широкий спектр транспортно-складських систем, що застосовуються в різних виробництвах, організація роботи яких залежить від розмірів складів, виду і кількості перевезеного вантажу, транспортної тари, типу піддонів і можливості використання спеціалізованих контейнерів. Проектування нових складів, як правило, проводиться за принципом «зсередини - зовні», при якому спочатку вибирається вид тари, застосовуваної для складування вантажів, потім вибирається стелажне і підйомно - транспортне обладнання, а в останню чергу визначаються розміри будівлі складу.

Автоматизовані транспортно-складські системи (АТСС) дозволяють повністю або частково виключити ручну працю за рахунок використання обчислювальної техніки, за допомогою якої здійснюється автоматизоване управління і контроль транспортно - складського обладнання і контроль за розміщенням вантажів на складі.

При використанні АТСС досягається ефективне використання складських площ і прискорення транспортних і складських операцій, що визначає актуальність дослідження таких систем. АТСС класифікуються в залежності від типу і маси транспортованих вантажних одиниць, типу компоновочної схеми, типу основного обладнання та рівня автоматизації [9].

Гнучка автоматизація транспортно-складських систем досягається при використанні модульного принципу побудови. В залежності від потреб виробництва модулі можуть змінюватися, нарощуватися, розширюючи функціонал системи при додаванні нових керуючих блоків. Функціонально модулі та їх компоненти забезпечують синхронізацію виробничих процесів, що призводить до згладжування дискретності і підвищення рівномірності

ритму роботи виробництва. Структура і компонування модулів АТСС значно впливає на компоновку всієї обслуговуваної гнучкої виробничої системи.

Основною складською тарою є палета. Часто застосовуються палети євростандарту розміру $800 \times 1200 \times 144$ мм вантажопідйомністю 1500 кг, і палети стандарту ISO 6780 розміру $1000 \times 1200 \times 144$ мм з такою ж вантажопідйомністю.

Для зберігання палет використовуються багатоярусні стелажі, розташування яких всередині складського приміщення може бути різне.

Розміщення складської тари в середині стелажів може здійснювати стелажний кран-штабелер, однак при великій кількості стелажів, розташованих в кілька рядів, такий підхід стає економічно не вигідним, оскільки передбачається наявність відповідної кількості стелажних кранів-штабелерів. Інший підхід полягає в наявності маніпулятора на мобільному транспортному роботі.

Доставка палет від зони прийому до зони зберігання і від зони зберігання до зони відвантаження проводиться або конвеєром, або транспортним роботом або електронавантажувачем, причому вибір того чи іншого способу доставки визначається його економічною ефективністю. На рис. 1.1 наведені області економічно доцільного застосування електронавантажувачів і приводних роликів конвеєрів в залежності від інтенсивності вантажопотоку λ , піддонів/годину, і відстані переміщення вантажів l , м.

Як видно з рис. 1.1, при низькій інтенсивності транспортування і великих відстанях переміщення, що часто має місце при складуванні готової продукції вигідніше використовувати електронавантажувачі.

Правильний вибір мобільного транспортного робота дозволяє забезпечити більш повну інтеграцію його в АТСС, оперативне реагування на необхідність виконання транспортно - складських операцій, безаварійний рух всередині складу, точність позиціонування вантажів і т. п.

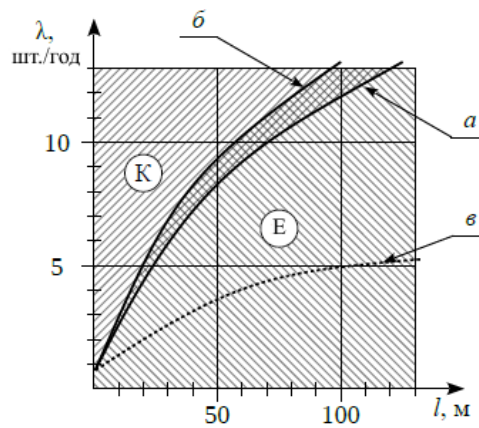


Рис. 1.1. Области застосування одного з видів транспортних модулів: зони Е і К — області економічно доцільного застосування електронавантажувачів і приводних роликів конвеєрів відповідно; а, б і в - розділові лінії для конвеєрів з роликами діаметром 100 мм, з роликами діаметром 70 мм і для випадку обліку вартості проїздів відповідно

Як правило, промислові мобільні транспортні роботи використовують колісний тип пересування по підлозі складу. При цьому змінити напрямок руху транспортного робота можна як за рахунок повороту рульових коліс навколо вертикальної осі, так і за рахунок різниці в кутах поворотів ведучих коліс відносно горизонтальної осі (рис. 1.2) [9-13].

Управління кожним колесом транспортного робота, здатним повертатися в зазначеному напрямку і обертатися з незалежною від інших коліс швидкістю, не має широкого розповсюдження.

Диференціальне управління швидкостями обертання ведучих коліс надає велику маневреність і забезпечує можливість розвороту на місці. Ведучі колеса при цьому, як правило, розташовуються на одній осі, а стійкість конструкції надають одне, два або більше вільно обертових опорних колеса (рис. 1.2) [14-16].

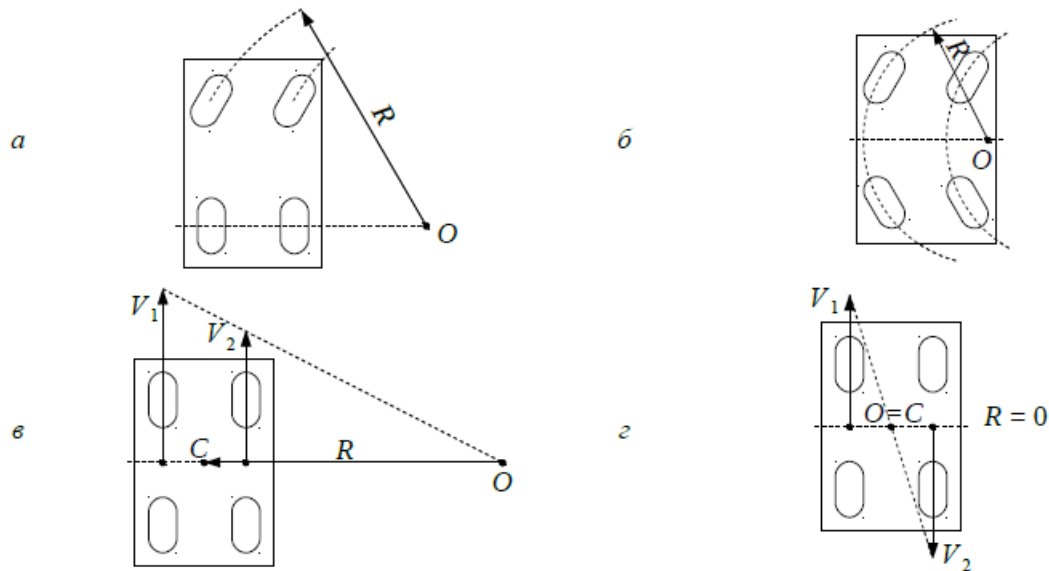


Рис. 1.2. Приклади принципів повороту двовісних колісних транспортних роботів: а - з керованими передніми колесами; б - з керованими передніми і задніми колесами; в - з некерованими колесами при великому радіусі повороту; г - з некерованими колесами при нульовому радіусі повороту; O , R - центр і радіус повороту; V_1 , V_2 - лінійні швидкості забігаючого і відстаючого бортів транспортного робота

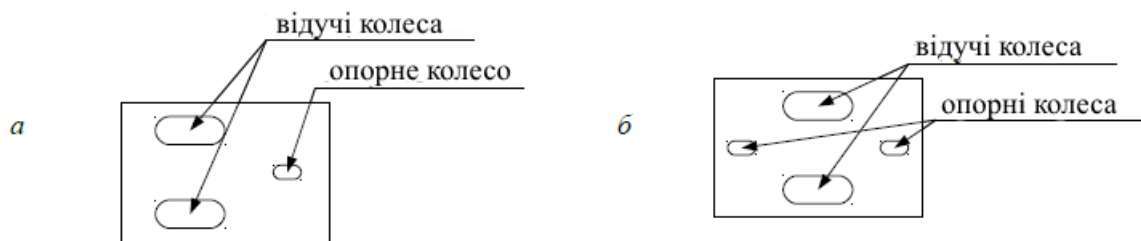


Рис. 1.3. Приклади розташування провідних і опорних коліс транспортних роботів: а - триколісна схема з одним вільним (опорним) колесом; б - чотириколісна схема з двома вільними (опорними) колесами

Переваги триколісної платформи полягають в кращій пристосованості до руху по нерівній поверхні (рис. 1.4). Для чотириколісної платформи транспортного робота недолік, пов'язаний з можливою відсутністю контакту коліс з поверхнею, в деякій мірі, вирішується встановленням амортизаторів на

вільні колеса. Однак, при транспортуванні по пласкій поверхні цей недолік проявляється в меншій мірі.



Рис. 1.4. Рух по нерівній поверхні:

а-триколісного робота; б-чотириколісного робота

З іншого боку, ходові характеристики мобільного транспортного робота визначаються розташуванням центру мас щодо коліс. Для транспортного робота з одним вільним колесом потрібно шукати компроміс між концентрацією ваги на вільному колесі і розташуванням центру мас у вертикальній площині, що проходить через вісь обертання ведучих коліс. Для найкращого зчеплення коліс з поверхнею вага робота повинна припадати на привідні колеса, що забезпечується чотириколісною схемою при знаходженні центру ваги у вертикальній площині, що проходить через вісь обертання провідних коліс. Виходячи із зазначених переваг і недоліків при переміщенні виробів всередині виробничого складу, якій має гладке підлогове покриття, найбільш краща схема конструкції ходової частини транспортного мобільного робота з ромбовидним розташуванням двох провідних і двох опорних коліс (рис. 1.3, б).

Іншим важливим моментом в організації функціонування автоматизованого складу є вибір способу навігації, що передбачає проведення аналізу існуючих систем навігації [16-18].

При навігації мобільного робота необхідно, в першу чергу, на основі маршруту руху, поточного положення транспортного мобільного робота і пункту призначення визначити траєкторію або можливі траєкторії переміщення. Вибір траєкторії може здійснюватися роботом на підставі аналізу місцевості, наявності перешкод, орієнтирів для руху, розташування і швидкості переміщення інших об'єктів у просторі і т. д. Однак, більш простим

і часто використовуваних на практиці є попереднє завдання траси, по якій може рухатися робот.

За типом траси можна виділити механічні та інформаційні траси [15]. Механічний спосіб завдання траси має надійність та простоту елементів, що формують маршрут руху (рейки, стрілки, поворотні столи та ін.). Основним недоліком при цьому способі завдання траси є складнощі зміни конфігурації траси, а перевага полягає в меншій необхідності стеження транспортного робота за трасою.

Рух по інформаційній трасі відстежується системою управління мобільного робота і ґрунтується на застосуванні кондукторного або програмного принципу стеження. Використовуваний кондукторний принцип полягає в застосуванні датчика ознаки траси, що визначає наявність відхилення робота від траси, напрямок і величину цього відхилення, місця початку відгалуження і зупинки. Стеження за ознакою траси може мати різну фізичну природу: оптичну, магнітну, електромагнітну (рис. 1.5). У першому випадку на борту транспортного мобільного робота встановлюється оптичний датчик і, можливо, джерело світла, а траса задається нанесеною на поверхню руху світловідбиваючою смугою, відмінною за кольором від фону поверхні [15]. Аналогічно в другому випадку траса може бути задана прокладкою намагніченої смуги. При електромагнітному завданні траси під поверхнею руху прокладається провід, в якому протікає змінний струм 1.

Оптичне завдання траси має складності при наявності високої запиленості, нерівномірної освітленості поверхні руху, можливості попадання на трасу сторонніх об'єктів, що перекривають світловідбиваючу лінію і т.п. з іншого боку, магнітне і електромагнітне завдання не застосовується в умовах наявності електромагнітних завад, наприклад, що створюються від технологічного обладнання в цеху, де переміщається робот.

При програмному принципі стеження задана траєкторія зберігається в пам'яті системи керування мобільним роботом у вигляді параметрів ділянок прямолінійного руху і повороту, параметрів кривих Безьє, що описують траєкторію [19-21]. На підставі наявних даних система управління формує в

кожен момент часу керуючий вплив для виконавчих механізмів, що відповідають за зміну положення робота в просторі, відповідне необхідним миттєвим характеристиками руху. Програмна траєкторія руху може бути задана навчанням мобільного робота, коли оператор в ручному режимі управління один або кілька разів переміщує робота по трасі.

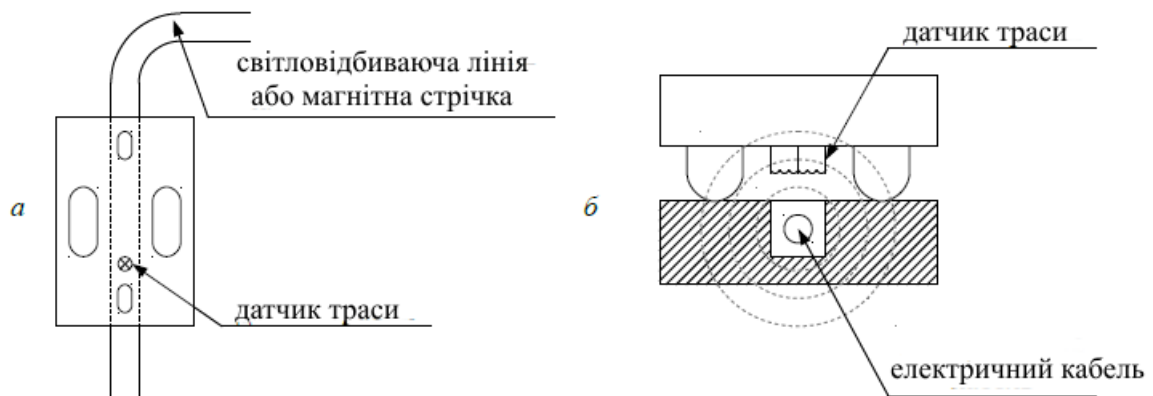


Рис. 1.5 Кондукторний принцип стеження при завданні траси за допомогою: а - світловідбиваючої лінії або магнітної стрічки, нанесеної на поверхню руху; б - електричного кабелю, прокладеного під поверхнею руху

При цьому система управління робота запам'ятовує маршрут для подальшого автоматичного проходження по ньому. Інший спосіб полягає в визначенні мобільним роботом власного положення в просторі і розрахунку подальшого маршруту руху. Навігація робота в просторі може здійснюватися з використанням триангуляційних систем на підставі вимірювання за допомогою лазерних, ультразвукових, оптичних та інших методів відстані орієнтирів, що мають заздалегідь відоме положення (рис. 1.6).

Також можна виділити змішаний принцип стеження, коли траєкторія задається у вигляді окремо розташованих на поверхні орієнтирів для руху (постійних магнітів, оптичних міток), а пересування між точками здійснюється по траєкторії, яка програмно розраховується і контролюється з застосуванням гіроскопів, акселерометрів, датчиків швидкостей обертання коліс і т.і. (рис. 1.7).

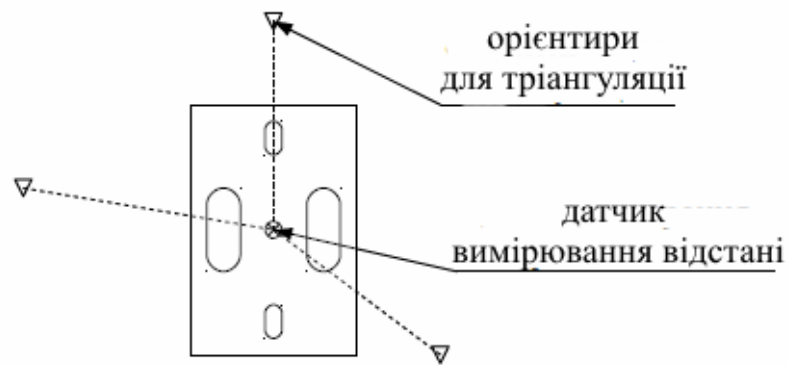


Рис. 1.6. Триангуляційна система навігації транспортного мобільного робота

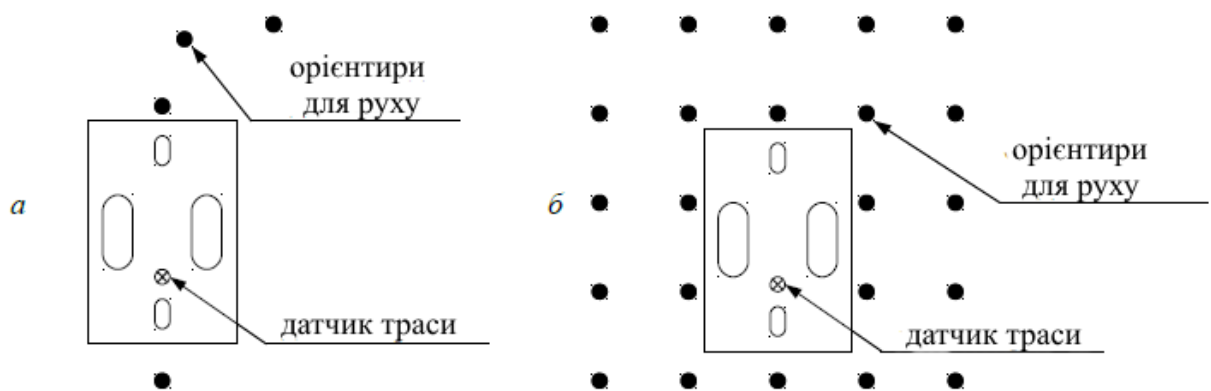


Рис. 1.7. Завдання траси орієнтирами для руху: а-розташуванням орієнтирів в точках траси; б-сітковим розташуванням орієнтирів

Характер динаміки транспортного засобу на трасі при вирішенні навігаційних задач багато в чому визначається механічними параметрами самого об'єкта управління (мобільної платформи), в зв'язку з цим при синтезі системи автоматичного управління необхідно мати математичну модель цієї платформи. Це дозволить синтезувати закон управління, що забезпечує структуру бортової системи, яка відповідає заданим динамічним властивостям і точності.

1.2. Аналіз існуючих моделей транспортних засобів, методів аналізу і синтезу систем управління

При розробці і впровадженні ефективних законів управління мобільними транспортними засобами і програмного забезпечення, що реалізує їх, зручно використовувати математичну модель транспортного засобу, що дозволяє знизити витрати і скоротити час розробки. Математичне моделювання вигідно з точки зору матеріальних витрат, так як не передбачає наявності фізичної моделі транспортного засобу, а також площі і трас для випробування характеристик його руху.

Детально підхід до побудови математичних моделей транспортних мобільних роботів, що мають триколісну схему шасі з двома окремо керованими ведучими колесами, викладено в роботах [21-23], в яких рух описується в матричному вигляді з використанням рівнянь Лагранжа-Максвелла для електромеханічної системи. Для аналогічної триколісної схеми шасі досліджена модель пускових режимів транспортного робота, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь руху платформи і диференціальних рівнянь, що описують процеси, які відбуваються в двигунах постійного струму з редукторами, що приводять у рух провідні колеса. Також модель триколісного мобільного робота представлена в роботах [23-24]. Зазначені моделі не підходять для опису обраного транспортного засобу з чотириколісною схемою шасі, а також не дозволяють представити динаміку системи управління рухом у вигляді структурної схеми для опису динамічних властивостей на рівні складових елементів і підсистем, тому застосування методів класичної теорії управління для їх аналізу, наприклад, в частотній області, є достатньо складним.

Наочною і простою для аналізу є модель системи управління рухом чотириколісного транспортного засобу з двома привідними колесами, представлена в роботі [25]. Тут транспортний засіб розглядається як об'єкт, що здійснює в кожен момент часу одночасно два рухи: перпендикулярне і паралельне його поздовжньої осі. Результатом першого руху є зміна бічного

відхилення, а другого - зміна поздовжнього положення щодо заданої траси. Процес управління кожним з рухів описується структурною схемою, яка визначає зв'язки між окремими елементами системи управління відповідним рухом, причому математична модель кожного елемента має вигляд передавальної функції. Використовуючи запропоновані моделі бічного і поздовжнього руху можна в кожен момент часу визначити положення транспортного засобу щодо заданої траси, однак для визначення його положення в просторі модель руху необхідно доповнити моделлю траси. Крім того, оскільки зазначені системи управління є взаємопов'язаними, слід розглядати узагальнену модель системи управління рухом транспортного засобу.

До недоліків всіх перерахованих моделей також необхідно віднести відсутність врахування часового запізнювання, що виникає через часові затримки при зчитуванні показань датчиків, розрахунку, формуванні та подачі керуючих впливів на виконавчі пристрої мобільного транспортного засобу, що особливо важливо при віддаленому управлінні транспортним засобом, а також відсутність врахування інтервальності параметрів об'єкта управління, особливо при оцінці стійкості систем управління.

Вибір методу аналізу стійкості та якості процесу керування рухом мобільного транспортного засобу залежить від виду математичної моделі, застосовуваної для його опису. При використанні апарату передавальних функцій модель системи управління може бути досліджена за допомогою класичних критеріїв стійкості Ляпунова, Гурвіца, Михайлова, Найквіста, логарифмічного критерію стійкості та ін. Однак при побудові моделі мобільного засобу, що здійснює транспортно-складські операції, необхідно брати до уваги той факт, що деякі параметри моделі в процесі виконання чергової логістичної операції можуть відрізнятися від попередніх. Наприклад, повна маса буде різною при русі від одного до іншого місця завантаження/вивантаження в залежності від маси перевезеної готової продукції; заряд акумуляторів буде різним до початку та після виконання чергової транспортно-складської операції. Деякі інші параметри моделі також

зручно вважати змінними для вибору їх найкращого значення на етапі проектування транспортного засобу, наприклад, відстань від місця розташування датчика бічного відхилення до центру мас транспортного засобу. Таким чином, виникає завдання аналізу робастної стійкості системи керування транспортним мобільним роботом з параметрами, значення яких знаходяться в межах деякого інтервалу і заздалегідь невідомі, тобто об'єкт управління має властивість інтервальності.

Огляд існуючих підходів до дослідження робастної стійкості динамічних систем наведено в роботах [20,25]. Для систем, модель яких представляється у вигляді дробово-раціональної передавальної функції з інтервальними параметрами, стійкість визначається по положенню коренів полінома знаменника для всіх можливих значень параметрів: при робастній стійкості система не повинна мати коренів, що знаходяться в правій півплощині комплексної площині коренів або розташованих на уявній осі для будь-якого параметра, що знаходиться всередині заданого інтервалу [26,27].

Для визначення стійкості інтервальної системи, необхідно і достатньо визначити розташування коренів всього лише чотирьох поліномів [27-30]. Спростити дослідження робастної стійкості дозволяє критерій, згідно з яким необхідна побудова лише одного частотного модифікованого годографа Михайлова [31].

Перераховані методи дозволяють досліджувати системи, характеристичне рівняння яких не містить запізнювання. Однак ігнорування наявності запізнювання може бути причиною погіршення динамічних характеристик або навіть нестійкості системи [32].

В даний час велика кількість досліджень присвячено розробці критеріїв стійкості, що враховують зміну часу запізнювання в деяких межах [33-35]. У розроблених критеріях використовуються підходи до аналізу стійкості, що базуються на методі Ляпунова, складність якого полягає у виборі функціоналу Ляпунова. При цьому інші параметри системи, крім часу запізнювання, вважаються відомими і жорстко заданими.

Для систем з запізненням, характеристичне рівняння яких містить

квазіполіном, у разі застосування частотного підходу пропонується використання тестуючої функції [36] або модифікованого годографа Михайлова [40] за умови стійкості номінального квазіполінома системи без зміни параметрів, яке можна визначити по методиках, зазначеним у роботі [37-38], тобто потрібен додатковий аналіз системи.

У розглянутих роботах досліджується тільки стійкість інтервальних систем, для яких необхідно, щоб всі корені сімейства характеристичних поліномів знаходилися в лівій напівплощині площині коренів. У більш загальному випадку аналізується належність коренів сімейства характеристичних рівнянь області, заданої на підставі необхідних показників якості функціонування системи, тобто досліджується робастна модальність системи. Наприклад, область площини коренів, що знаходиться лівіше вертикальної лінії $u = -\eta$, при $\eta > 0$ визначає ступінь стійкості системи [39].

У роботі [40] сформульовано узагальнений частотний критерій для дослідження робастної модальності лінійних безперервних і дискретних систем, коефіцієнти яких лінійно залежать від параметрів, що мають еліптичні обмеження. Однак запропонований критерій призначений для дослідження систем, які не мають запізнювання в каналі управління.

Таким чином, виникає необхідність у розробці простого критерія, що дозволяє оцінювати робастну модальність систем, представлених у вигляді передавальної функції, що містить ланку із запізненням.

1.3. Методи синтезу пристроїв управління рухом мобільних транспортних засобів

У випадках, коли модель об'єкта управління представлена у вигляді передавальної функції, можливе використання методів класичної теорії управління. Для параметричного синтезу робастних регуляторів невеликого порядку запропоновано [41] кореневий метод, заснований на локалізації коренів інтервального характеристичного полінома в заданій області. У роботі [21] для гарантованої робастної стійкості використовується метод D-розбиття

в площині одного або двох варійованих параметрів регулятора. У перерахованих роботах розглядаються системи без запізнювання.

Спосіб синтезу класичного ПД-регулятора, що забезпечує задане розташування коренів, яке відповідає критеріям якості управління, для системи із запізненням запропонований у роботі [26] та заснований на побудові кривих D-розбиття. Однак зазначений спосіб синтезу не враховує можливої інтервальності параметрів об'єкта управління.

У [23] на основі методу функцій Ляпунова отримано безперервний закон управління для триколісного мобільного транспортного засобу з трьома колесами і неповністю визначеними параметрами системи. Недоліком використовуваного підходу є складність вибору виду закону управління для об'єкта, представленого у вигляді диференціальних рівнянь руху, тобто той закон управління в загальному вигляді, який був обраний для триколісної схеми шасі, може не дати прийнятної якості управління для схеми шасі іншого типу.

У роботі [24] використаний безітераційний алгоритм знаходження налаштувань ПД-регулятора для системи з інтервальними параметрами і запізненням. Застосування отриманих у статті формул обмежене конкретним видом передавальної функції об'єкта управління другого порядку і видом застосованого ПД-регулятора. Крім того, розглядається тільки максимальна ступінь стійкості замкнутої системи без урахування інших показників якості управління.

При дослідженні методів синтезу законів управління для інтервальних систем із запізненням, є й інші роботи, що використовують апарат сучасної теорії автоматичного управління. У статті [10] корекція запізнення в каналі управління досягається за рахунок застосування аналітичного екстраполятора і розширеного фільтра Калмана, причому параметри системи вважаються не інтервальними, а конкретно заданими.

Деякий аналіз існуючих сучасних методів синтезу керуючих пристроїв для систем без запізнювання наведено в роботі [12]. На підставі проведеного аналізу авторами обрано метод аналітичного синтезу закону управління «по

виходу та впливам». Серед переваг розглянутого методу є і основний недолік, пов'язаний з більш складною реалізацією пристроїв управління.

Параметрична оптимізація в просторі станів розглядається в роботі [22], де для забезпечення робастної модальності системи використовуються чисельні методи оптимізації, однак досліджується система без запізнювання.

Використання інтелектуальних методів для забезпечення робастного управління призводить до необхідності проектування закону управління, що має більш складну реалізацію в порівнянні, наприклад, з ПД-законом управління. Таким чином, підвищуються вимоги до продуктивності керуючого обчислювального пристрою, потрібні спеціалізовані системи програмування контролерів або мікроконтролерів, що мають вбудовану підтримку розробки інтелектуального управління, а при їх відсутності завдання програмування повинно виконуватись розробниками системи управління.

Таким чином, на етапі синтезу пристрою управління рухом транспортного мобільного робота, необхідно розробити аналітичний метод синтезу, що поєднує переваги розглянутих, а саме: враховувати інтервальність параметрів системи управління, враховувати наявність запізнювання в каналі управління, а також отримати управління з необхідними показниками якості. При цьому бажано, щоб структура пристрою управління була досить простою для реалізації і широко застосовуваної в промисловості. Наприклад, бажано використання П -, І -, Д -, ПІ -, ПД -, ІД -, ПІД - регуляторів, так як їх апаратна реалізація широко поширена, а програмна реалізація застосовується в багатьох системах програмування сучасних контролерів і мікроконтролерів.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз показав, що найменший рівень автоматизації мають кінцеві логістичні операції транспортно - складського типу, де використовується ручна праця. У зв'язку з цим актуальним є підвищення ефективності виробництва за рахунок вивільнення ручної праці на кінцевих логістичних операціях шляхом використання мобільних керованих транспортних засобів та автоматизації операцій складування і відвантаження виробів.
2. На основі проведеного аналізу обґрунтована доцільність застосування ходової частини транспортного мобільного робота з ромбовидним розташуванням двох провідних і двох опорних коліс.
3. Обґрунтована необхідність у розробці простого критерія, що дозволяє оцінювати робастну модальність систем, представлених у вигляді передавальної функції, що містить ланку із запізненням.
4. На етапі синтезу пристрою управління рухом транспортного мобільного робота, необхідно розробити аналітичний метод синтезу, що дозволяє: враховувати інтервальність параметрів системи управління, враховувати наявність запізнювання в каналі управління, а також отримати управління з необхідними показниками якості.

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

2.1. Аналіз передумов при побудові математичної моделі системи управління рухом мобільного транспортного засобу

Визначені раніше переваги чотириколісної ромбовидної схеми шасі мобільного транспортного засобу є підставою до застосування мобільних транспортних засобів з двома провідними колесами, розташованими на поперечній осі, і двома опорними колесами, розташованими на поздовжній осі, для перевезення вантажів на складі. Структура такого транспортного засобу приведена на рисунку 2.1.

Транспортний засіб приводиться в рух за допомогою подачі бортовим пристроєм управління 7 керуючих ШІМ-сигналів на двигуни постійного струму з понижуючими редукторами 6 і 9, з'єднаних відповідно з ведучими колесами 4 і 11, відстань B між якими визначає ширину колії. Кожен двигун з відповідним редуктором може бути конструктивно виконаний у вигляді єдиного мотор-редуктора, а також можливо використання мотор-колес - комплексних агрегатів, що об'єднують електричний двигун, редуктор і колесо. Опорні колеса 8 і 13, що знаходяться на поздовжній осі 1 платформи 9, що має прямокутну форму з довжиною A і шириною B , розташовані за ромбовидною схемою щодо ведучих коліс 4 і 11. Також на поздовжній осі 1 на відстані l від центру мас C платформи 9 знаходиться датчик 3, що вимірює в кожен момент часу бічне відхилення Δ транспортного засобу від заданої оптичної траси, і датчик 13 наявності мітки, яка визначає початок ділянки позиціонування в точці зупинки. Сигнали датчиків 3 і 13, а також датчиків швидкості обертання ведучих коліс 5 і 1, надходять на входи бортового пристрою управління 7, яке згідно із закладеним законом або алгоритмом розраховує величини керуючих

напруг, що подаються у вигляді ШІМ-сигналів із змінною шпаруватістю на кожен з двигунів провідних коліс. При цьому часові затримки на зчитування сигналів датчиків і формування керуючих впливів визначають величину запізнювання в каналі управління.

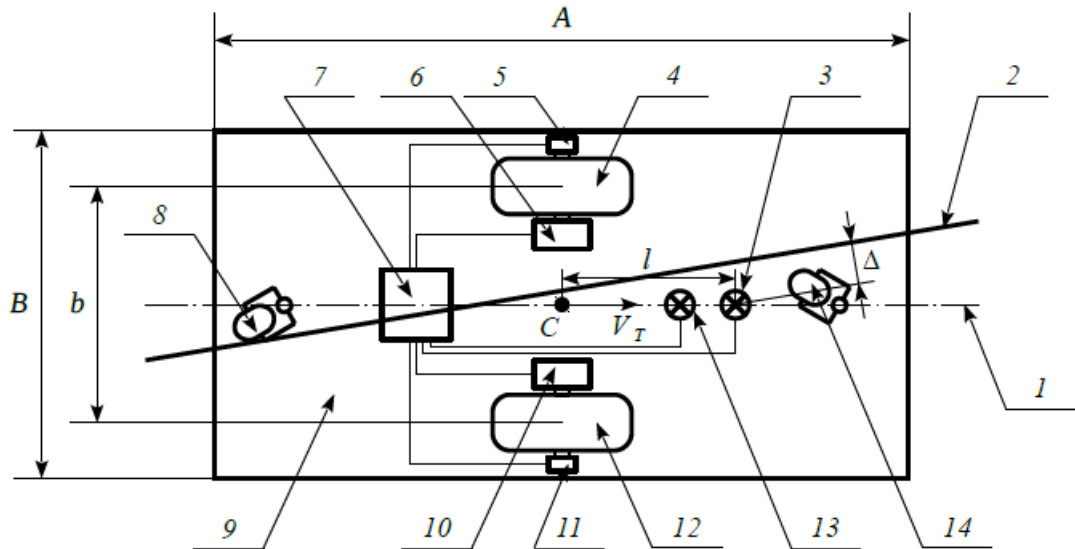


Рис. 2.1. Структура транспортного засобу з чотириколісною ромбовидною схемою шасі

Модель системи управління чотириколісного транспортного засобу, що рухається по гладкому горизонтальному напільному покриттю складу, отримаємо при наступних передумовах [16,22]:

- рух транспортного засобу відбувається тільки лише в горизонтальній площині;
- поверхня, по якій рухається транспортний засіб, є гладкою;
- перерозподіл навантаження на колеса при поворотах, прискореннях і позиціонуванні не враховується;
- платформа транспортного засобу є абсолютно жорсткою;
- ведучі колеса рухаються без прослизання;
- опорні колеса не впливають на рух.

Крім цих передумов, що стосуються руху транспортного засобу в цілому, не буде враховуватися нелінійність роботи двигунів, редукторів, датчиків, дискретність роботи цифрового бортового пристрою управління і т.п. в силу незначності їх впливу в номінальному режимі роботи, тобто в

наближенні отримаємо лінійну безперервну модель системи управління рухом мобільного транспортного засобу.

Оскільки мобільний транспортний засіб бере участь в двох рухах, бічному (перпендикулярному трасі) і поздовжньому (вздовж траси), то необхідна розробка систем керування бічним і поздовжнім рухом і їх математичних моделей з подальшим узагальненням з метою отримання єдиної узагальненої моделі руху мобільного транспортного засобу.

2.2. Модифікація математичної моделі системи управління боковим рухом, що враховує інтервальність параметрів об'єкта і запізнювання в каналі управління

У роботах [20,28] отримано математичну модель бічного руху транспортного засобу у вигляді передавальної функції узагальненого об'єкта управління, що складається з транспортного візка і виконавчих двигунів. Однак зазначена модель представлена в спрощеному вигляді, оскільки не враховує наявності редукторів, датчика бічного відхилення, підсилювального пристрою, якій з'єднує бортовий пристрій управління і двигуни постійного струму. В результаті доопрацювання з урахуванням зазначених елементів удосконалена модель у вигляді структурної схеми системи управління боковим відхиленням мобільного транспортного засобу від заданої оптичної траси, представлена в роботі [27], яка при наявності запізнювання має наступний вигляд (рис. 2.2).

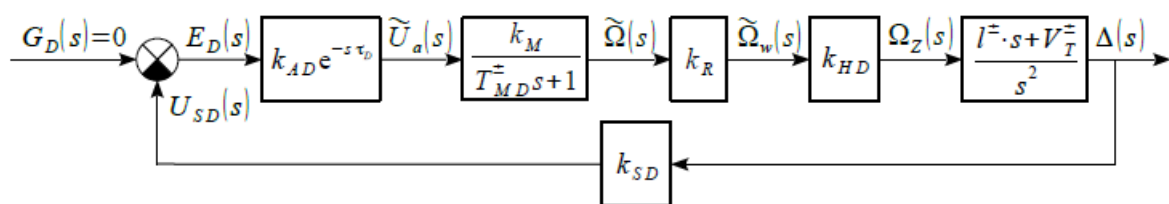


Рис. 2.2. Структурна схема системи управління бічним відхиленням

транспортного засобу

Задаючий сигнал $g_D(t)$ для даної системи управління дорівнює нулю в кожен момент часу, що відповідає бажаній відсутності бокового відхилення транспортного засобу від заданої траси.

Нульовий задаючий сигнал порівнюється з сигналом датчика, що перетворює бічне відхилення $\Delta(t)$ в сигнал $u_{SD}(t)$, а результат порівняння у вигляді різниці $\varepsilon_D(t) = g_D(t) - u_{SD}(t)$ є основою для формування з деяким запізненням τ_D керуючих напруг для двигунів постійного струму, причому різниця цих напруг $\tilde{u}_a(t)$ пропорційна з коефіцієнтом k_{AD} похибці неузгодженості $\varepsilon_D(t)$.

При цьому пристрій спряження має проектуватися таким чином, щоб максимальне значення сигналу датчика бічного відхилення $u_{SD\max}$ створювало максимальну різницю напруг $\tilde{u}_a(t)$, яка відповідає подачі на один з двигунів номінального u_{anom} , а на інший - нульової напруги, звідки k_{AD} може бути обчислений як

$$k_{AD} = \frac{u_{anom}}{u_{SD\max}}$$

Передавальна функція $W_{MD}(s)$ двигунів постійного струму як елементів системи управління, що перетворюють різницю керуючих напруг $\tilde{u}_a(t)$ в різницю швидкостей обертання валів двигунів $\tilde{\omega}(t)$, являє собою аперіодичну ланку:

$$W_{MD}(s) = \frac{\tilde{\Omega}(s)}{\tilde{U}_a(s)} = \frac{k_M}{T_{MD}s + 1}$$

Тут коефіцієнт підсилення k_M обернено пропорційний електромагнітному коефіцієнту електродвигунів:

$$k_M = \frac{1}{c_{em}}, \quad (2.1)$$

який можна визначити з номінальних характеристик двигунів наступним чином:

$$c_{em} = \frac{u_{аном} - i_{аном} R_a}{\omega_{ном}},$$

де $u_{аном}$, $i_{аном}$, $\omega_{ном}$ - відповідно номінальна напруга, номінальний струм якірної обмотки і номінальна частота обертання валів двигунів постійного струму, R_a - опір якірної обмотки двигунів.

Інтервальна постійна часу T_{MD}^{\pm} являє собою суму електромеханічної постійної часу двигунів T_m і інтервальної постійної часу T_{mZ}^{\pm} , яка виникає внаслідок навантаження на двигуни при повороті мобільного транспортного засобу:

$$T_{MD}^{\pm} = T_m + T_{mZ}^{\pm}. \quad (2.2)$$

Постійна часу T_m визначається конструктивними характеристиками двигунів і моментом інерції J обертових частин, приведених до валів двигунів:

$$T_m = \frac{R_a J}{c_{em}^2}. \quad (2.3)$$

Момент інерції J складається з моменту інерції якоря двигуна J_a і приведенного моменту інерції J_w колеса мобільного транспортного робота, яке обертається двигуном через понижуючий редуктор (без урахування моменту інерції самого редуктора):

$$J = J_a + \frac{J_w}{i_R^2},$$

де i_R - передавальне відношення редуктора.

Прийmemo наближено форму колеса, що має масу m_w , у вигляді суцільного циліндра, радіус якого дорівнює r_w , тоді момент інерції J_w обчислюється згідно з відомим виразом:

$$J_w = \frac{m_w r_w^2}{2}.$$

Інтервальна постійна часу T_{mZ}^\pm визначається наступним виразом:

$$T_{mZ}^\pm = 2\mu \left(\frac{r_w}{i_R b} \right)^2 J_Z^\pm, \quad (2.4)$$

де коефіцієнт нахилу механічної характеристики двигунів μ дорівнює

$$\mu = \frac{R_a}{c_{em}^2}, \quad (2.5)$$

а момент інерції транспортного засобу J_Z^\pm відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас, розраховується виходячи з його габаритів, форми і повної маси з урахуванням вантажу на мобільному транспортному роботі. Для транспортного мобільного засобу, що має прямокутну платформу довжиною A і шириною B і повну масу M^\pm , момент інерції J_Z^\pm наближено розраховується за формулою:

$$J_Z^\pm = \frac{M^\pm}{12} (A^2 + B^2). \quad (2.6)$$

Таким чином, інтервальна постійна часу T_{MD}^\pm двигунів постійного струму визначається повною масою M^\pm , яка дорівнює сумі спорядженої маси M_0 транспортного засобу і маси m_i^\pm вантажу:

$$M^{\pm} = M_0 + m_i^{\pm}. \quad (2.7)$$

Оскільки маса вантажу, якій перевозиться на транспортному роботі m_i^{\pm} може мати значення від $m_i^- = 0$ до максимально допустимої m_i^+ включно, то повна маса транспортного засобу згідно виразу (2.7) знаходиться в інтервалі

$$M^{\pm} \in [M_0; M_0 + m_i^+], \quad (2.8)$$

на підставі чого за виразами (2.6) та (2.4) можна послідовно обчислити інтервали, в яких знаходяться значення моменту інерції J_z^{\pm} і постійної часу T_{mz}^{\pm} відповідно. У підсумку, з виразу (2.2) визначається інтервал, в якому знаходиться значення постійної часу двигунів T_{MD}^{\pm} при бічному русі

$$T_{MD}^{\pm} \in [T_{MD}^-; T_{MD}^+],$$

де T_{MD}^- , T_{MD}^+ - найменше і найбільше значення постійної часу T_{MD}^{\pm} відповідно.

Передавальна функція редукторів, що перетворюють різницю швидкостей обертання валів двигунів $\tilde{\omega}(t)$ різницю швидкостей обертання ведучих коліс $\tilde{\omega}_w(t)$, є передавальною функцією підсилювальної ланки

$$W_R(s) = \frac{\tilde{\Omega}_w(s)}{\tilde{\Omega}(s)} = k_R,$$

де k_R - коефіцієнт передачі редукторів, обернено пропорційний передавальному відношенню редуктора i_R :

$$k_R = \frac{1}{i_R}. \quad (2.9)$$

Різниця швидкостей обертання ведучих коліс $\tilde{\omega}_w(t)$ визначає кутову

швидкість $\omega_Z(t)$ повороту транспортного засобу навколо вертикальної осі, що проходить через центр мас. Перетворення різниці швидкостей обертання ведучих коліс в кутову швидкість повороту при ромбовидній схемою шасі описується передавальною функцією пропорційної ланки:

$$W_{HD}(s) = \frac{\Omega_Z(s)}{\widetilde{\Omega}_w(s)} = k_{HD},$$

де коефіцієнт підсилення k_{HD} залежить від радіуса коліс r_w та ширини колії b :

$$k_{HD} = \frac{r_w}{b}.$$

Передавальна функція, що визначає зв'язок бічного відхилення $\Delta(t)$ платформи мобільного транспортного засобу від заданої траєкторії і кутової швидкості повороту $\omega_Z(t)$, має наступний вигляд:

$$W_P(s) = \frac{\Delta(s)}{\Omega_Z(s)} = \frac{l^\pm \cdot s + V_T^\pm}{s^2}. \quad (2.10)$$

де l^\pm - відстань від центру мас транспортної платформи до місця установки датчика бічного відхилення, значення якого вибирається в процесі проектування мобільного транспортного засобу з інтервалу:

$$l^\pm \in [l^-; l^+],$$

причому будемо вважати, що мінімальне значення відстані більше нуля ($l^- > 0$), а максимальне - менше половини довжини транспортної платформи мобільного робота ($l^+ < A/2$). Стале значення поздовжньої швидкості V_T^\pm , з якою мобільний транспортний засіб рухається по ділянці заданої траси, в залежності від завдання буде різним і знаходиться всередині інтервалу

$$V_T^\pm \in [V_T^-, V_T^+],$$

де мінімальне значення швидкості більше нуля ($V_T^- > 0$), а максимальне - визначається номінальною частотою обертання двигунів ω_{nom} , радіусом ведучих коліс r_w і передавальним відношенням редукторів i_R :

$$V_T^+ = \frac{r_w \omega_{nom}}{i_R}.$$

Аналізуючи передавальну функцію (2.10) транспортної платформи можна зробити висновок, що при появі бічного відхилення $\Delta(t)$ відбувається подвійне інтегрування і форсування першого порядку кутової швидкості $\omega_z(t)$,. Перше інтегрування сигналу $\omega_z(t)$ відповідає накопиченню в часі кута повороту $\varphi_z(t)$ поздовжньої осі транспортної платформи щодо прямолінійного напрямку заданої траси, а друге - накопичення з плином часу відхилення $\Delta(t)$ в залежності від кута повороту $\varphi_z(t)$.

Форсування вхідного сигналу $\omega_z(t)$ виникає через розташування датчика бічного відхилення попереду на деякій відстані від центру мас по ходу руху [46], що дозволяє інформації від датчика попереджати реальне бічне відхилення центру мас платформи від заданої траси.

Передавальна функція датчика бічного відхилення, вихідним сигналом якого є напруга $u_s(t)$ пропорційна відхиленню $\Delta(t)$, тому її можна подати у вигляді підсилювальної ланки:

$$W_{SD}(s) = \frac{U_s(s)}{\Delta(s)} = k_{SD}.$$

Вибір і настройка датчика повинні проводитися з урахуванням того, що при максимально допустимому відхиленні Δ_{max} від заданої траєкторії

руху сигнал на виході датчика $u_{SD\ max}$ повинен бути максимальним:

$$k_{SD} = \frac{u_{SD\ max}}{\Delta_{max}}$$

1. Урахування інтервальності параметрів об'єкта в математичній моделі системи управління поздовжнім рухом мобільного транспортного засобу

При тих же основних припущеннях з урахуванням наявності запізнювання в каналі управління і наявності інтервальних параметрів отримані дві моделі управління поздовжнім рухом мобільного транспортного засобу [55]:

- модель системи управління поздовжньої швидкості руху на прямолінійних ділянках траєкторії і на поворотах;
- модель системи управління поздовжнім позиціонуванням в точках зупинки для виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

При управлінні поздовжньою швидкістю (рисунок 2.3), задане значення поздовжньої швидкості $g_v(t)$ руху порівнюється бортовим пристроєм управління з її реальним значенням $V_T(t)$, яке розраховується за сигналами датчиків швидкостей обертання двигунів. На основі отриманої похибки неузгодженості $\varepsilon_v(t) = g_v(t) - V_T(t)$ формуються із запізненням τ_T керуючі напруги двигунів постійного струму, причому сума цих напруг пропорційна з коефіцієнтом k_{AV} похибці неузгодженості $\varepsilon_v(t)$.

Сумарна керуюча напруга двигунів $u_a^\Sigma(t)$ перетворюється двигунами в суму швидкостей обертання їх валів $\omega^\Sigma(t)$. Передавальна функція двигунів, яка відповідає такому перетворенню має наступний вигляд:

$$W_{MT}(s) = \frac{\Omega^\Sigma(s)}{U_a^\Sigma(s)} = \frac{k_M}{T_{MT}^\pm s + 1}$$

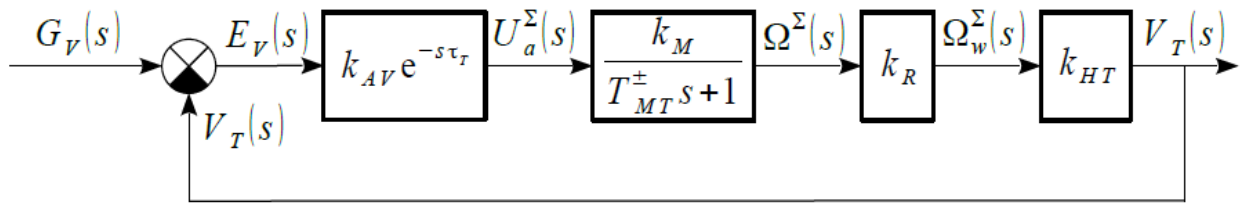


Рис. 2.3. Структурна схема системи управління поздовжньою швидкістю мобільного транспортного засобу

Тут коефіцієнт підсилення k_M знаходиться за формулою (2.1), а інтервальна постійна часу двигунів T_{MT}^\pm враховує навантаження, що виникає при зміні поздовжньої швидкості транспортного засобу наступним чином:

$$T_{MT}^\pm = T_m + T_{mT}^\pm, \quad (2.11)$$

де постійна часу T_m розраховується з виразу (2.3), а інтервальна постійна часу T_{mT}^\pm залежить від коефіцієнта нахилу механічної характеристики двигунів μ , яка визначається за формулою (2.5), інтервальної повної маси транспортного засобу M^\pm , радіуса коліс r_w і передавального відношення редукторів i_r

$$T_{mT}^\pm = \frac{\mu M^\pm}{2} \left(\frac{r_w}{i_r} \right)^2. \quad (2.12)$$

Межі інтервалу, в якому знаходяться значення повної маси M^\pm , які визначаються виразом (2.8), дозволяють знайти за формулою (2.12) ліву T_{mT}^- та праву T_{mT}^+ межі інтервалу, в якому знаходяться значення постійної часу T_{mT}^\pm , що в свою чергу згідно виразу (2.11) визначає інтервал, якому належить значення постійної часу двигунів T_{MT}^\pm при поздовжньому русі:

$$T_{MT}^{\pm} \in [T_{MT}^{-}; T_{MT}^{+}],$$

де T_{MT}^{-} , T_{MT}^{+} - найменше і найбільше значення постійної часу T_{MT}^{\pm} відповідно.

Передавальна функція редукторів, які перетворюють суму швидкостей обертання валів двигунів $\omega^{\Sigma}(t)$ в суму швидкостей обертання ведучих коліс $\omega^w(t)$, також як і в системі управління боковим відхиленням, є підсилювальною ланкою:

$$W_R(s) = \frac{\tilde{\Omega}_w(s)}{\tilde{\Omega}(s)} = k_R,$$

де коефіцієнт k_R знаходиться з паспортних даних редукторів згідно з формулою (2.9).

Сумарна швидкість обертання ведучих коліс $\omega^{\Sigma}(t)$ визначає поздовжню швидкість $V_T(t)$ мобільного транспортного засобу, що має чотириколісну ромбовидну схему шасі, причому перетворення сигналу $\omega^{\Sigma}(t)$ в сигнал $V_T(t)$ описується передавальною функцією

$$W_{HV}(s) = \frac{V_T(s)}{\tilde{\Omega}_w(s)} = k_{HT},$$

де коефіцієнт пропорційності k_{HT} залежить від радіуса ведучих коліс r_w :

$$k_{HT} = \frac{r_w}{2}.$$

Модель системи поздовжнього позиціонування (рис. 2.4) подібна до розглянутої моделі системи управління поздовжньою швидкістю за винятком того, що задаючим впливом при позиціонуванні є зміщення $g_x(t)$ щодо початку траси до місця необхідної зупинки, а вихідним сигналом системи є

поточне реальне зміщення $x_T(t)$ мобільного транспортного засобу. При цьому перетворення суми швидкостей обертання ведучих коліс $\omega^\Sigma(t)$ у положення на трасі $x_T(t)$ описується інтегруючою ланкою з коефіцієнтом k_H T :

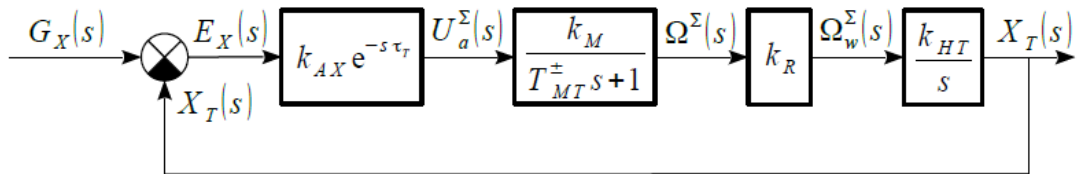


Рис. 2.4. Структурна схема системи управління поздовжнім позиціонуванням мобільного транспортного засобу

4. Розробка узагальненої моделі системи управління рухом транспортного засобу по заданій трасі, що враховує інтервальність об'єкта і запізнювання в каналі управління

Розглянуті моделі бічного відхилення і поздовжнього руху дають повну інформацію про положення мобільного робота щодо заданої траси. Аналізуючи структурні схеми систем управління бічним відхиленням (рис. 2.2) і поздовжньої швидкості (рис. 2.3), неважко помітити, що швидкість, яка отримується як вихідна величина другої системи, є параметром першої. У структурних схемах систем управління поздовжньою швидкістю (рис. 2.3) і поздовжнім положенням (рис. 2.4) є блоки, які відносяться до одних і тих же вузлів транспортного засобу, а саме до двигунів і редукторів, що описуються однаковими передавальними функціями і мають однакові сигнали на входах відповідних блоків і їх виходах. Крім того, блок, який відповідає шасі, відрізняється лише наявністю інтегрування при управлінні по положенню. Враховуючи перераховані особливості і вводячи додаткові елементи і зв'язки, отримаємо структурну схему узагальненої моделі, що враховує як боковий, так і поздовжній рух (рис. 2.5), а також наявність запізнювання в каналі управління та інтервальність об'єкта.

Наявність логічного елемента в структурній схемі (рис. 25), що спрацює за значенням логічного сигналу \overline{ST} , моделює перемикання режиму управління поздовжнім рухом, яке відбувається:

- 1) при наближенні транспортного засобу до точки позиціонування на трасі, в якій потрібно зробити зупинку для здійснення операції навантаження або розвантаження виробів;
- 2) при початку руху від точки зупинки по ділянці траєкторії.

Перший випадок відповідає включенню системи поздовжнього позиціонування, що здійснює управління положенням $x_T(t)$ і гальмування транспортного засобу ($\overline{ST}=0$), а другий - включенню при розгоні системи управління поздовжньою швидкістю $V_T(t)$ ($\overline{ST}=1$).

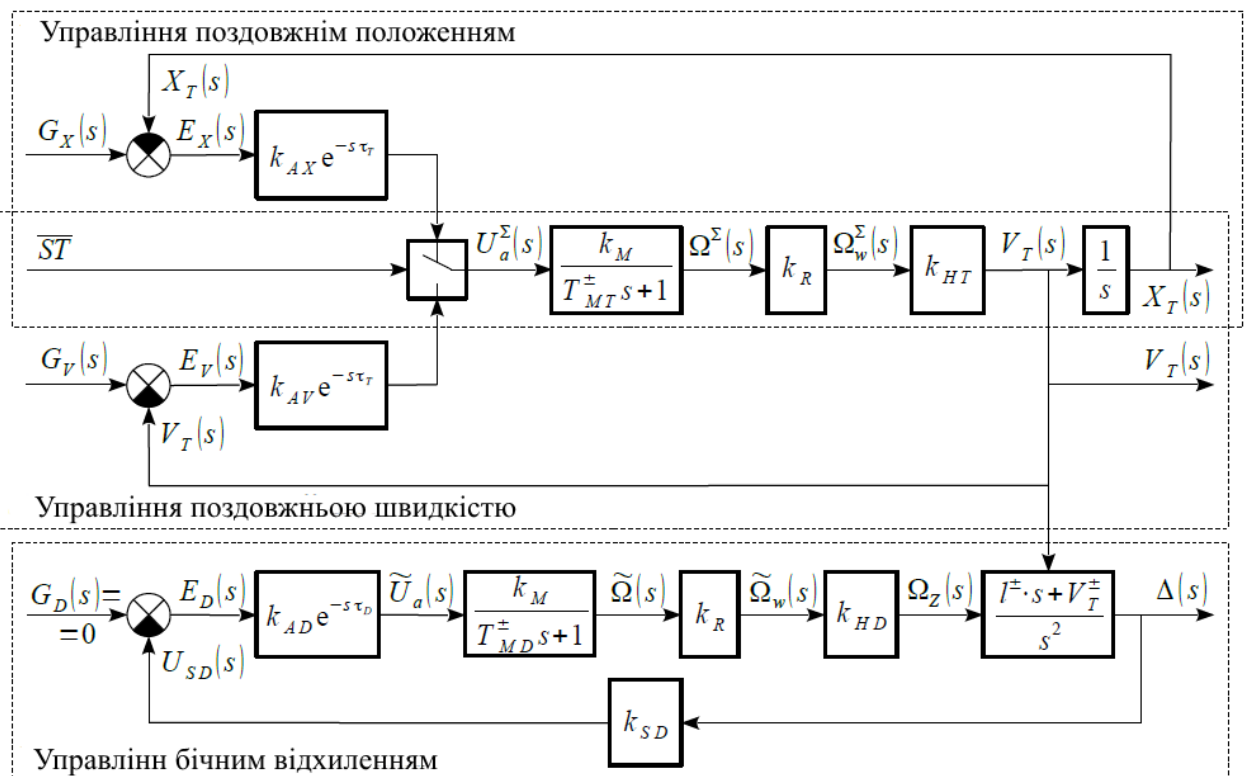


Рис. 2.5. Структурна схема узагальненої моделі системи управління рухом мобільного транспортного засобу

Процес включення режиму управління позиціонуванням відбувається наступним чином. При русі транспортного засобу до місця навантаження-розвантаження, підзарядки, приймання або відвантаження виробів, що

визначається завданням, отриманим від системи верхнього рівня, відбувається управління по поздовжній швидкості ($\overline{ST} = 1$), при цьому одночасно з цим оцінюється поточне положення на ділянці заданої траси, яке визначається, наприклад, по штрих-кодовій стрічці. Коли відстань від транспортного засобу до точки зупинки стає менше 1 м, відбувається перемикання на управління поздовжнім позиціонуванням ($\overline{ST} = 0$).

Вплив поздовжньої швидкості $V_T(t)$ на параметри передавальної функції транспортної платформи $W_P(s)$ згідно виразу (2.10) визначимо у вигляді структури, зображеної на рис. 2.6, яка відповідає наступному виразу для бічного відхилення $\Delta(t)$:

$$\Delta(t) = \int \left[V_T(t) \cdot \int \omega_z(t) dt + l^\pm \cdot \omega_z(t) \right] dt,$$

де перший доданок підінтегральної функції зовнішнього інтеграла є швидкістю зміни бічного відхилення центру мас мобільного транспортного засобу від траєкторії руху, а друге — швидкістю зміни бічного відхилення датчика від прямолінійної траєкторії руху.

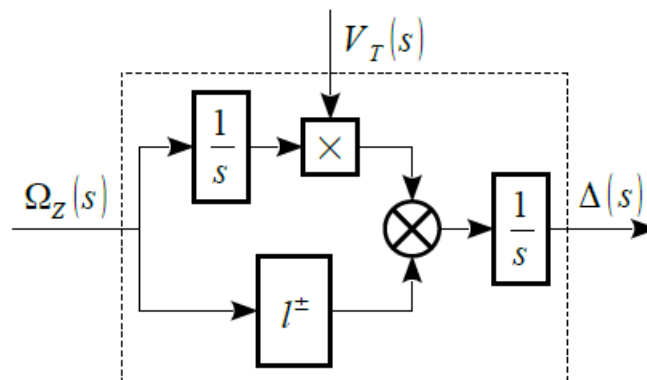


Рис. 2.6. Структурна схема моделі транспортної платформи з урахуванням змінної поздовжньої швидкості руху

Структурна схема узагальненої моделі, наведена на рис. 2.7, дозволяє моделювати рух мобільного транспортного засобу вздовж прямолінійних ділянок заданої траси. Коли ділянка траси не є прямолінійною, відхилення

траси в поточний момент часу від прямого напрямку, яке мала траса в попередній момент моделювання, буде збурюючим впливом для системи управління бічним відхиленням транспортного засобу, що відповідає структурній схемі, наведеної на рис. 2.7, де прийняті наступні позначення: $W_D(s)$ - передавальна функція прямого каналу підсистеми управління боковим відхиленням, $\Delta_R(t)$ - відхилення транспортного засобу від прямолінійного напрямку траси; $\Delta_T(t)$ — відхилення наступної точки на трасі від прямолінійного напрямку траси; $\Delta(t)$ — бічне відхилення транспортного засобу від заданої траси.

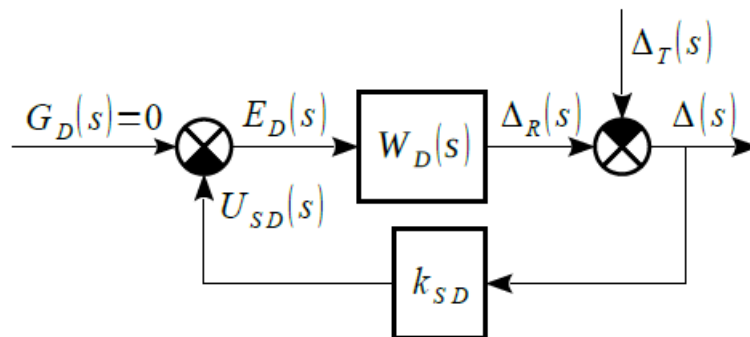


Рис. 2.7 Підсистема управління бічним відхиленням з урахуванням збурюючого впливу, що є наслідком відхилення напрямку траси від прямолінійного

Комбінуючи прямолінійні ділянки і ділянки повороту, на яких траєкторія має відхилення від прямолінійного напрямку, можна моделювати завдання різних конфігурацій траси.

Висновки до розділу 2

1. Для навігації окремих транспортних засобів в не запиленому приміщенні запропоновано використовувати оптичний спосіб завдання траси, а позиціонування в місцях зупинки здійснювати по штрих - коду.

2. Для перевезення готової продукції по рівній підлозі складу обґрунтовано застосування чотириколісної схеми шасі мобільного

транспортного засобу, обрані основні компоненти системи управління рухом і розроблена структура транспортного засобу.

3. Розроблено узагальнену математичну модель системи управління рухом мобільного транспортного засобу з інтервальними параметрами, що відрізняється наявністю взаємозв'язку систем управління боковим відхиленням від траси, поздовжньою швидкістю і поздовжнім положенням з урахуванням запізнювання в каналі управління.

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

3.1. Розробка методу синтезу регулятора, що забезпечує робастну модальність системи з інтервальними параметрами і запізненням на основі розширеного D -розбиття

При параметричному синтезі регулятора для систем управління бічним відхиленням, поздовжньою швидкістю і поздовжнім положенням мобільного транспортного засобу необхідно вибрати такі налаштування регулятора, при якому рух буде задовольняти заданим показникам якості при зміні параметрів системи або об'єкта управління в деякому інтервалі. Використана в магістерській дипломній роботі методика заснована на побудові кривих D -розбиття і виділенні в просторі параметрів регулятора областей, в кожній точці яких параметри регулятора забезпечують задані показники якості для всіх можливих значень інтервальних параметрів системи або об'єкта. Така методика застосована, наприклад, в [25], в якій однак, не враховувалося запізнювання в каналі управління, яке необхідно враховувати при побудові автоматизованої системи керування транспортним мобільним роботом.

Розглянемо випадок, коли при введенні в канал управління лінійного регулятора, якій має параметри налаштування k_1, k_2, \dots, k_n , характеристичне рівняння замкнутої системи можна привести до виду:

$$D^\pm(s) = M^\pm(s)K + C^\pm(s) = 0, \quad (3.1)$$

де $M^\pm(s)$ — вектор-рядок інтервальних поліномів розмірністю $(1 \times n)$;

$K = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{bmatrix}^T$ - вектор-стовпець параметрів налаштування лінійного регулятора розмірністю $(n \times 1)$; $C^\pm(s)$ - інтервальний квазіполіном, що враховує фіксований час запізнювання.

Будемо вважати деякі параметри регулятора незалежними, які слід вибрати, а інші - залежними, які функціонально пов'язані з першими таким чином, щоб система управління задовольняла заданими показниками якості, тобто.

$$\mathbf{K}_1 = f(\mathbf{K}_2), \quad (3.2)$$

де $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ — вектор-стовпці залежних і незалежних параметрів регулятора розмірністю $(n_1 \times 1)$ та $(n_2 \times 1)$ відповідно ($n = n_1 + n_2$), які складають вектор-стовпець \mathbf{K} : $\mathbf{K} = (\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{K}_2)^T$. Тоді характеристичне рівняння (3.1) представимо наступним чином

$$D^\pm(s) = A^\pm(s)\mathbf{K}_1 + B^\pm(s)\mathbf{K}_2 + C^\pm(s) = 0, \quad (3.3)$$

де $A^\pm(s), B^\pm(s)$ - вектор-рядки інтервальних поліномів розмірністю $(1 \times n_1)$ та $(1 \times n_2)$ відповідно ($n = n_1 + n_2$), які складають вектор-рядок $M^\pm(s)$:
 $M^\pm(s) = (A^\pm(s) \quad B^\pm(s))$.

В окремому випадку, коли залежні параметри не обрані, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_2, M^\pm(s) = B^\pm(s)$, характеристичне рівняння (3.3) має наступний вигляд:

$$D^\pm(s) = B^\pm(s)\mathbf{K}_2 + C^\pm(s) = 0. \quad (3.4)$$

При номінальних значеннях інтервальних параметрів системи вектор-рядки інтервальних поліномів $A^\pm(s), B^\pm(s)$ і інтервальний квазіполіном $C^\pm(s)$ позначимо через $A^0(s), B^0(s)$ та $C^0(s)$ відповідно. В цьому випадку номінальне характеристичне рівняння можна записати у наступному вигляді:

$$D^0(s) = A^0(s)\mathbf{K}_1 + B^0(s)\mathbf{K}_2 + C^0(s) = 0. \quad (3.5)$$

В площині коренів характеристичного рівняння задаємо розташування

n_1 коренів ξ_i номінального характеристичного рівняння (3.19) так, щоб всі вони розташовувалися зліва від межі

$$\Lambda = -\delta(\omega) + j\omega, \quad (3.6)$$

контур, що охоплює область, всередині якої знаходяться інші корені. Корені ξ_i та межа Λ , задані на основі бажаних показників якості процесу управління, вони визначають модальність системи.

Сформулюємо задачу синтезу. У просторі незалежних параметрів регулятора K_2 необхідно знайти області, в яких параметри K_2 визначають згідно з виразом (3.2) такі залежні параметри K_1 , що при підстановці K_1 та K_2 в характеристичне рівняння (3.3) всі корені рівняння (3.3) знаходяться лівіше заданої межі (3.6) для всіх можливих значень інтервальних параметрів поліномів, що є елементами векторів $A^\pm(s)$, $B^\pm(s)$ та квазіполінома $C^\pm(s)$. Вирішуючи задачу параметричного синтезу, будемо підставляти по черзі значення заданих коренів ξ_i ($i=1, 2, \dots, n_1$) в номінальне характеристичне рівняння (3.5) замість комплексної невідомої s . В результаті отримаємо систему з n_1 рівнянь, яку представимо в матричному вигляді:

$$A^0(\xi)K_1 + B^0(\xi)K_2 + C^0(\xi) = 0, \quad (3.7)$$

де $\xi = (\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_{n_1})^T$ - вектор-стовпець заданих коренів; $A^0(\xi)$, $B^0(\xi)$, $C^0(\xi)$ матриці розмірністю $(n_1 \times n_1)$, $(n_1 \times n_2)$, $(n_1 \times 1)$ відповідно, які дорівнюють

$$A^0(\xi) = \begin{pmatrix} A^0(\xi_1) \\ A^0(\xi_2) \\ \dots \\ A^0(\xi_{n_1}) \end{pmatrix}, B^0(\xi) = \begin{pmatrix} B^0(\xi_1) \\ B^0(\xi_2) \\ \dots \\ B^0(\xi_{n_1}) \end{pmatrix}, C^0(\xi) = \begin{pmatrix} C^0(\xi_1) \\ C^0(\xi_2) \\ \dots \\ C^0(\xi_{n_1}) \end{pmatrix}.$$

Матричне рівняння (3.7) дозволяє отримати функціональну залежність

(3.5) K_1 от K_2 :

$$K_1 = - (A^0(\xi))^{-1} B^0(\xi) K_2 - (A^0(\xi))^{-1} C^0(\xi), \quad (3.8)$$

Підставимо вираз для K_1 з рівняння (3.8) в рівняння (3.3), отримуємо:

$$D^\pm(s) = A^\pm(s) \left[- (A^0(\xi))^{-1} B^0(\xi) K_2 - (A^0(\xi))^{-1} C^0(\xi) \right] + B^\pm(s) K_2 + C^\pm(s) = 0,$$

і згрупуємо доданки, що містять множник K_2 :

$$D^\pm(s) = \left[- A^\pm(s) (A^0(\xi))^{-1} B^0(\xi) + B^\pm(s) \right] K_2 - A^\pm(s) (A^0(\xi))^{-1} C^0(\xi) + C^\pm(s),$$

Вводячи позначення $P^\pm(s)$ и $Q^\pm(s)$, отримуємо:

$$D^\pm(s) = P^\pm(s) K_2 + Q^\pm(s) = 0, \quad (3.9)$$

де в загальному випадку, коли визначено вектор залежних параметрів K_2 , $P^\pm(s) = - A^\pm(s) (A^0(\xi))^{-1} B^0(\xi) + B^\pm(s)$ -

вектор-рядок інтервальних поліномів

розмірністю $(1 \times n_1)$, $Q^\pm(s) = - A^\pm(s) (A^0(\xi))^{-1} C^0(\xi) + C^\pm(s)$ - інтервальний

квазіполіном. У окремому випадку, коли залежні параметри відсутні, вектор-

рядок інтервальних поліномів $P^\pm(s)$ і інтервальний квазіполіном $Q^\pm(s)$

приймають наступний вигляд $P^\pm(s) = B^\pm(s)$ та $Q^\pm(s) = C^\pm(s)$ відповідно.

Підставляючи в вираз (3.9) межу (3.6), тобто зробивши заміну

$s \rightarrow \Lambda = -\delta(\omega) + j\omega$, отримаємо рівняння

$$P^\pm(\delta, \omega) \mathbf{K}_2 + Q^\pm(\delta, \omega) = 0, \quad (3.10)$$

яке при зміні ω від 0 до ∞ дозволяє визначити в просторі параметрів \mathbf{K}_2 криву D-розбиття, обмежуючу області, в яких значення параметрів \mathbf{K}_2 і відповідних їм згідно з виразом (3.2) параметрів \mathbf{K}_1 , є такими, що при підстановці \mathbf{K}_1 та \mathbf{K}_2 у характеристичне рівняння (3.3) всі корені рівняння (3.3) будуть знаходитися лівіше заданої межі (3.6) для заданих значень інтервальних параметрів поліномів, що є елементами векторів $\mathbf{A}^\pm(s)$, $\mathbf{B}^\pm(s)$ і квазіполінома $C^\pm(s)$. Побудувавши криві D-розбиття для всіх можливих поєднань граничних значень інтервальних параметрів системи управління мобільним транспортним роботом, визначаються області параметрів \mathbf{K}_2 і відповідних їм коефіцієнтів K_1 , при яких всі корені рівняння (3.3) знаходяться лівіше заданої межі (3.6) для всіх значень інтервальних параметрів поліномів, що є елементами векторів $\mathbf{A}^\pm(s)$, $\mathbf{B}^\pm(s)$ та квазіполінома $C^\pm(s)$.

Порядок побудови кривої D-розбиття для заданих значень інтервальних параметрів залежить від розміру вектору \mathbf{K}_2 . Якщо вектор-стовпець \mathbf{K}_2 складається з одного елемента k_{21} , тобто є один незалежний параметр налаштування регулятора, в комплексній площині якого буде проводитися D-розбиття, то вектор-рядок поліномів $P^\pm(\delta, \omega)$ також складається з одного елемента-полінома $P^\pm(\delta, \omega)$. У цьому випадку згідно виразу (3.10) лінія D-розбиття в комплексній площині параметра k_{21} задається наступним виразом:

$$P^\pm(\delta, \omega) k_{21} + Q^\pm(\delta, \omega) = 0, \quad (3.11)$$

У разі, коли є два незалежних параметра

$$\mathbf{K}_2 = (k_{21} \quad k_{22})^T$$

та вектор-рядок

$$\mathbf{P}^{\pm}(\delta, \omega) = (P_1^{\pm}(\delta, \omega) \quad P_2^{\pm}(\delta, \omega))$$

складається з двох елементів-поліномів, прирівнюючи нулю окремо дійсну та уявну частини правої частини рівняння (3.10), отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} P_1^{\pm}(\delta, \omega) k_{21} + \operatorname{Re} P_2^{\pm}(\delta, \omega) k_{21} + \operatorname{Re} Q^{\pm}(\delta, \omega) = 0; \\ \operatorname{Im} P_1^{\pm}(\delta, \omega) k_{21} + \operatorname{Im} P_2^{\pm}(\delta, \omega) k_{21} + \operatorname{Im} Q^{\pm}(\delta, \omega) = 0, \end{cases} \quad (3.12)$$

рішення якої представимо у вигляді

$$\mathbf{K}_2 = (k_{21} \quad k_{22})^T = -\mathbf{P}_{\Re \Im}^{-1}(\delta, \omega) \mathbf{Q}_{\Re \Im}(\delta, \omega), \quad (3.13)$$

де

$$\mathbf{P}_{\Re \Im}^{\pm}(\delta, \omega) = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} P_1^{\pm}(\delta, \omega) & \operatorname{Re} P_2^{\pm}(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} P_1^{\pm}(\delta, \omega) & \operatorname{Im} P_2^{\pm}(\delta, \omega) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q}_{\Re \Im}^{\pm}(\delta, \omega) = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} Q^{\pm}(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} Q^{\pm}(\delta, \omega) \end{pmatrix}.$$

При рівному нулю визначнику $\det \mathbf{P}^{\pm}(\delta, \omega) = 0$ система (3.12) стає виродженою, що призводить до появи на площині D-розбиття особливих ліній. У разі розмірності вектору \mathbf{K}_2 більше двох для побудови двовимірної кривої D-розбиття можна вибрати два обчислюваних параметра, а решту віднести до варійованих:

$$\mathbf{K}_2 = (\bar{\mathbf{K}}_2 \quad \tilde{\mathbf{K}}_2)^T$$

де $\bar{\mathbf{K}}_2$ - вектор обчислюваних параметрів розмірністю (2×1) , $\tilde{\mathbf{K}}_2$ - вектор варійованих параметрів розмірністю $((n-2) \times 1)$. Тоді рівняння (3.10) перетворюється в рівняння

$$\bar{\mathbf{P}}^{\pm}(\delta, \omega) \bar{\mathbf{K}}_2 + \tilde{\mathbf{P}}^{\pm}(\delta, \omega) \tilde{\mathbf{K}}_2 + \mathbf{Q}^{\pm}(\delta, \omega) = 0,$$

рішення якого щодо невідомого вектору \bar{K}_2 можна отримати у наступному вигляді

$$\bar{K}_2 = \left(\bar{P}_{\text{RT}}^{\pm}(\delta, \omega) \right)^{-1} \left(\tilde{P}_{\text{RT}}^{\pm}(\delta, \omega) \tilde{K}_2 + Q_{\text{RT}}^{\pm}(\delta, \omega) \right), \quad (3.14)$$

де

$$\bar{P}_{\text{RT}}^{\pm}(\delta, \omega) = \begin{pmatrix} \text{Re } \bar{P}^{\pm}(\delta, \omega) \\ \text{Im } \bar{P}^{\pm}(\delta, \omega) \end{pmatrix}, \quad \tilde{P}_{\text{RT}}^{\pm}(\delta, \omega) = \begin{pmatrix} \text{Re } \tilde{P}^{\pm}(\delta, \omega) \\ \text{Im } \tilde{P}^{\pm}(\delta, \omega) \end{pmatrix}.$$

Ідея побудови D-розбиття в цьому випадку полягає в довільному виборі варійованих параметрів \tilde{K}_2 і отриманні межі D-розбиття згідно виразу (3.14) в площині параметрів \bar{K}_2 . Надалі, якщо досягти необхідні показники якості не вдасться, параметри \tilde{K}_2 , які варіюються можна змінити і повторити процес синтезу заново. При рівності нулю визначника $\det P^{\pm}(\delta, \omega) = 0$ у площині коефіцієнтів \bar{K}_2 будується особлива лінія D-розбиття.

Таким чином, можна рекомендувати наступну методику параметричного синтезу регулятора:

1. На підставі структурної схеми системи управління визначається характеристичний поліном (3.3) з урахуванням обраного типу регулятора.
2. Вибираються залежні K_1 і незалежні K_2 параметри регулятора.
3. Знаходяться матриці $A^{\pm}(s)$, $B^{\pm}(s)$ і квазіполіном $C^{\pm}(s)$, які відповідають рівнянню (3.3).
4. Виходячи з бажаних показників якості задається межа Λ і розташування деяких коренів.
5. Виходячи із заданих коренів ξ згідно виразу (3.8) виражаються залежні K_1 параметри через незалежні K_2 .
6. Згідно виразу (3.9) записуються вектор-рядок інтервальних поліномів $P^{\pm}(s)$ і інтервальний квазіполіном $Q^{\pm}(s)$.
7. Проводиться заміна $S \rightarrow \Lambda = -\delta(\omega) + j\omega$ для отримання рівняння (3.10).
8. Для знаходження налаштувань регулятора, змінюючи ω від 0 до ∞ , за

виразами (3.11), (3.12) або (3.14) будуються лінії D-розбиття для всіх можливих поєднань граничних значень інтервальних параметрів.

9. В обумовлених випадках будуються особливі лінії.

10. На побудовані криві D-розбиття наноситься штрихування.

11. На підставі штрихування визначається область-претендент, яка відповідає системі, що має всі корені характеристичного рівняння всередині заданого межею Λ контуру при всіх заданих збуреннях параметрів.

12. У знайдений області вибирається значення вектору K_2 і для всіх можливих поєднань граничних значень інтервальних параметрів визначається виконання умови знаходження коренів всередині заданого контуру.

13. Знайдене значення K_2 використовується для визначення інших коефіцієнтів K_1 за виразом (3.8).

3.2 Синтез регулятора робастної системи управління боковим відхиленням методом розширеного D-розбиття

Застосуємо запропонований підхід на прикладі синтезу ПІД-регулятора для системи управління боковим відхиленням, передавальна функція прямого каналу якої містить інтервальні параметри (рис. 2.2).

Додамо в прямий канал передачі ПІД-регулятор з коефіцієнтами посилення пропорційної k_{PD} , інтегральної k_{ID} і диференціальної k_{DD} складових (рис. 3.1). Тоді передавальна функція прямого каналу управління буде дорівнювати

$$W_{DPID}(s) = \frac{(k_{PD}s + k_{ID} + k_{DD}s^2)k_{AD}k_Mk_Rk_{HD}(l^\pm \cdot s + V_T^\pm)}{(T_{MD}^\pm s + 1)s^3} e^{-\tau_D s},$$

звідки характеристичне рівняння замкнутої системи з урахуванням наявності датчика бічного відхилення в зворотному зв'язку має наступний вигляд:

$$k_D(k_{PD}s+k_{ID}+k_{DD}s^2)\left(l^\pm \cdot s+V_T^\pm\right)e^{-s\tau_D}+\left(T_{MD}^\pm s+1\right)s^3=0, \quad (3.15)$$

$$k_D=k_{AD}k_Mk_Rk_{HD}k_{SD}.$$

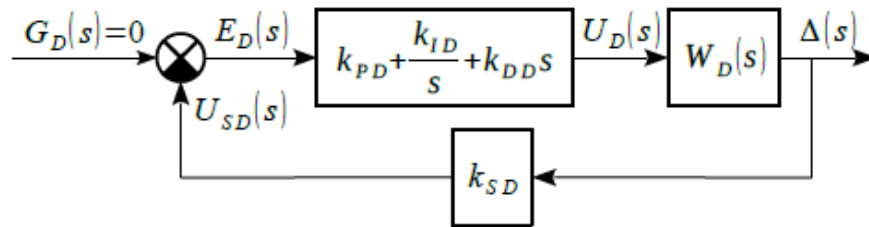


Рис. 3.1. Структурна схема системи управління боковим відхиленням з ПІД-регулятором

Скористаємося запропонованою методикою розширеного D-розбиття. В якості незалежних параметрів виберемо пропорційний k_{PD} і диференціальної k_{DD} коефіцієнти регулятора, тоді залежним параметром буде коефіцієнт інтегральної складової k_{ID} , т. е. $k_{ID} = f(k_{PD}, k_{DD})$. Запишемо вираз (3.15) в матричному вигляді, помноживши всі частини рівності на $e^{\tau_D s}$, отримаємо

$$k_D \left(l^\pm \cdot s + V_T^\pm \right) \cdot k_{ID} + k_D \begin{pmatrix} l^\pm \cdot s^2 + V_T^\pm s \\ l^\pm \cdot s^3 + V_T^\pm s^2 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} k_{PD} \\ k_{DD} \end{pmatrix} + \left(T_{MD}^\pm s^4 + s^3 \right) e^{\tau_D s} = 0. \quad (3.16)$$

Зіставляючи вираз (3.16) з виразом (3.3), отримуємо:

$$\mathbf{K}_1 = k_{ID}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} k_{PD} & k_{DD} \end{pmatrix}^T, \quad (3.17)$$

$$\mathbf{A}^\pm(s) = k_D \left(l^\pm \cdot s + V_T^\pm \right), \quad \mathbf{B}^\pm(s) = k_D \begin{pmatrix} l^\pm \cdot s^2 + V_T^\pm s \\ l^\pm \cdot s^3 + V_T^\pm s^2 \end{pmatrix}^T, \quad \mathbf{C}^\pm(s) = \left(T_{MD}^\pm s^4 + s^3 \right) e^{\tau_D s}.$$

В такому випадку, коли вектор \mathbf{K}_1 складається з одного залежного параметра k_{ID} , досить задатися розташуванням тільки одного кореня ξ_1 характеристичного рівняння (3.16). Тобто вектор ξ в даному випадку

складається з одного елемента $\xi = \xi_1$, а вираз (3.7) має наступний вигляд:

$$A^0(\xi_1)K_1 + B^0(\xi_1)K_2 + C^0(\xi_1) = 0,$$

$$A^0(\xi_1) = k_D(l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0), \quad B^0(\xi_1) = k_D \begin{pmatrix} l^0 \cdot \xi_1^2 + V_T^0 \xi_1 \\ l^0 \cdot \xi_1^3 + V_T^0 \xi_1^2 \end{pmatrix}^T, \quad C^0(\xi_1) = (T_{MD}^0 \xi_1^4 + \xi_1^3) e^{\tau_D \xi_1}.$$

Запишемо вираз (3.16) для системи, яка розглядається:

$$k_{ID} = - \left(k_D (l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0) \right)^{-1} k_D \begin{pmatrix} l^0 \cdot \xi_1^2 + V_T^0 \xi_1 \\ l^0 \cdot \xi_1^3 + V_T^0 \xi_1^2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} k_{PD} \\ k_{DD} \end{pmatrix} - \left(k_D (l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0) \right)^{-1} (T_{MD}^0 \xi_1^4 + \xi_1^3) e^{\tau_D \xi_1}.$$

Спростуючи, отримаємо функціональну залежність коефіцієнта інтегральної складової від інших коефіцієнтів ПД-регулятора:

$$k_{ID} = -\xi_1 k_{PD} - \xi_1^2 k_{DD} - \frac{T_{MD}^0 \xi_1^4 + \xi_1^3}{k_D (l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0)} e^{\tau_D \xi_1}. \quad (3.18)$$

Такий же результат отримуємо, якщо замінити s на ξ_1 у виразі (3.15) і виразити k_{ID} . Запишемо векторний поліном $P^\pm(s)$ та квазіполіном $Q^\pm(s)$, введені в рівняння (3.9):

$$P^\pm(s) = -k_D (l^\pm \cdot s + V_T^\pm) \left(k_D (l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0) \right)^{-1} k_D \begin{pmatrix} l^0 \cdot \xi_1^2 + V_T^0 \xi_1 \\ l^0 \cdot \xi_1^3 + V_T^0 \xi_1^2 \end{pmatrix}^T + k_D \begin{pmatrix} l^\pm \cdot s^2 + V_T^\pm s \\ l^\pm \cdot s^3 + V_T^\pm s^2 \end{pmatrix}^T,$$

$$Q^\pm(s) = -k_D (l^\pm \cdot s + V_T^\pm) \left(k_D (l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0) \right)^{-1} (T_{MD}^0 \xi_1^4 + \xi_1^3) e^{\tau_D \xi_1} + (T_{MD}^\pm s^4 + s^3) e^{\tau_D s}.$$

Спростимо отримані вирази:

$$P^\pm(s) = k_D (l^\pm \cdot s + V_T^\pm) \begin{pmatrix} s - \xi_1 \\ s^2 - \xi_1^2 \end{pmatrix}^T,$$

$$Q^\pm(s) = -\frac{l^\pm \cdot s + V_T^\pm}{l^0 \cdot \xi_1 + V_T^0} (T_{MD}^0 \xi_1^4 + \xi_1^3) e^{\tau_D \xi_1} + (T_{MD}^\pm s^4 + s^3) e^{\tau_D s},$$

Звідки отримуємо:

$$P_1^\pm(s) = k_D(l^\pm \cdot s + V_T^\pm)(s - \xi_1)^T, P_2^\pm(s) = k_D(l^\pm \cdot s + V_T^\pm)(s^2 - \xi_1^2)^T.$$

У рівнянні (3.13) підставимо замість змінної s рівняння межі (3.6), а з урахуванням виразу (3.17) отримаємо:

$$\begin{pmatrix} k_{PD} \\ k_{DD} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \operatorname{Re} P_1^\pm(\delta, \omega) & \operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} P_1^\pm(\delta, \omega) & \operatorname{Im} P_2^\pm(\delta, \omega) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \operatorname{Re} Q^\pm(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} Q^\pm(\delta, \omega) \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

При $\omega=0$ визначник матриці, що містить дійсні та уявні частини поліномів $P_1^\pm(\delta, \omega)$ та $P_2^\pm(\delta, \omega)$, дорівнює нулю, так як для даної системи $\operatorname{Im} P^\pm(\delta, \omega) = (\operatorname{Im} P_1^\pm(\delta, \omega) \operatorname{Im} P_2^\pm(\delta, \omega)) = (00)$. Отже, при $\omega=0$ в площині D-розбиття з'явиться особлива пряма, рівняння якої виходить з першого рівняння системи (3.12):

$$\operatorname{Re} P_1^\pm(\delta, 0)k_{PD} + \operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, 0)k_{DD} + \operatorname{Re} Q^\pm(\delta, 0) = 0,$$

звідки

$$k_{DD} = - \frac{\operatorname{Re} P_1^\pm(\delta, 0)}{\operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, 0)} k_{PD} - \frac{\operatorname{Re} Q^\pm(\delta, 0)}{\operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, 0)}.$$

Рівняння межі, зліва від якої будуть розташовуватися корені характеристичного полінома, отримаємо на підставі необхідного часу регулювання T_{set} та перерегулювання σ перехідного процесу компенсації бічного відхилення. Час регулювання T_{set} визначає частину межі у вигляді вертикальної лінії $\delta(\omega) = \delta_0$ в площині коренів $(\delta; j\omega)$. Абсцису положення лінії δ_0 можна обчислити за відомою формулою

$$\delta_0 = \frac{1}{T_{\text{set}}} \ln \frac{1}{\varepsilon_b},$$

де ε_b - задане відносне відхилення від усталеного значення, яке не перевищує регульована величина після часу регулювання. Перерегулювання σ задає прямі, які проходять через початок координат під кутом $-\pi \pm \varphi$, $\varphi = \arctg(-\pi / \ln \sigma)$. В результаті дійсну складову всіх точок границі (3.6) можна задати у вигляді системи:

$$\delta(\omega) = \begin{cases} \delta_0, & |\omega| \leq \frac{\pi \delta_0}{\ln \sigma}; \\ \frac{\ln \sigma}{\pi} \omega, & |\omega| > \frac{\pi \delta_0}{\ln \sigma}. \end{cases} \quad (3.20)$$

Корінь ξ_1 розташуємо лівіше заданої межі, наприклад, $\xi_1 = -2\delta_0$ (рис. 3.2).

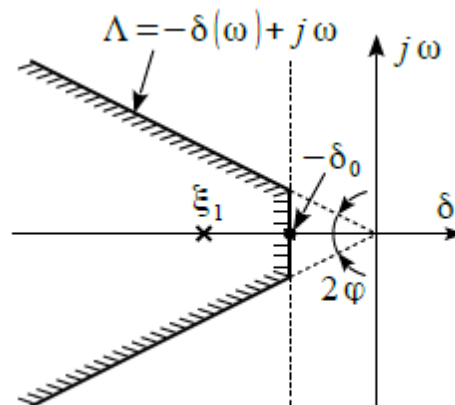


Рис. 3.2. Межа розташування коренів при синтезі робастного ПІД-регулятора для системи управління бічним відхиленням мобільного транспортного засобу

Вважаючи параметр l^\pm рівним номінальному l^0 , вибраному в процесі проектування, отримано D-розбиття (рис. 3.3) для чотирьох поєднань граничних значень інших інтервальних параметрів $(T_M^- ; V_T^-)$, $(T_M^- ; V_T^+)$,

$(T_M^+ ; V^-)$ і $(T^+ ; V_M^+)$. Штрихування на кривих D-розбиття і особливі прямі, побудовані при $\omega=0$, нанесена згідно з тим, що для всіх частот ω визначник матриці $\det P^\pm(\delta, \omega) > 0$.

Лінії D-розбиття з нанесеним на них штрихуванням дозволяють визначити область-претендент модальності системи (рис. 3.3,б). Всередині області претендента виберемо точку K^* , координати якої відповідають коефіцієнтам пропорційної k_{PD} і диференціальної k_{DD} складової ПД-регулятора, що визначають коефіцієнт інтегральної складової k_{ID} згідно рівнянню (3.18).

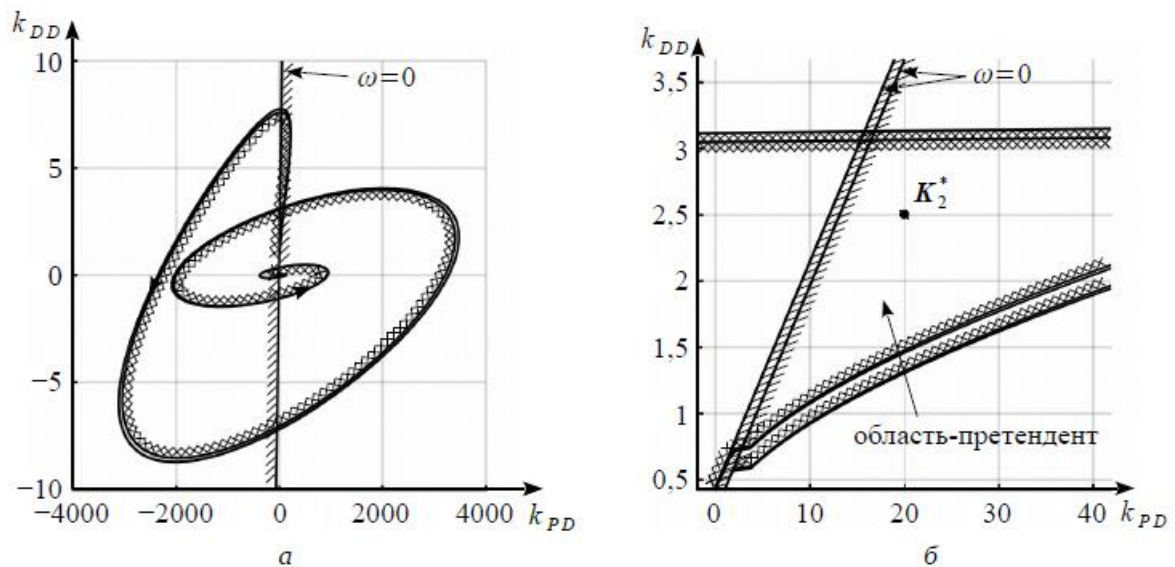


Рис. 3.3. Межа D-розбиття:

а - загальний вигляд; б - збільшений вигляд області-претендента

1. Синтез регулятора робастної системи управління поздовжнім рухом методом розширеного D-розбиття

Аналогічно можна отримати рівняння меж розширених D-розбиття при параметричному синтезі регуляторів для систем управління поздовжньою швидкістю і поздовжнім позиціонуванням.

Робастне керування поздовжньою швидкістю. За структурною схемою

узагальненої моделі (рис. 2.3) запишемо передавальну функцію прямого каналу системи управління поздовжньою швидкістю:

$$W_V^\pm(s) = \frac{k_{AV}^\pm k_M k_R k_{HT}}{T_{MT}^\pm s + 1} e^{-\tau_r s}.$$

Видно, що система управління поздовжньою швидкістю є системою статичного класу, що є причиною наявності статичної помилки в процесі управління. Для усунення неузгодженості виходу системи і завдання в сталому режимі введемо в прямий канал передачі ПІ-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PIV}(s) = k_{PV} + \frac{k_{IV}}{s} = \frac{k_{PV}s + k_{IV}}{s},$$

$$W_V^\pm(s) = \frac{(k_{PV}s + k_{IV}) k_{AV}^\pm k_M k_R k_{HT}}{s(T_{MT}^\pm s + 1)} e^{-\tau_r s}.$$

в результаті чого передавальна функція прямого каналу стане наступною: Отримаємо характеристичне рівняння замкненої системи з одиничним негативним зворотним зв'язком:

$$(k_{PV}s + k_{IV}) k_V^\pm e^{-\tau_r s} + s(T_{MT}^\pm s + 1) = 0, \quad (3.21)$$

$$k_V^\pm = k_{AV}^\pm k_M k_R k_{HT}.$$

Перетворимо рівняння (3.21):

$$k_V^\pm s k_{PV} + k_V^\pm k_{IV} + (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s} = 0,$$

і подамо його у векторно-матричній формі:

$$\begin{pmatrix} k_V^\pm s & k_V^\pm \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_{PV} \\ k_{IV} \end{pmatrix} + (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s} = 0. \quad (3.22)$$

Тут обидва коефіцієнта ПІ-регулятора, k_{PV} та k_{IV} , вибрані в якості незалежних параметрів.

Порівнюючи рівняння (3.22) з окремим випадком рівняння (3.3), тобто з рівнянням (3.4), отримаємо

$$\mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} k_{PV} \\ k_{IV} \end{pmatrix}, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{B}^\pm(s) = \begin{pmatrix} k_V^\pm s & k_V^\pm \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C}^\pm(s) = (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s}.$$

Визначимо векторний поліном $\mathbf{P}^\pm(s)$ та квазіполіном $Q^\pm(s)$, введені в рівняння (3.9):

$$\mathbf{P}^\pm(s) = \begin{pmatrix} k_V^\pm s & k_V^\pm \end{pmatrix}, \quad Q^\pm(s) = (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s}. \quad (3.24)$$

звідки елементи вектору $\mathbf{P}^\pm(s)$ дорівнюють $P_1^\pm(s) = k_V^\pm s$ та $P_2^\pm(s) = k_V^\pm$.

Підставимо в вирази (3.24) замість змінної s рівняння межі (3.6) та отримаємо

$$\mathbf{P}^\pm(\delta, \omega) = \begin{pmatrix} k_V^\pm (\delta(\omega) + j\omega) & k_V^\pm \end{pmatrix}, \quad (3.25)$$

$$Q^\pm(\delta, \omega) = (T_{MT}^\pm (\delta(\omega) + j\omega)^2 + (\delta(\omega) + j\omega)) e^{\tau_r (\delta(\omega) + j\omega)},$$

звідки

$$\operatorname{Re} P_1^\pm(\delta, \omega) = k_V^\pm \delta(\omega), \quad \operatorname{Im} P_1^\pm(\delta, \omega) = k_V^\pm \omega, \quad (3.26)$$

$$\operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, \omega) = k_V^\pm, \quad \operatorname{Im} P_2^\pm(\delta, \omega) = 0. \quad (3.27)$$

Запишемо вираз (3.13) з урахуванням отриманих $\mathbf{P}^\pm(\delta, \omega)$ та $Q^\pm(\delta, \omega)$ і виразу (3.23):

$$\begin{pmatrix} k_{PV} \\ k_{IV} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_V^\pm \delta(\omega) & k_V^\pm \\ k_V^\pm \omega & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \operatorname{Re} Q^\pm(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} Q^\pm(\delta, \omega) \end{pmatrix}.$$

Після знаходження зворотної матриці і перетворень:

$$\begin{pmatrix} k_{PV} \\ k_{IV} \end{pmatrix} = -\frac{1}{k_V^\pm \omega} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \omega & -\delta(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \operatorname{Re} Q^\pm(\delta, \omega) \\ \operatorname{Im} Q^\pm(\delta, \omega) \end{pmatrix}. \quad (3.28)$$

Підставляючи в вираз(3.28) значення ω від 0 до ∞ , можна побудувати криві D-розбиття для різних поєднань значень інтервальних параметрів системи. При $\omega=0$ в площині D-розбиття з'являється особлива пряма, рівняння якої отримується з першого рівняння системи (3.12):

$$\operatorname{Re} P_1^\pm(\delta, 0)k_{PV} + \operatorname{Re} P_2^\pm(\delta, 0)k_{IV} + \operatorname{Re} Q^\pm(\delta, 0) = 0,$$

яке з урахуванням (3.40), (3.41) і (3.39) при $\omega=0$ має наступний вигляд:

$$k_V^\pm \delta(0)k_{PV} + k_V^\pm k_{IV} + (T_{MT}^\pm \delta^2(0) + \delta(0))e^{\tau_r \delta(0)} = 0,$$

Звідки при $\delta(0) \neq 0$

$$k_{PV} = -\frac{1}{\delta(0)}k_{IV} - \frac{1}{k_V^\pm} (T_{MT}^\pm \delta(0) + 1) e^{\tau_r \delta(0)},$$

а при $\delta(0)=0$

$$k_{IV} = 0.$$

Робастне управління поздовжнім положенням. За структурною схемою узагальненої моделі (рис. 19) запишемо передавальну функцію прямого каналу системи управління поздовжнім положенням:

$$W_X^\pm(s) = \frac{k_{AX}^\pm k_M k_R k_{HT}}{s(T_{MT}^\pm s + 1)} e^{-\tau_r s}.$$

Система управління поздовжнім положенням є системою статичного класу, тому введемо в прямий канал передачі П-регулятор з передавальною

функцією $W_{PX}(s) = k_{PX}$, в результаті чого передавальна функція прямого каналу стане дорівнювати

$$W_X^\pm(s) = \frac{k_{PX} k_{AX}^\pm k_M k_R k_{HT}}{s(T_{MT}^\pm s + 1)} e^{-\tau_r s}.$$

Отримаємо характеристичне рівняння замкнутої системи з одиничним негативним зворотним зв'язком:

$$k_{PX} k_V^\pm e^{-\tau_r s} + s(T_{MT}^\pm s + 1) = 0, \quad (3.29)$$

Перетворимо рівняння (3.29):

$$k_{PX} k_V^\pm e^{-\tau_r s} + s(T_{MT}^\pm s + 1) = 0, \quad (3.30)$$

Тут коефіцієнт П-регулятора k_{PX} обраний в якості незалежного параметра.

Зіставляючи рівняння (3.30) з окремим випадком рівняння (3.3), тобто з рівнянням (3.4), отримаємо:

$$\begin{aligned} K_2 = k_{21} = k_{PX}, \\ B^\pm(s) = k_V^\pm, C^\pm(s) = (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Запишемо поліном $P^\pm(s)$ та квазіполіном $Q^\pm(s)$, введені в виразі (3.23):

$$P^\pm(s) = k_V^\pm, Q^\pm(s) = (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s}. \quad (3.32)$$

Звідки елементи вектору $P^\pm(s)$ дорівнюють $P_1^\pm(s) = k_V^\pm s$ та $P_2^\pm(s) = k_V^\pm$.

Підставимо в вирази (3.32) замість змінної s рівняння межі (3.6), отримаємо

$$\begin{aligned} P^\pm(\delta, \omega) = P_1(\delta, \omega) = k_V^\pm, \\ Q^\pm(\delta, \omega) = (T_{MT}^\pm (\delta(\omega) + j\omega)^2 + (\delta(\omega) + j\omega)) e^{\tau_r(\delta(\omega) + j\omega)}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Запишемо вираз (3.13) з урахуванням отриманих значень та виразу (3.31):

$$P^\pm(s) = k_V^\pm, Q^\pm(s) = (T_{MT}^\pm s^2 + s) e^{\tau_r s}. \quad (3.34)$$

За отриманим виразом (3.34) будується крива D-розбиття в площині $\text{Re } k_{PX}, \text{Im } k_{PX}$.

3.4. Дослідження динаміки робастної системи управління боковим відхиленням з синтезованим регулятором

Отримаємо розташування коренів характеристичного рівняння (3.15) при знайдених коефіцієнтах ПД-регулятора, і переконаємося, що всі вони розташовані лівіше межі (3.20). Оскільки аналітично значення коренів системи із запізненням отримати важко, скористаємося чисельним поданням ланки із запізненням у вигляді ряду Паде. На рис. 3.4 розташування коренів визначено при використанні ряду Паде четвертого порядку.

Переконаємося в робастній модальності скоригованої системи, використовуючи розроблений достатній частотний критерій аналізу.

За отриманим характеристичним рівнянням (3.15) системи керування бічним відхиленням з ПД-регулятором у каналі керування складемо характеристичний інтервальний квазіполіном наступного виду:

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

Зрозуміло, що порядок отриманого характеристичного квазіполінома $n = 4$. Після введення ПД-регулятора зміняться коефіцієнти поліномів $B_k(s)$:

$$b_{00} = 0, b_{01} = 0, b_{02} = 0, b_{03} = 1, b_{10} = k_D k_{ID}, b_{11} = k_D k_{PD}, b_{12} = k_D k_{DD},$$

побудуємо годографи $Z_e(\delta, \omega)$ та $Z(\delta, \omega)$ (рис. 3.5).

Як видно з рис. 3.5, після введення ПІД-регулятора з розрахованими за методом D-розбиття коефіцієнтами, годограф $Z_e(\delta, \omega)$ проходить квадранти послідовно, не перетинаючи γ -окружність, а годограф $Z(\delta, \omega)$ при $\omega \rightarrow \infty$ прагне до кута $\frac{n\pi}{2}$, де $n=4$, що відповідає порядку системи. Відповідно до запропонованого критерію система має робастну модальність.

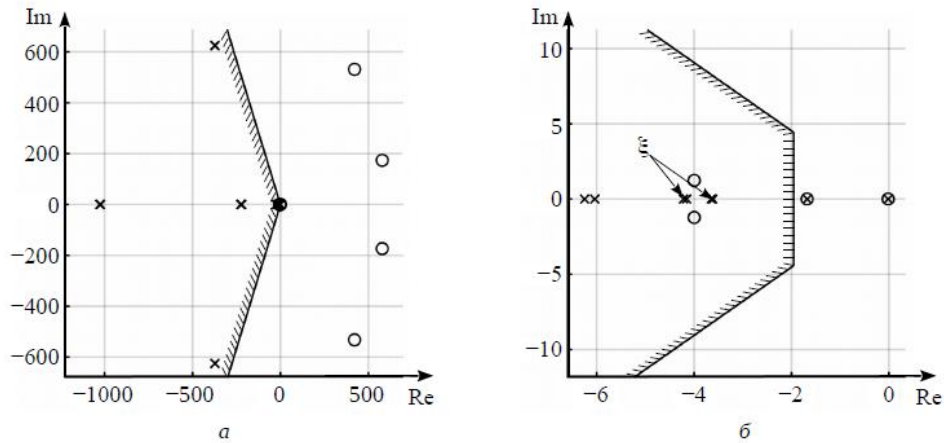


Рис. 3.4. Розташування коренів скоригованої системи:

а - загальний вигляд; б - збільшений вид поблизу заданого кореня

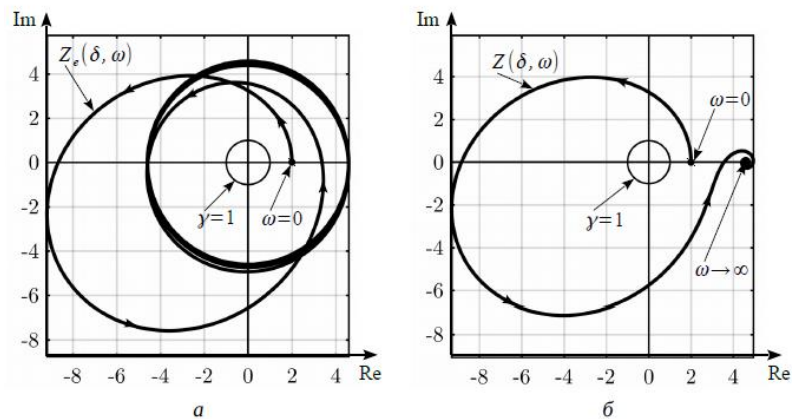


Рис. 3.5. Годографи робастної системи керування бічним відхиленням з ПІД-регулятором: а - годограф $Z_e(\delta, \omega)$, б - годограф $Z(\delta, \omega)$

Робастну модальність також підтверджують графіки перехідних

процесів, побудованих для системи управління боковим відхиленням з ПД-регулятором в прямому каналі і чотирьох поєднань інтервальних параметрів (рис. 3.6).

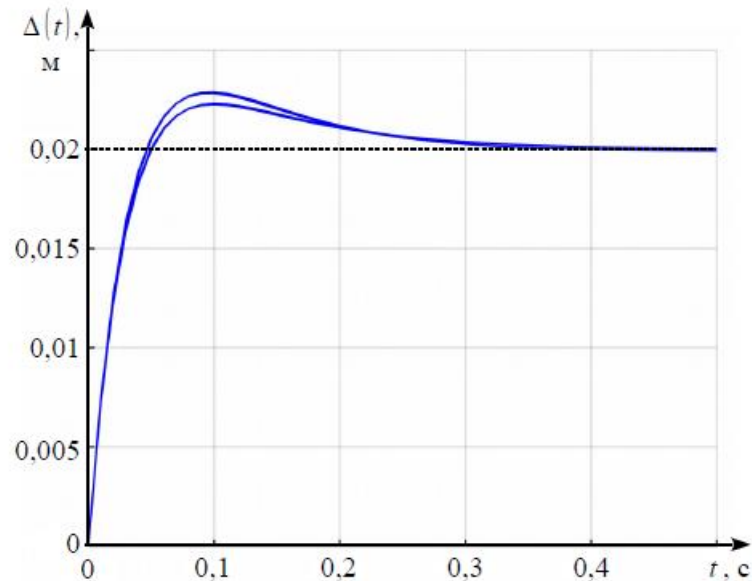


Рис. 3.6. Діапазон перехідних характеристик системи управління боковим відхиленням на одиничну ступінчасту функцію при всіх можливих поєднаннях граничних значень інтервальних параметрів

Аналізуючи графіки перехідних процесів можна зробити висновок, що час регулювання і перерегулювання системи не перевищують заданих для всіх можливих поєднань значень інтервальних параметрів.

Висновки до розділу 3

1. Удосконалено модифікований метод синтезу лінійних регуляторів для лінійних систем з інтервальними параметрами, заснований на побудові областей розширеного D-розбиття в просторі незалежних коефіцієнтів регулятора, що відрізняється можливістю застосування до синтезу систем із запізненням.

2. На основі розширеного D-розбиття здійснено параметричний синтез ПД-регулятора для робастного управління боковим відхиленням

мобільного транспортного засобу від заданої траси.

3. Для статичної системи управління поздовжньою швидкістю і астатичної системи управління поздовжнім положенням для забезпечення робастного управління обрані ПІ - і ПІ-регулятор відповідно. Для зазначених систем управління отримані рівняння кривих D-розбиття і особливих ліній, що дозволяють визначати параметри регуляторів, при яких забезпечується робастна модальність систем.

4. Проведений аналіз динаміки системи управління боковим рухом без корекції та з ПІД-регулятором, що має розраховані за методом розширеного D-розбиття коефіцієнти. Достовірність результатів дослідження за запропонованим частотним методом аналізу інтервальних систем із запізненням підтверджується аналізом побудованих графіків реакції системи управління боковим відгалуженням на одиничну ступінчасту функцію при всіх можливих поєднаннях граничних значень інтервальних параметрів.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИРОБІВ МОБІЛЬНИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ

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

На першому етапі побудови комп'ютерної моделі руху транспортного засобу щодо заданої траси вирішуються два завдання: перше - відображення траси, заданої у вигляді відхилень, у відповідну криву координатної площини XY ; друга - розрахунок положення транспортного засобу в площині XY щодо точки на траєкторії з урахуванням бічного відхилення від неї.

На підставі отриманого раніше математичного опису руху транспортного засобу розроблена комп'ютерна модель в програмі Simulink системи MATLAB, представлена на рис. 4.1, яка дозволяє будувати траєкторію руху транспортного засобу в площині XY при заданих значеннях інтервальних параметрів.

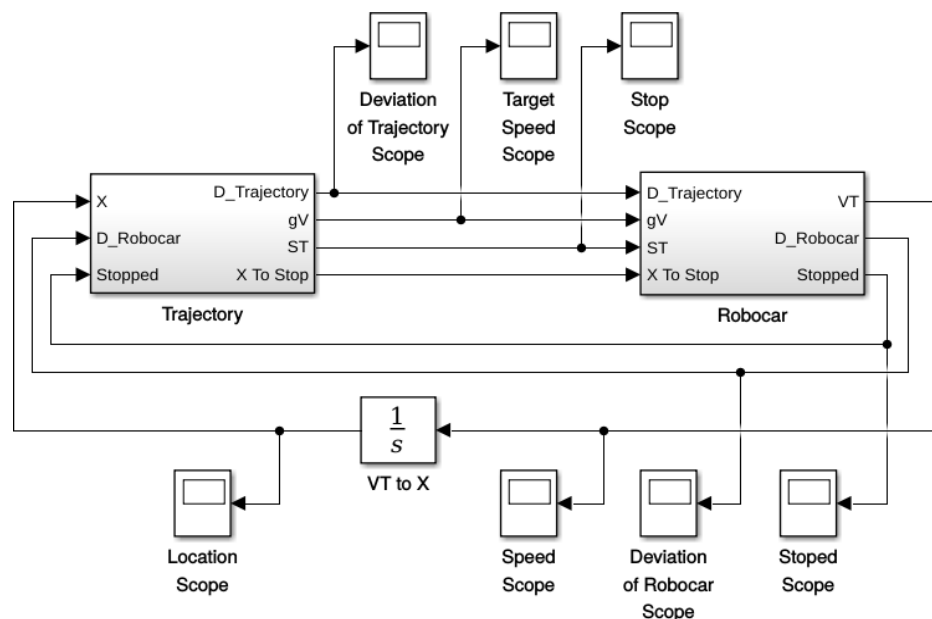


Рис. 4.1. Модель руху транспортного засобу в програмі Simulink

Блок "Robocar" в представленій моделі реалізує структурну схему узагальненої моделі системи управління рухом транспортного засобу (рис 4.2).

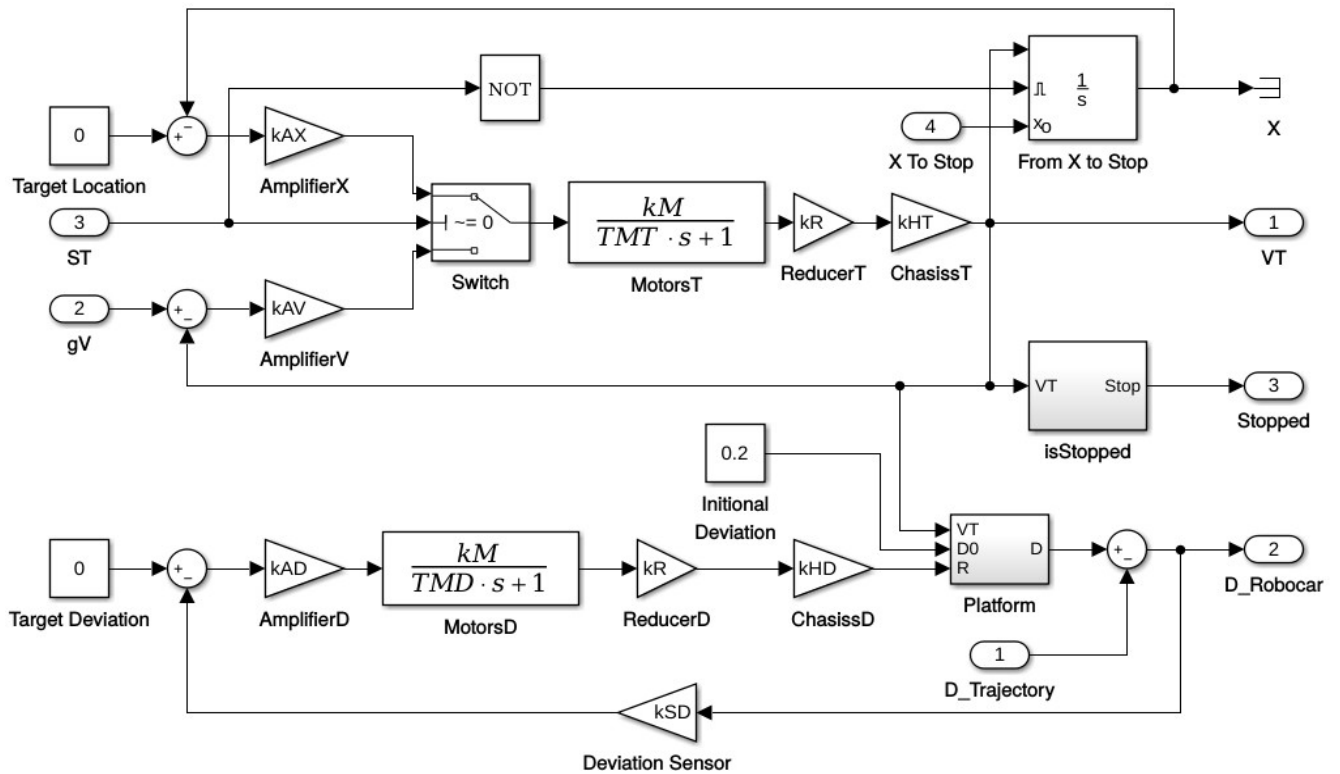


Рис. 4.2. Програмна реалізація блоку " Robocar»

Внутрішня структура блоку "Robocar" показана на рис. 4.2. Вхідними сигналами блоку є відхилення траєкторії від прямолінійного напрямку, задана швидкість поздовжнього руху, значення сигналу \overline{ST} і відстань до точки зупинки в місці навантаження або розвантаження транспортного засобу. Вихідні сигнали блоку: поточна швидкість поздовжнього руху, бічне відхилення транспортного засобу від траси і сигнал, що приймає значення, рівне одиниці, при повній зупинці транспортного засобу і нульове значення в іншому випадку.

Перевірка повної зупинки транспортного засобу реалізована в блоці "IsStopped" (рис 4.3). При повній зупинці вважається, що поздовжні швидкість, прискорення і похідна прискорення дорівнюють нулю з допустимим ступенем точності.

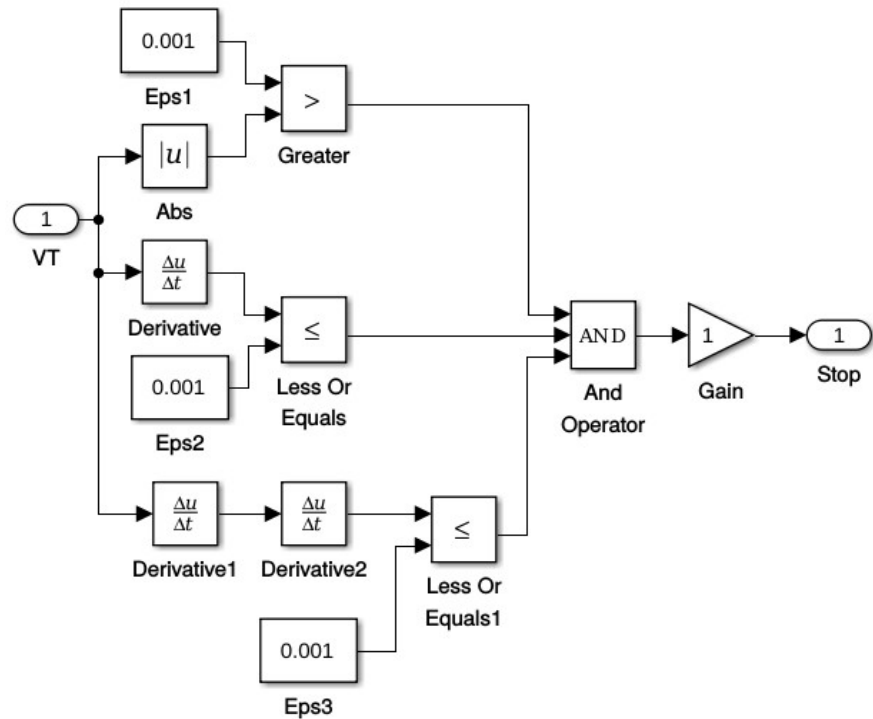


Рис. 4.3 Програмна реалізація блоку "IsStopped»

Вихідні сигнали блоку "Robocar" формують вхідні сигнали блоку "Trajectory" (рис. 4.4), який, в першу чергу, призначений для обчислення точок заданої траси в горизонтальній площині XY і визначення положення транспортного засобу в кожен момент модельного часу відносно заданої траси. Виходи блоку "Trajectory" є входами "Robocar", а результати моделювання у вигляді координат XY заданої траси і змодельованої траєкторії руху зберігаються в робочій області MATLAB для подальшої візуальної побудови.

Блок "SetTrajectory» (рис. 4.5) реалізує всередині блоку «Trajectory»: розрахунок величини відхилення траси від її прямолінійного напрямку в наступний момент модельного часу; вибір завдання для поздовжньої швидкості руху і формування сигналу \overline{ST} в залежності від поточного положення транспортного засобу на трасі; завдання відстані до точки зупинки в разі включення системи позиціонування.

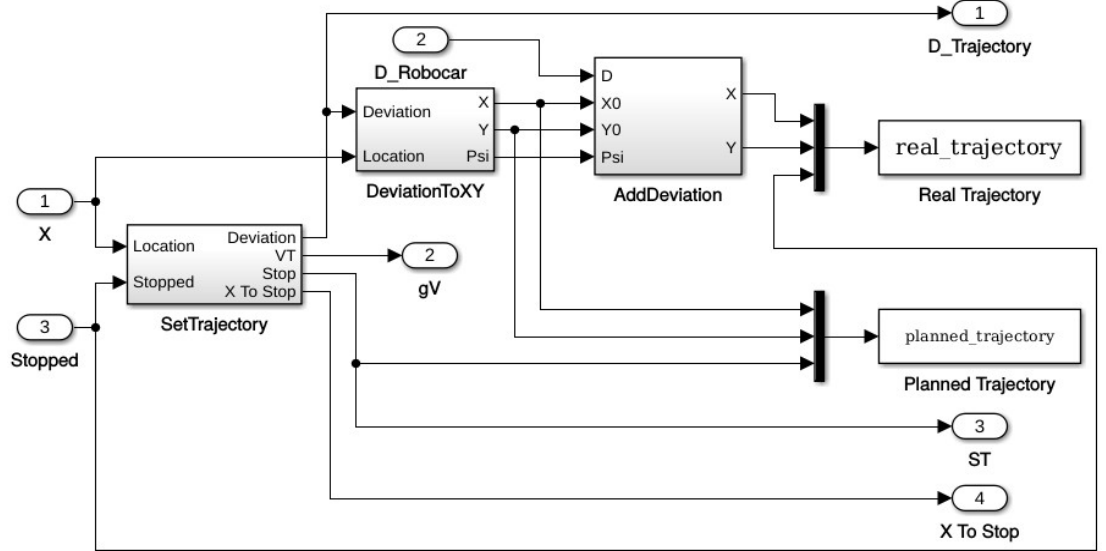


Рис. 4.4. Програмна реалізація блоку «Траjectory»

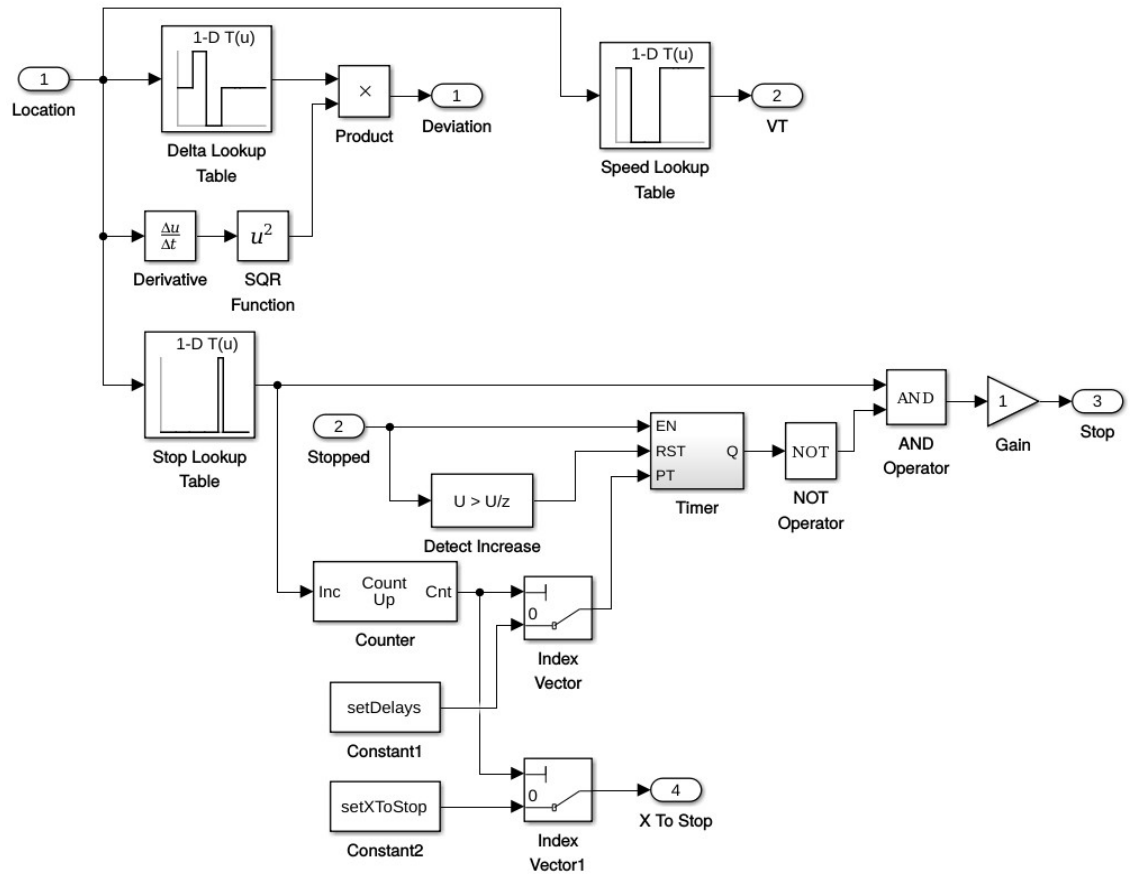


Рис.4.5. Програмна реалізація блоку " SetTrajectory»

Знаючи точку на трасі, де розташовується транспортний засіб, і відхилення траси від прямолінійного напрямку можна розрахувати точку траси в наступний момент модельного часу. Необхідні обчислення виконуються в блоці "DeviationToXY» (рис. 4.6).

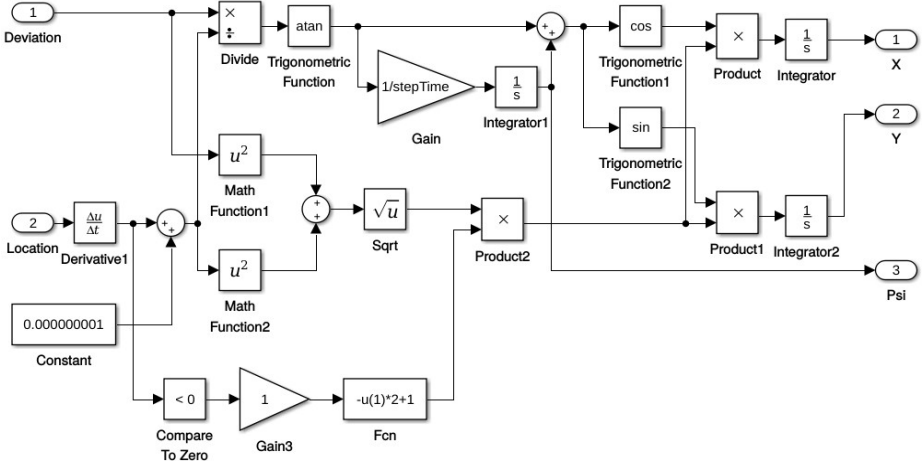


Рис. 4.6. Програмна реалізація блоку «DeviationToXY»

До отриманих за допомогою блоку «DeviationToXY» (рис. 4.6) координатам точки траси в наступний момент модельного часу з урахуванням кута напрямку траси додається бічне відхилення транспортного засобу від траси, в результаті чого на виході блоку «AddDeviation» (рис. 4.7) виходять координати транспортного засобу в горизонтальній площині XY .

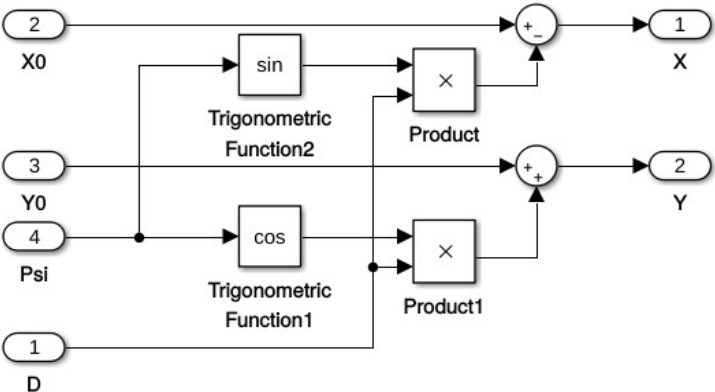


Рис. 4.7. Програмна реалізація блоку «AddDeviation»

Приклад результату моделювання руху транспортного засобу представлений на рис. 4.8. Задана траєкторія руху складається з двох ділянок: прямолінійної ділянки протяжністю 2 м і ділянки повороту ліворуч. Автоматично керований рух змодельований з урахуванням наявності початкового бічного відхилення.

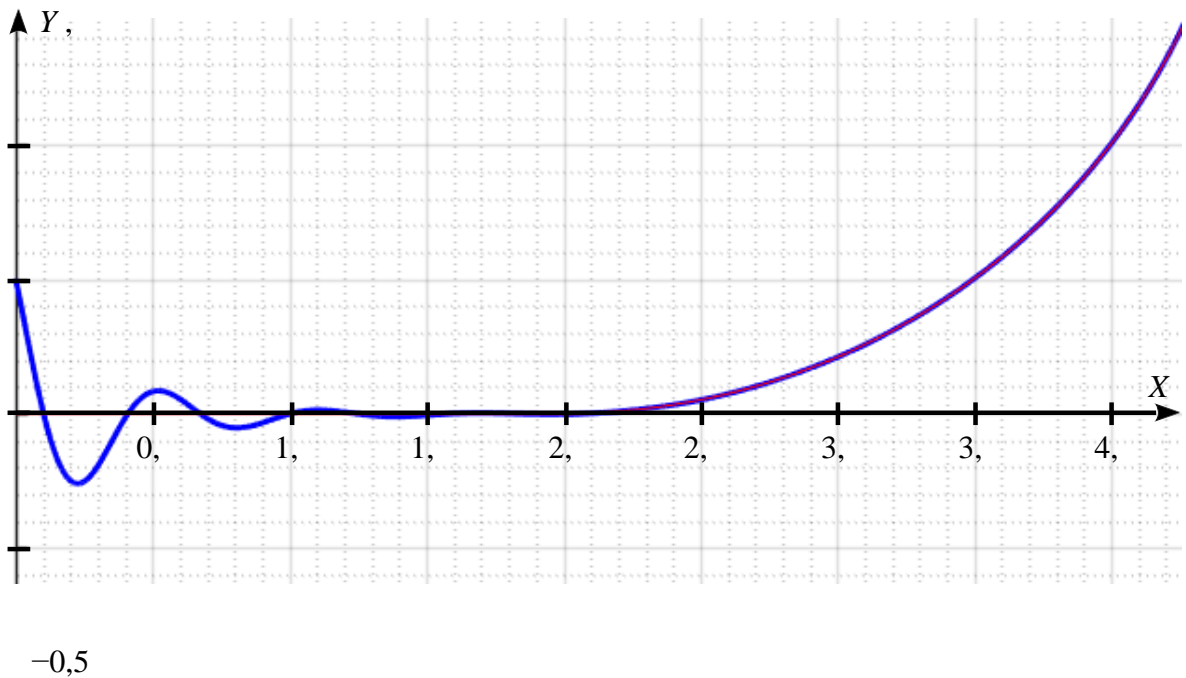


Рис. 4.8. Результат моделювання руху транспортного засобу по складній траєкторії

Крім траєкторії руху в площині XY комп'ютерна модель дозволяє отримувати для подальшого аналізу часові графіки зміни бічного відхилення, поздовжньої швидкості і поздовжнього переміщення відносно заданої траси.

4.2. Розробка експериментального макета і способу дослідження руху транспортного засобу

Отримана математична модель є зручним засобом аналізу законів управління рухом мобільного транспортного засобу. Однак прийняті допущення при побудові математичної моделі знижують ступінь її

адекватності, що вимагає вдатися до фізичного моделювання та експериментального дослідження динаміки системи управління, результати якого використовуються для порівняння з результатами математичного моделювання.

Фізичне моделювання використовується як безпосередньо в ході реальної перевірки алгоритмів організації руху мобільних транспортних засобів, а також для отримання експериментальних даних про окремі параметри елементів для побудови адекватних математичних моделей.

У зв'язку з недоліком, притаманними математичним моделям, який полягає в меншій адекватності моделі через неможливість найбільш повного урахування всіх особливостей реального об'єкта, і недоліком фізичного моделювання, що визначається необхідністю наявності фізичного об'єкта-моделі транспортного засобу, а також спеціальних автодромів, що мають дорожнє покриття різного типу і стану. Це вимагає додаткових матеріальних витрат, тому було застосовано гібридний підхід до моделювання мобільного транспортного засобу, що поєднує в собі переваги математичного і фізичного моделювання [47, 68, 69].

Фізична складова гібридної моделі, тобто експериментальний макет, представлений у вигляді стенду (рис. 4.9) [37, 38, 54], який складається з платформи 1, що має дві опори у вигляді похилих стійок 2, з'єднаних нерухомими нижніми кінцями з рамою 3, а верхніми - з платформою 1. Платформа 1 має ще дві опори, розташовані за ромбовидною схемою по відношенню до похилих стійок 2. Ці дві опори виконані у вигляді осей 4 двох приводних коліс 5 мобільного робота, які спираються на кругові платформи 6, закріплені в своїх центрах на вертикальних осях 7. Останні встановлені своїми нижніми кінцями в опорних підшипниках 8, нерухомо з'єднаних з рамою 3. Під кожною круговою платформою 6 нанесені по колу на її нижній площині світловідбивальні смужки. На рамі під платформами встановлені вертикальні стійки, на яких закріплені датчики кутової швидкості 9 кругових платформ з виходами, зв'язаними через пристрій вводу-виводу 10 із входом бортового контролера 11, виходи якого з'єднані також через пристрій введення-

виведення 10 і пристрій спряження 12 з обмотками якорів двигунів постійного струму 13.

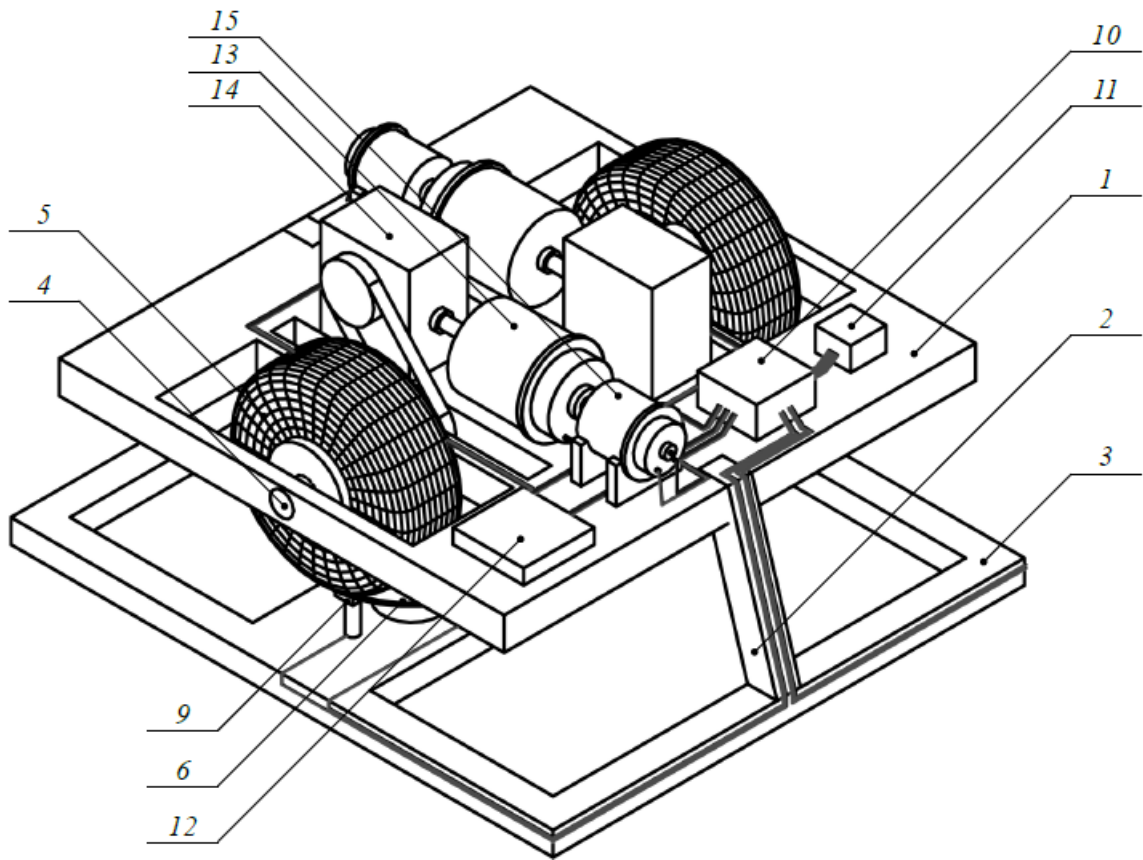


Рис. 4.9 Конструкція лабораторного стенду для визначення характеристик системи управління рухом транспортного засобу

Вали двигунів через редуктори 14 з'єднані з приводними колесами 5 і одночасно жорстко зв'язані з валами тахогенераторів 15 постійного струму, виходи яких, як і виходи тензодатчиків 17, встановлених під опорними підшипниками 8 вертикальних осей 16, з'єднаних з центрами кругових платформ за схемою гвинт-гайка з контргайкою (рис. 4.10), зв'язані через пристрій вводу-виводу 10 з входами бортового контролера 11. Бортовий контролер 11 з'єднаний з ПЕОМ верхнього рівня 18, підключеної до комп'ютерної мережі. Всі електричні та електронні елементи бортової системи управління з'єднані з блоком живлення.

Стенд працює за схемою, наведеною на рис. 4.11. Платформа 1, має чотири опори у вигляді двох похилих стійок 2, з'єднаних нерухомо нижніми

кінцями з рамою 3, а верхніми - з платформою 1, і двох осей 4, розташованих о ромбовидної схемою по відношенню до похилих стоек 2.

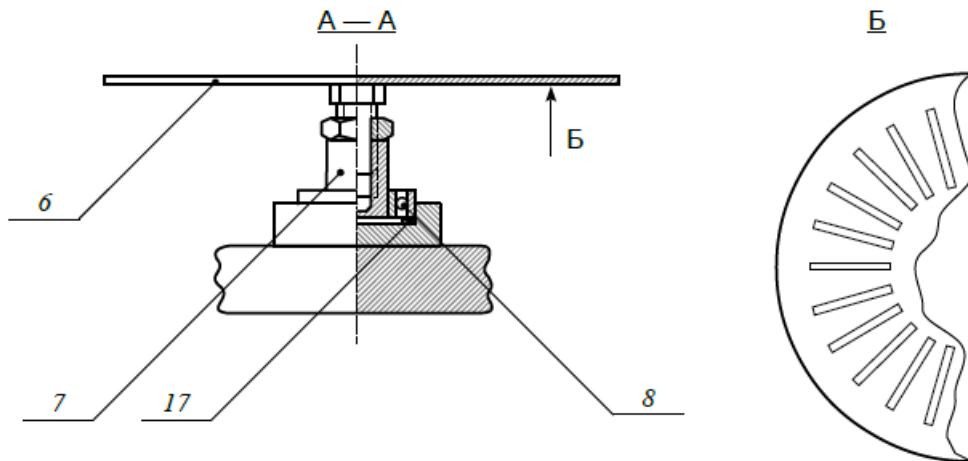


Рис. 4.10 . Установка тензодатчиків під опорними підшипниками вертикальних осей, з'єднаних з центрами кругових платформ за схемою гвинт-гайка з контргайкою

Бортовий контролер 11, за допомогою пристрою вводу-виводу 10 через пристрій спряження 12 здійснює управління напругою кожної якірної обмотки, від якого залежить швидкість обертання відповідного двигуна постійного струму 13. Обертання кожного з двигунів постійного струму 13 за допомогою механічних з'єднань валів передається відповідному тахогенератору 15 постійного струму і через редуктор 14 осі відповідного приводного колеса 5, яке спирається на кругову платформу 6 і обертає її.

Датчики швидкості 9 кругових платформ, сприймають відбитий світловий потік від смужок. При цьому частота зміни світлового потоку залежить від швидкості обертання платформи 6. Таким чином, сигнал на виході датчика швидкості 9 відповідає швидкості обертання відповідної кругової платформи 6.

З'єднання центрів кругових платформ 6 з опорними підшипниками 8 за схемою гвинт-гайка з контргайкою дозволяє змінювати тиск коліс мобільного робота на опорні кругові платформи 6, що моделює різний тиск приводних коліс 5 на опорну поверхню при зміні маси перевезеного транспортним роботом вантажу. При цьому контргайка забезпечує фіксацію гвинта щодо

гайки-втулки при обертанні кругової платформи 6. Нижній кінець гайки-втулки, обертається разом з гвинтом. Підшипник 8 спирається на тензодатчик 17. Верхня частина гвинта є шестигранником, що забезпечує поворот гвинта шестигранним ключем щодо гайки-втулки і, як наслідок, вертикальне зміщення кругової платформи 6. Залежно від вертикального зміщення кругової платформи 6 змінюється тиск колеса на платформу, а, отже, на гвинт, гайку-втулку, підшипник 8 і, нарешті, на тензодатчик 17. Таким чином, є можливість поворотом гвинта щодо гайки-втулки регулювати навантаження на приводні колеса 5 і вимірювати її за допомогою тензодатчиків 17.

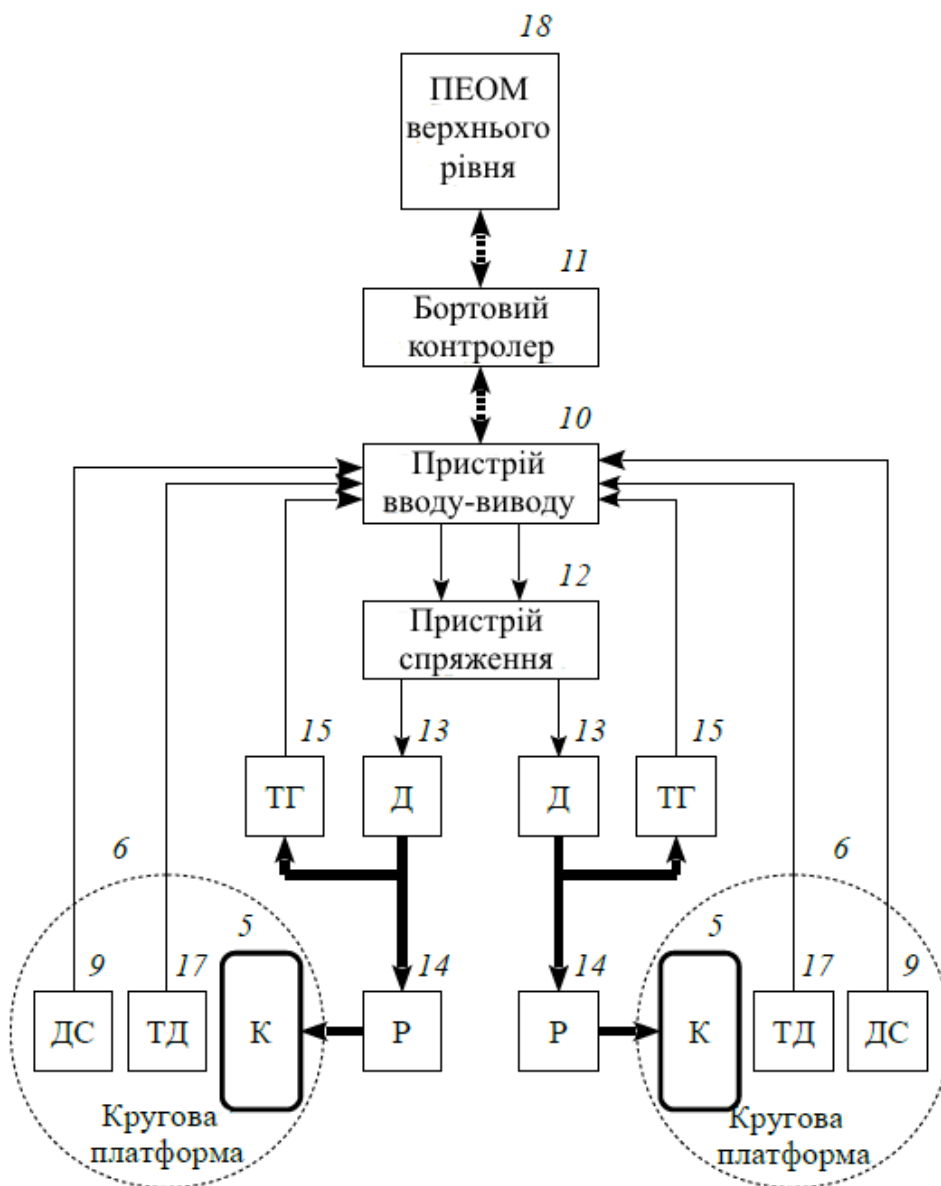


Рис. 4.11. Функціональна схема гібридної моделі транспортного засобу

Сигнали, що формуються датчиками швидкості 9 кругових платформ, тензодатчиками 17 і тахогенераторами 15, які відповідають швидкостям обертання кругових платформ 6, навантаженням на них і швидкостям обертання двигунів постійного струму 13, передаються по лініях зв'язку пристрою вводу-виводу 10, якій передає інформацію від датчиків бортовому контролеру 11.

Графічний інтерфейс програми, запущеної на ПЕОМ верхнього рівня 18, дозволяє задавати траєкторію і закон управління рухом і відображати віртуальну траєкторію, розраховану за швидкістю обертання кругових платформ 6. Також відбувається відображення навантаження мобільного робота, розрахованої за показаннями тензодатчиків 17, і величини прослизання кожного приводного колеса 5, розрахованої у відповідність з алгоритмом обробки інформації за сигналами тахогенератора 15 і датчика швидкості 9, тобто по різниці швидкостей обертання двигуна 13 і кругової платформи 6. Підключення ПЕОМ верхнього рівня 18 до комп'ютерної мережі дозволяє проводити дослідження руху мобільного робота віддалено.

Експериментальний стенд в зборі представлений на рис. 4.12 [4]. Управління двигунами здійснюється за рахунок подачі ШІМ-напруги на якірну обмотку при постійній номінальній напрузі на обмотці збудження. Передача крутного моменту від валів двигунів до коліс здійснюється через черв'ячні універсальні одноступеневі редуктори. Зазначені редуктори є понижувальними і призначені для збільшення крутного моменту за рахунок зменшення частоти обертання вихідного валу. Пристрій спряження, призначений для узгодження контролера з силовою частиною управління двигунами постійного струму, що являє собою розроблену друковану плату з розташованими на ній польовими транзисторами VT_1 , VT_2 з ізольованим затвором, відкриття/закриття яких забезпечує подачу керуючих ШІМ-імпульсів на електродвигуни. Принципова схема пристрою спряження представлена на рис. 4.13.



Рис. 4. 12. Загальний вигляд експериментального стану

Напівпровідникові діоди VD_1 , VD_2 застосовані в схемі, виконують роль шунта, організовуючи електричний ланцюг для протікання струмів, породжених ЕРС самоіндукції. Діодні мости VD_3 , VD_4 призначені для випрямлення напруги 110 В, що виробляється трансформаторами, підключеними до мережі змінної напруги 220 В.

В якості контролера, що реалізує програму роботи бортового пристрою управління, використаний ПЛК Siemens Simatic S7-200 CPU 224, який має вбудований пристрій вводу - виводу з 14 цифровими входами і 10 цифровими виходами на 24 В постійного струму. Ці виходи з'єднуються з затворами відповідних польових транзисторів пристрою спряження, а 2 входи підключаються до датчиків, що генерують імпульси з частотою, пропорційною швидкості обертання коліс (рис. 4.14). Також цей контролер має можливість обміну даними по дротовому інтерфейсу з персональною ЕОМ верхнього рівня.

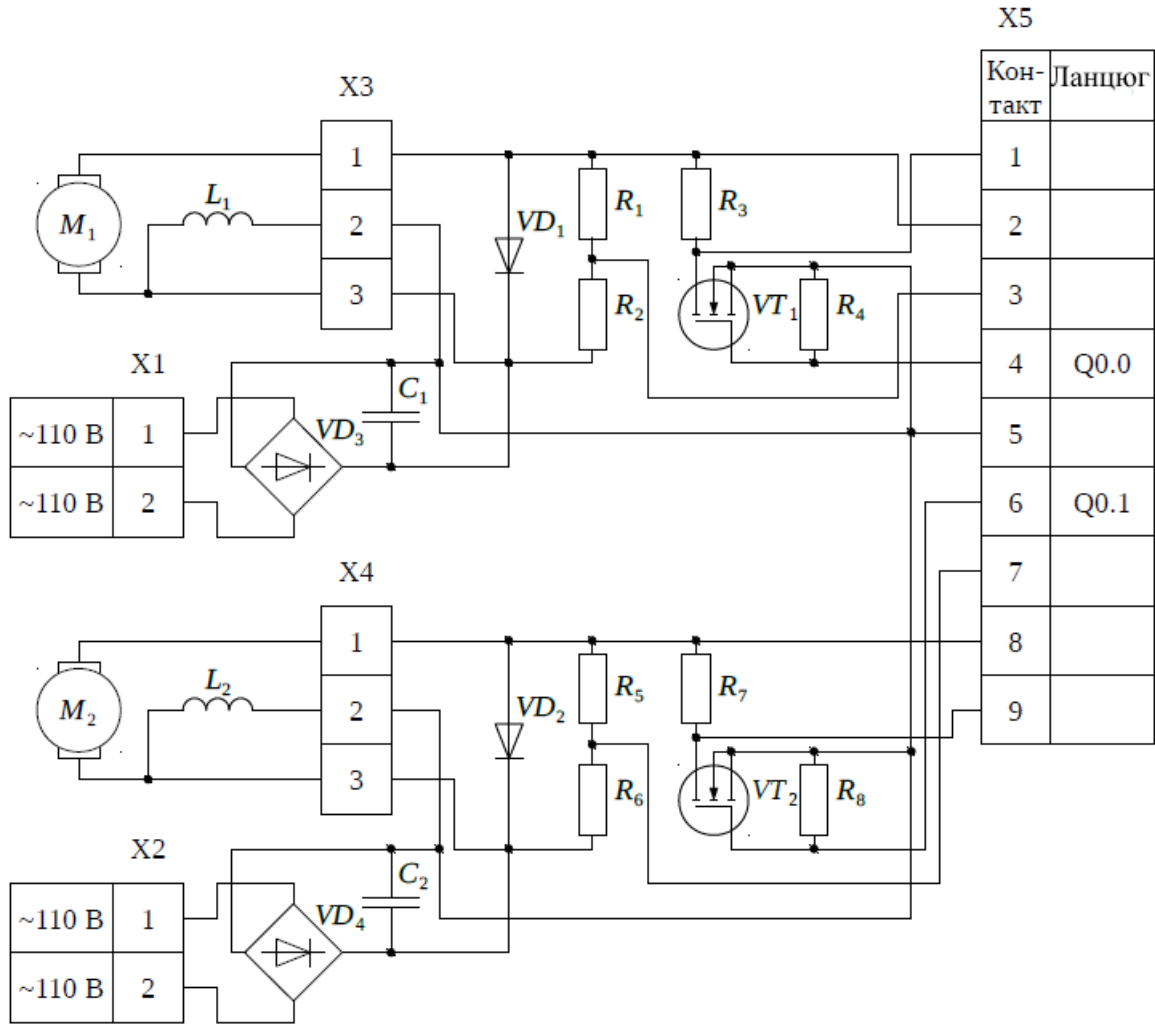


Рис. 4.13. Принципова схема пристрою сполучення контролера і двигунів

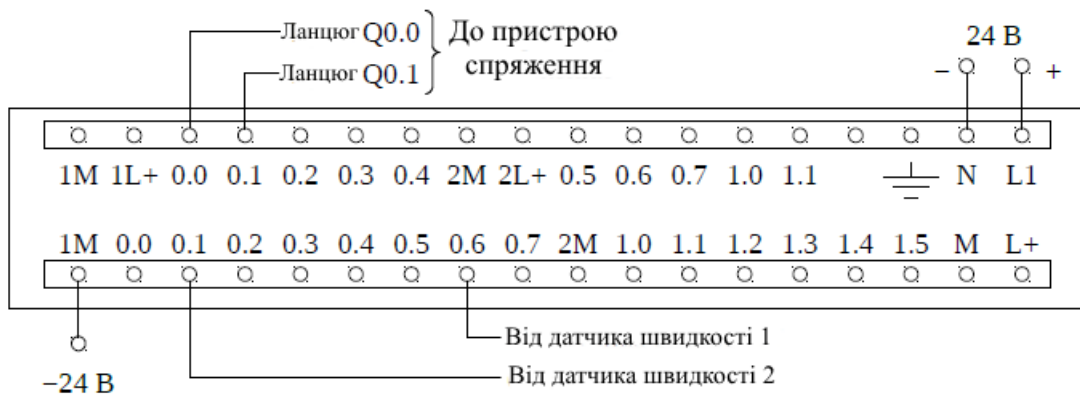


Рис. 4.14. З'єднання Siemens Simatic S7 - 200 CPU 224 з датчиками і двигунами

Контролер управляє подачею імпульсів на двигуни коліс шляхом зміни сигналів на виходах Q0.0 і Q0.1. Датчики кутової швидкості коліс підключені до дискретних входів I 0.1 і I 0.6, які налаштовані на апаратні програмно-незалежні швидкісні лічильники.

Завдяки використанню зазначеного контролера існує можливість отримання інформацію про поточні швидкості обертання кругових платформ і передачі керуючих сигналів на колеса від ЕОМ верхнього рівня, яка з'єднана з ПЛК за допомогою інтерфейсу RS-232. При цьому, якщо ЕОМ підключена до комп'ютерної мережі, з'являється можливість віддаленого управління експериментальним стендом [53].

4.3. Організація напівнатурного моделювання динаміки системи управління мобільним транспортним засобом

Виходячи з розглянутого математичного опису мобільного робота і конструкції експериментального стенду, розглянемо можливість змішаного моделювання руху транспортного засобу з використанням програмного забезпечення, що реалізує математичний опис його динаміки [28]. При цьому елементи автоматизованої системи управління, такі як підсилювальний пристрій, двигуни, редуктори фізично реалізуються на експериментальному стенді. З іншого боку, формування величини бічного відхилення від траси і помилку неузгодженості необхідно виробляти програмно на основі математичних залежностей, що враховують кутові швидкості обертання кругових платформ, на які спираються колеса транспортного засобу. Такий поділ моделі на фізичну і математичну складові породжує наступні потоки даних між стендом, ЕОМ-сервером верхнього рівня і ЕОМ-клієнтами верхнього рівня (рис. 4.15).

Формування потоків даних експериментального стенду (рис. 4.16) відбувається відповідно до функціональної схеми (рис. 4.1), з урахуванням того, що бічне відхилення формується на підставі початкового положення транспортного робота і швидкостей обертання коліс, які отримуються від

датчиків швидкостей обертання кругових платформ, причому бортовий контролер виконує, в тому числі, функції по вводу-виводу сигналів.

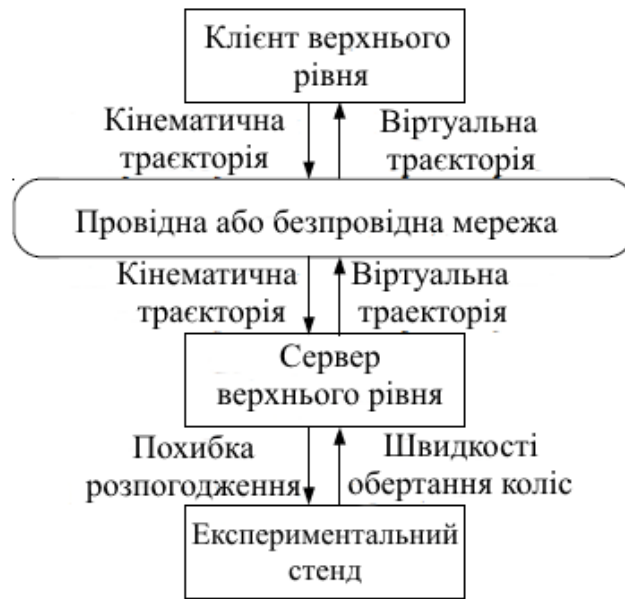


Рис. 4.15. Основні потоки даних між підсистемами гібридної моделі

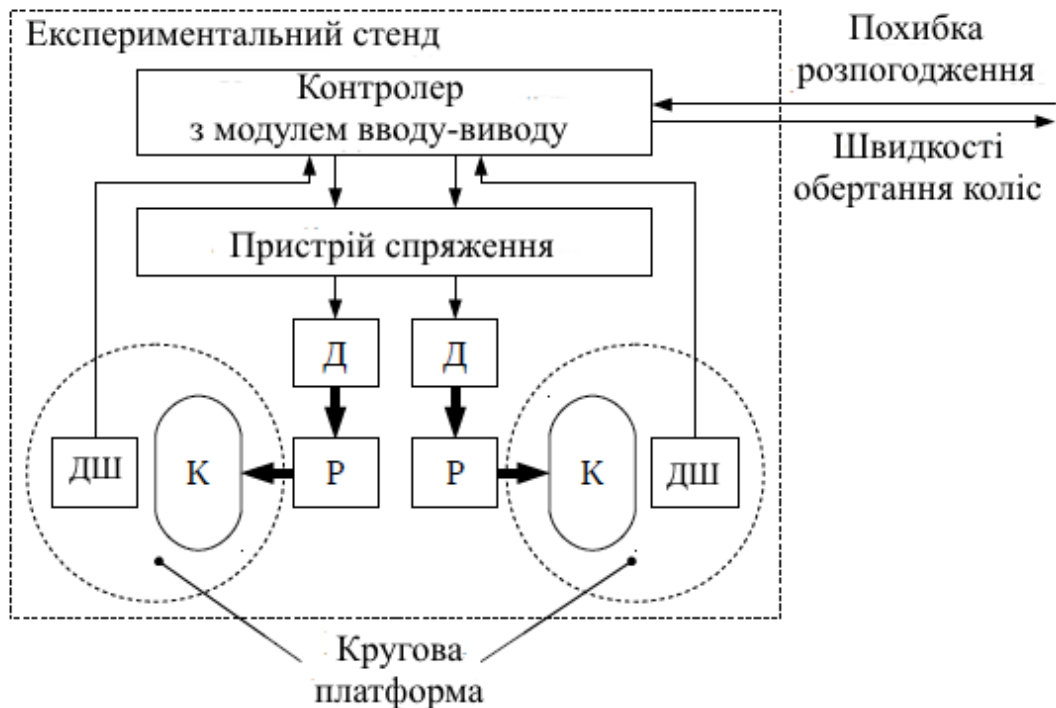


Рис. 4.16. Формування потоків даних експериментальним стендом

Математичний опис може бути реалізовано у вигляді скрипту, модуля

Код програми, що реалізує графічний інтерфейс користувача, може бути запущений на стороні сервера та / або на стороні клієнта (рис 4.18). Це дає можливість завдання траєкторії, спільного відображення кінематичної і віртуальної траєкторій, а також параметрів руху як на ЕОМ, безпосередньо пов'язаної зі стендом, так і на віддаленій ЕОМ.



Рис. 4.18. Формування потоків даних ЕОМ-клієнтом верхнього рівня

З рис. 4.17 і 4.18 видно, що для узгодження обміну даними між обчислювальними процесами, що протікають у гібридній моделі, необхідне використання зв'язуючого ПЗ (рис. 4.19).

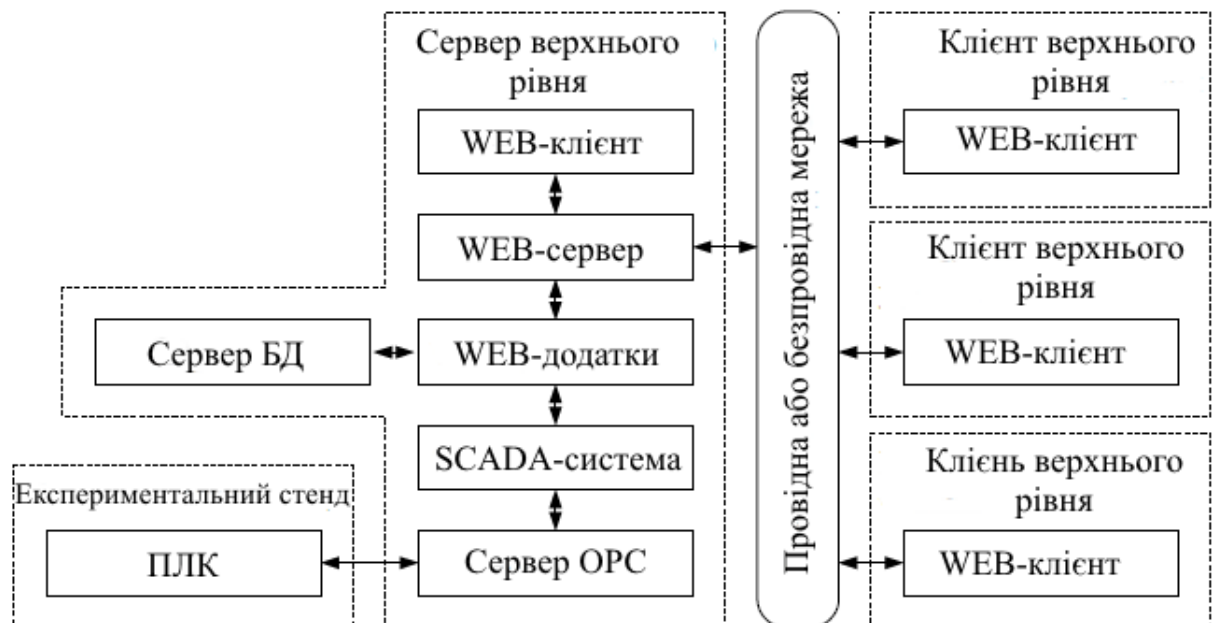


Рис. 4.19. Взаємодія зв'язуючого ПО

Зв'язок ЕОМ з контролером здійснює програма сервер OPC. SCADA-система є проміжною ланкою передачі даних між сервером OPC та WEB-

додатком, що реалізує математичну модель транспортного засобу і забезпечує обмін даними з БД.

Віддалений доступ забезпечується WEB-сервером, якій забезпечує передачу даних по протоколу HTTP. WEB-клієнти (браузери) надають графічний інтерфейс для інтерактивної роботи користувача.

4.4. Комп'ютерне проектування системи управління рухом транспортного засобу з використанням ADAMS і MATLAB

Математична модель системи управління була отримана при значних спрощеннях і припущеннях. Для перевірки її адекватності потрібно більш точне уявлення руху транспортного засобу по підлозі складу, яке може бути отримано за допомогою сучасного програмного забезпечення для віртуального моделювання.

Для цього в середовищі MSC ADAMS створена віртуальна модель чотириколісного транспортного засобу з ромбовидною схемою шасі (рис. 4.20). Для проведення подальших досліджень у програмі Simulink пакету прикладних програм Matlab розроблена система керування рухом віртуальної моделі, призначення якої полягає у визначенні стану та формуванні керуючих впливів для віртуальної моделі. Комп'ютерна модель в Matlab Simulink складається з двох блоків: блоку управління «ControlBlock» і блоку взаємодії з віртуальною моделлю «VehicleWithSensors» (рис. 4.21).

Реалізація блоку "VehicleWithSensors", що має вхідними сигналами напруги, що подаються на лівий і правий двигун, складається з блоку «AdamsWithMatlabMotors», вихідні сигнали якого, що представляють собою швидкості обертання валів двигунів, формують поздовжню швидкість і координату положення транспортного засобу, які є вихідними величинами блоку «VehicleWithSensors» (рис. 4.22).

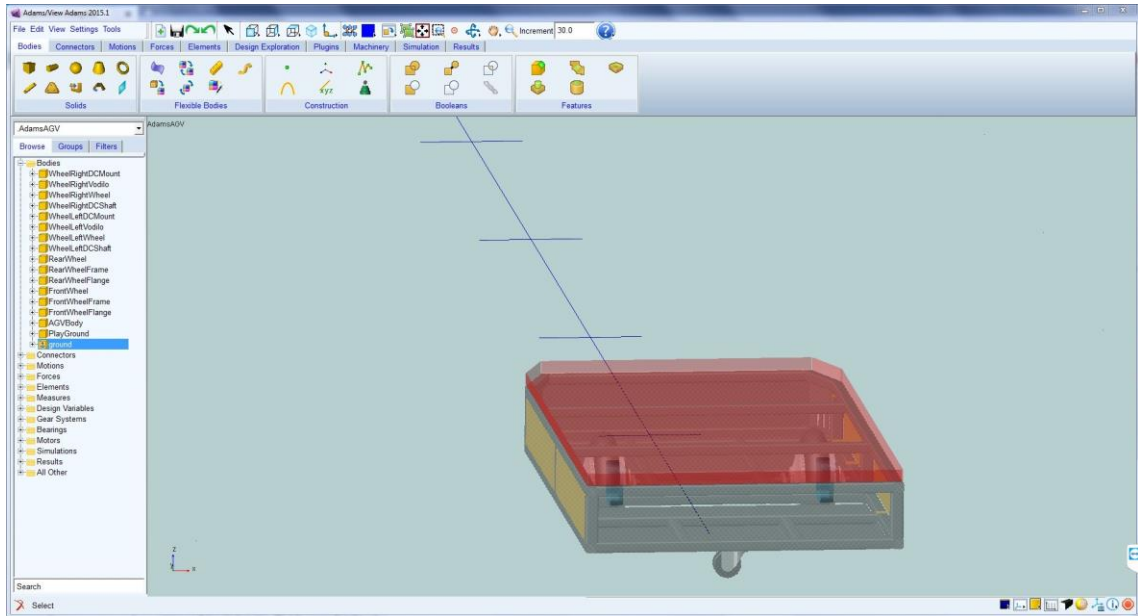


Рис. 4.20. Віртуальна модель транспортного засобу в середовищі MSC ADAMS

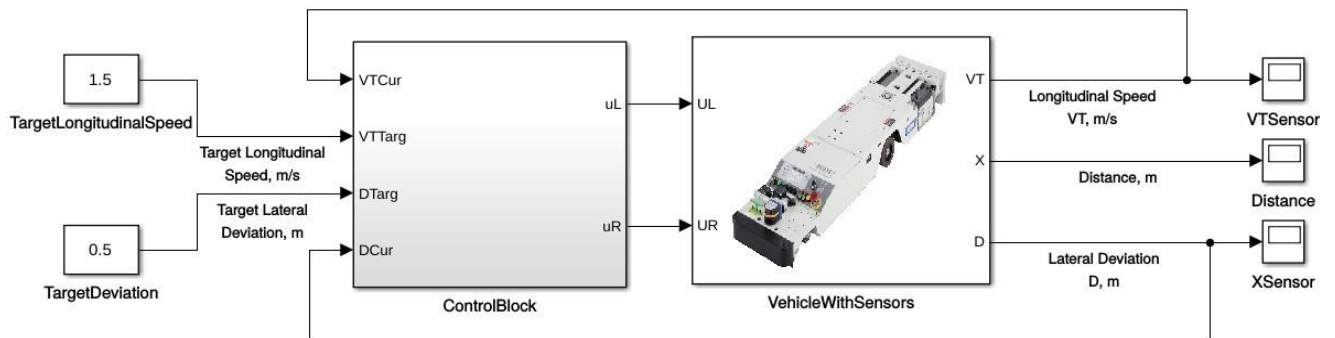


Рис. 4.21. Комп'ютерна модель системи управління рухом транспортного засобу в середовищі MATLAB

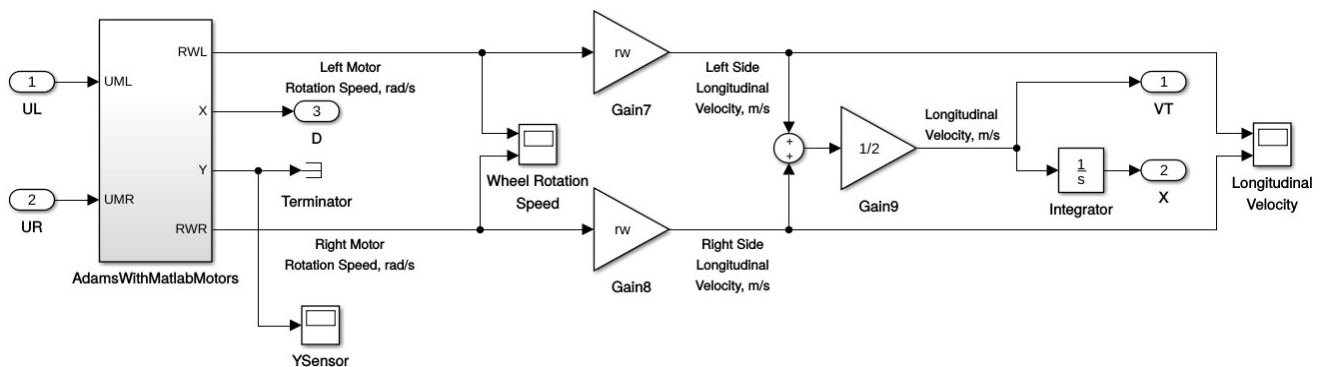


Рис. 4.22. Реалізація блоку «VehicleWithSensors»

Усередині блоку «AdamsWithMatlabMotors» реалізується засобами MATLAB Simulink математична модель двигунів постійного струму, керуюча напруга яких формує момент обертання, що є вхідним впливом (після перерахунку з урахуванням розмірності) для віртуальної моделі транспортного засобу, реалізованої в MSC ADAMS (рис. 4.23).

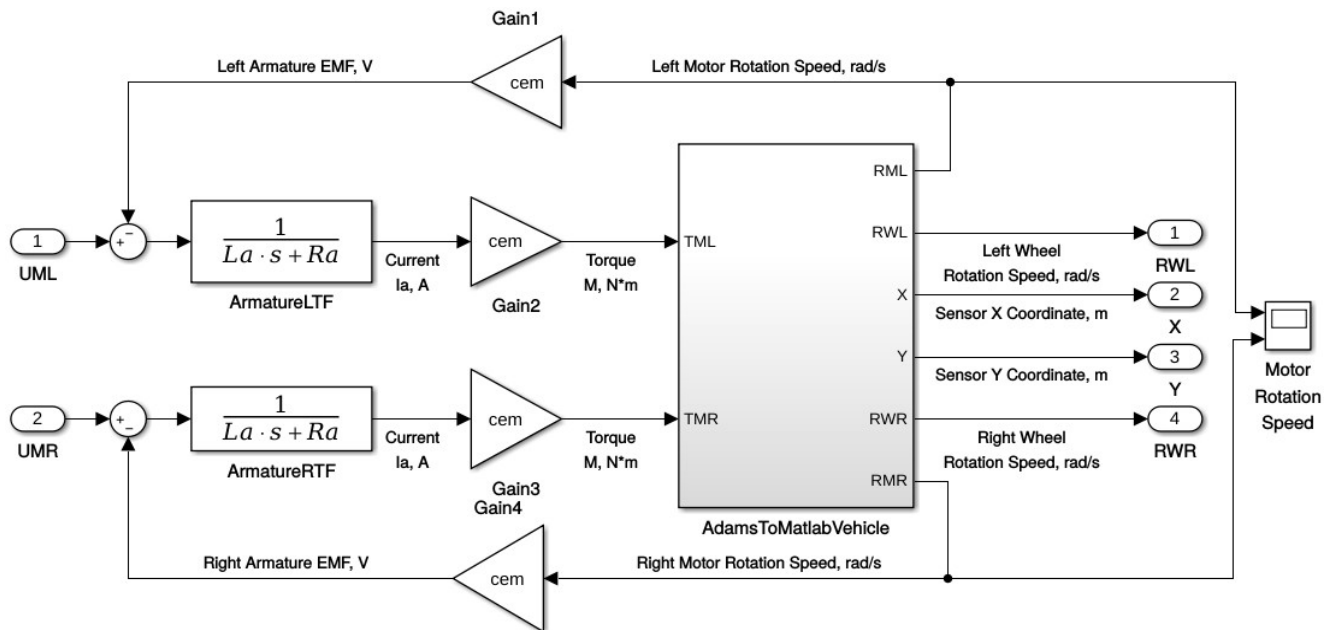


Рис. 4.23. Реалізація блоку " AdamsWithMatlabMotors»

Блок управління «ControlBlock» комп'ютерної моделі містить блоки управління боковими відхиленнями «DControl» та «VTControl», всередині яких можуть бути реалізовані будь-які необхідні закони управління бічним відхиленням і поздовжньою швидкістю транспортного засобу (рис. 4.24).

Скориговані сигнали управління бічним відхиленням і поздовжньою швидкістю подаються на входи блоку «MotorsControl», який перетворює їх в керуючі напруги лівого і правого електродвигунів (рис.4.25).

Приклад результату віртуального моделювання руху транспортного засобу, що має нульову початкову швидкість і початкове бічне відхилення від заданої траси 0,2 м, по прямолінійній ділянці траси при заданій поздовжній швидкості 0,5 м/с представлений на рис. 4.26. Після 9 м траси відбувається перемикання на управління позиціонуванням з кінцевою точкою зупинки, яка розташовується на відстані 10 м від початку траси.

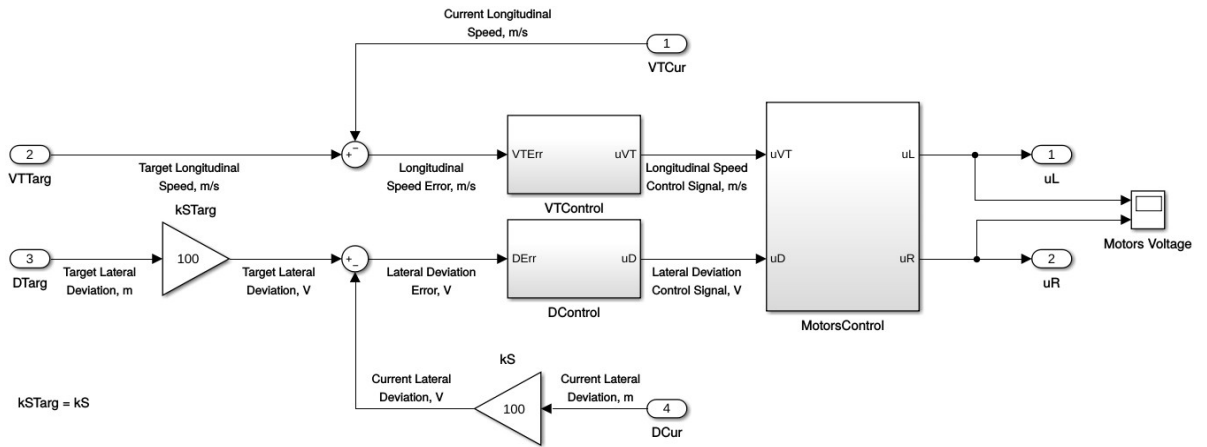


Рис. 4.24. Реалізація блока «ControlBlock»

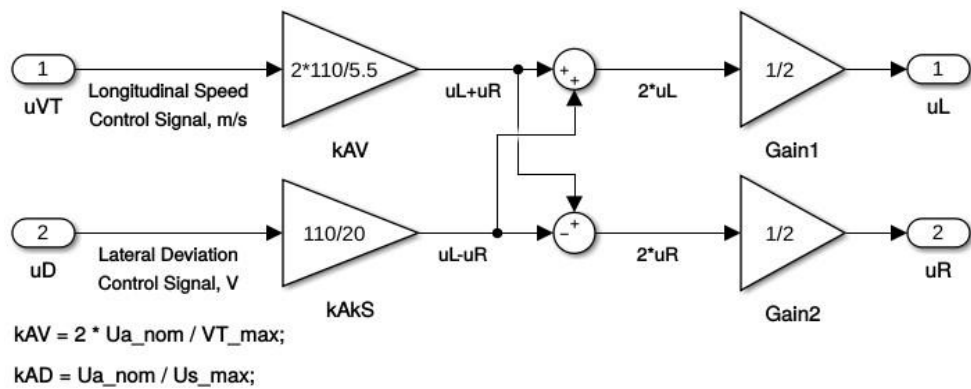


Рис. 4.25. Реалізація блока «MotorsControl»

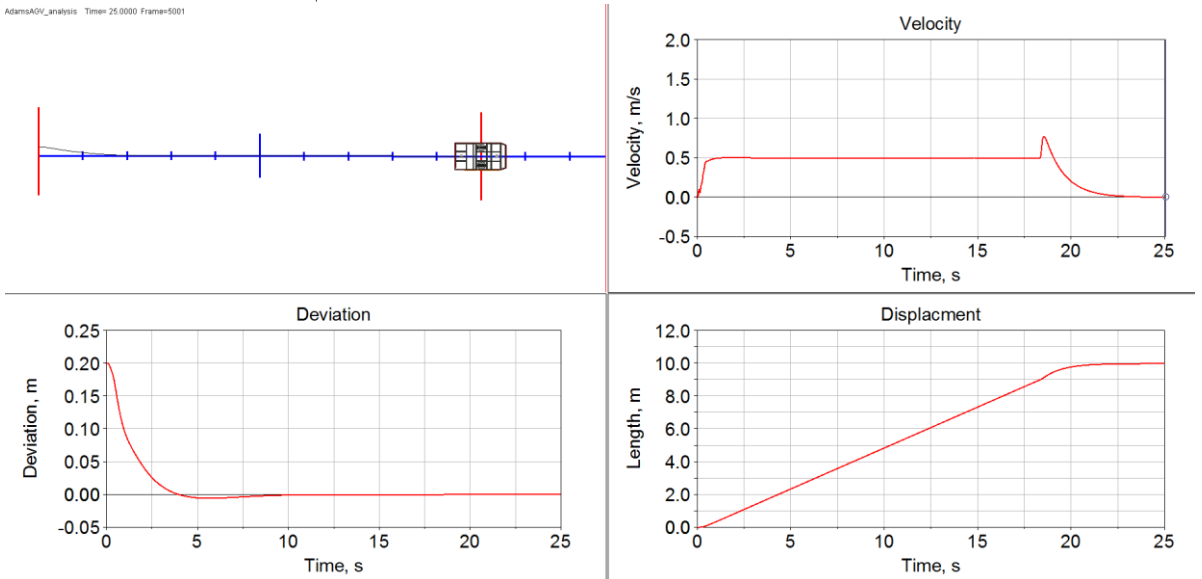


Рис. 4.26. Результат комп'ютерного моделювання, представлений в постпроцесорі ADAMS

Результати віртуального моделювання підтвердили правильність

проведених з використанням математичної моделі параметричного синтезу регуляторів і аналізу інтервальної системи управління рухом транспортного засобу з запізненням в каналі управління, оскільки для різних сполучень інтервальних значень параметрів (повної маси і заданої поздовжньої швидкості) при управлінні бічним відхиленням час регулювання не перевищує заданого, при управлінні поздовжньою швидкістю відсутня статична помилка, а при подовжньому позиціонуванні повністю відсутнє перерегулювання.

Розроблена комп'ютерна модель, заснована на використанні віртуального прототипу транспортного засобу в MSC ADAMS, дозволяє спростити моделювання системи управління руху мобільного складського засобу при обліку сил реакцій, що виникають в елементах кінематичної схеми, сил тертя, наявності прослизання ведучих коліс, впливу на рух опорних коліс, перерозподілу навантаження при маневрах.

4.5. Оцінка адекватності математичної моделі транспортного засобу за методом середньоквадратичного відхилення

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі транспортного засобу використовувалися експериментальні дані гібридного напівнатурного і комп'ютерного віртуального моделювання управління рухом транспортного засобу, що має нульову швидкість і бічне відхилення, що дорівнює 0,2 м, в початковій точці заданої траси у вигляді прямолінійної ділянки довжиною 10 м з необхідною точкою зупинки в кінці ділянки при перемиканні на управління позиціонуванням за 1 м до точки зупинки. Дані отримані для граничних значень інтервальних параметрів: маси M транспортного засобу (з вантажем $M = M_{\min}$ та без вантажа $M = M_{\max}$) та заданої поздовжньої швидкості руху V_T ($V_{T\min}=0,5$ м/с та $V_{T\max}=1,5$ м/с). Кількісно ступінь адекватності моделі розрахована за відносною середньоквадратичною помилкою σ і найбільшою відносною помилкою σ_{\max} для наступних сигналів

системи управління рухом (Таблиця 4.1): бічного відхилення від заданої траси $\Delta(t)$, поздовжньої швидкості $V_T(t)$ на початку руху при рушанні транспортного засобу і в кінці руху при позиціонуванні в точці зупинки. Для зміни бічного відхилення помилки наведені до початкового відхилення 0,2 м, для зміни поздовжньої швидкості — до заданого значення швидкості, для вимірювання положення - до відстані величиною 1 м від точки початку позиціонування до точки зупинки.

Таблиця 4.1

Результати порівняння математичного та експериментального моделювання

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

Порівняння результатів, отриманих за допомогою математичної моделі і експериментально, показало, що відносне середньоквадратичне відхилення не перевищує $\pm 10\%$, причому після початку руху, коли транспортний засіб функціонує в номінальному режимі, в якому на рух впливають сили тертя кочення, які є суттєво меншими, ніж сили тертя спокою, що мають місце при рушанні транспортного засобу з місця, і в якому наявність прослизання провідних коліс і вплив на рух опорних коліс проявляється у меншій мірі, адекватність значно вище, внаслідок чого відносне середньоквадратичне відхилення не перевищує $\pm 3\%$.

Висновки до розділу 4

1. На підставі розробленої узагальненої математичної моделі в середовищі MATLAB створена комп'ютерна модель системи управління рухом транспортного засобу по заданій трасі, що дозволяє будувати в площині підлоги складського приміщення траєкторію руху транспортного засобу відносно траси, заданої у вигляді ділянок прямолінійного руху і ділянок повороту.

2. Розроблено експериментальний стенд для дослідження динаміки керованих транспортних засобів, що дозволяє проводити гібридне моделювання руху транспортного засобу без необхідності застосування спеціальних площ і автодромів.

3. У середовищах MSC ADAMS та MATLAB створено комп'ютерний віртуальний прототип транспортного засобу і модель системи управління рухом для нього, що дозволило врахувати особливості динаміки мобільного транспортного засобу, які не були враховані для спрощення побудови узагальненої математичної моделі. Порівняння результатів математичного моделювання та моделювання з використанням віртуального прототипу дозволило стверджувати про адекватність удосконаленої математичної моделі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано актуальність підвищення ефективності виробництва за рахунок автоматизації транспортно-складської системи, що є найбільш вузьким місцем у виробництві з точки зору автоматизації, шляхом розробки і застосування автоматизованих систем переміщення виробів мобільними транспортними засобами.

2. Удосконалена математична модель системи управління рухом мобільного транспортного засобу, заснована на взаємопов'язаному управлінні бічним і поздовжнім рухом, що дозволило підвищити точність опису динаміки транспортного засобу за рахунок врахування інтервальності його параметрів і наявності запізнювання в каналі управління.

3. Удосконалений метод синтезу регулятора робастної системи на основі розширеного D-розбиття дозволив створити інженерну методика синтезу закону управління для випадку наявності запізнювання, що забезпечує вибір параметрів, при яких досягаються задані показники робастної модальності.

4. Застосування методів аналізу і параметричного синтезу дозволило отримати позитивні результати з точки зору отриманих динамічних характеристик синтезованої системи для мобільних транспортних засобів, що свідчить про доцільність застосування критерію робастної модальності та інженерної методики синтезу на основі розширеного методу D - розбиття.

5. Створений експериментальний стенд, який є частиною гібридної моделі, призначеної для полунатурного моделювання динаміки мобільного транспортного засобу, і комп'ютерна модель в програмі Simulink пакету MATLAB управління рухом віртуального транспортного засобу, реалізованого в середовищі MSC ADAMS, застосування яких дає можливість проведення експериментів, наближених до реальних умов функціонування та проводити оцінку адекватності математичної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иванов А.А. Основы робототехники. М.: Форум, 2012. – С. 224.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники. – 2-е изд., перераб.и доп. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. Попов Е.П., Письменный Г.В. Основы робототехники – М.: Высш. шк., 1990. – 224 с.
4. Аль-Еззи А. Исследование пусковых режимов колесного мобильного робота / Известия ЮЗГУ. Техника и технологии. - 2011. - № 1. - С. 43—52.
5. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин, В. В. Аполонский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - № 2. - 2016. - С. 21 - 26.
6. Бурдаков С.Ф. Системы управления движением колесных роботов / С.Ф.Бурдаков, И.В.Мирошник, Р.Э. Стельмаков. – С-Пб.: Наука. – 2008. – 178 с.
7. Бабич А.В. Промышленная робототехника: Под редакцией Шифрина Я.А. / А.В. Бабич, А. Г. Баранов, И.В. Калабин и др. – М.: Машиностроение, 1982 –415 с., ил.
8. Бурдаков С.Ф. Проектирование манипуляторов, промышленных роботов и роботизированных комплексов. Учебное пособие / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев - М.: Высш.школа, 1986. - 264 с.
9. Вадутов О. С. Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов / О. С. Вадутов // Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии. — Т. 325. - № 5. - 2014. - С. 16 - 21.

10. Васюк А.О. Планирование пути автономного робота в изменяющейся окружающей среде / А.О. Васюк, Р.М. Бабаков // VI Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія». – Донецьк, ДонНТУ. – 2012. – с. 267 – 271.
11. Гайдук А. Р. Аналитический синтез систем автоматического управления / А. Р.Гайдук, М. Ю. Медведев, Е. А. Плаксиенко // Известия ЮФУ. Технические науки. — № 6. — 2017. — С. 266—279.
12. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. / В.В. Денисенко; ред. Ю.Н. Чернышев. - М.: Горячая линия-Телеком, 2009. - 608 с.
13. Николаева А.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 2: Декомпозиция управления и физический эксперимент на основе технологии мягких вычислений / А.В. Николаева, С.В. Ульянов // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2013. № 1. С.1–22.
14. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов: учебное пособие/ Ю.М. Сафонов. - М.: Энергоатомиздат, 1990 - 177 с.
15. Устройства управления роботами. Схемотехника и программирование. Предко М. (пер. с англ). ДМК Пресс. - 2005. - 404 с.
16. Градецкий В.Г. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В.Г. Градецкий, В.Б. Вешников, С.В.Калиниченко, Л.Н.Кравчук. – М.: Наука, 2001. – 360 с.
17. Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли; пер. с англ. под ред. В.Г. Градецкого. - М.: Мир, 1989. - 624 с.
18. Черноусько Ф.Л. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий М.: Наука, 1989.- 368 с.
19. Шахворостов, С.А. Основы автоматизации: учебн. пособие/ С.А. Шахворостов. – М.: МАДИ, 2004. - 101 с.

20. Джури Е. И. Робастность дискретных систем. Обзор / Е. И. Джури // Автоматика и телемеханика. - № 5. - 1990. - С. 3 - 28.
21. Довбня Н. М. Роботизированные технологические комплексы в ГПС / Н. М. Довбня, А. Н. Кондратьев, Е. И. Юревич. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. - 303 с.
22. Звонарев Д.А. Управление мобильным роботом с электрическим двигателем / Д.А. Звонарев // Известия Тульского государственного университета. – 2011. – с. 368 -272.
23. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л.Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 480 с.
24. Золотухин Ю. Н. Коррекция транспортного запаздывания в системе управления мобильным роботом / Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров, М. Н. Филиппов, А. П. Ян // Автометрия. - № 2. - 2011. - С. 46 - 57.
25. Каляев И.А. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / под общей ред. Е.И.Юревича / И.А.Каляев, В.М.Лохин, И.М.Макаров и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 364 с.
26. Лекус В. Д. Оценка устойчивости систем с запаздыванием / В. Д. Лекус, В. Э. Ровинский. — Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 342 с.
27. Момот М.В. Мобильные роботы на базе ARDUINO / М.В.Момот // БХВ-Петербург., 2020. – 336 с.
28. Мартыненко Ю. Г. Динамика мобильных роботов / Ю. Г. Мартыненко // Соросовский образовательный журнал. - 2000, т. 6, № 5. - С. 110 -115.
29. Рубанов В. Г. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы: монография / В. Г. Рубанов, А. С. Кижук. - Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. - 289 с.
30. Советов Б. Я. Моделирование систем : Учеб. для вузов / Б. Я.Советов, С. А. Яковлев ; 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк.,

2001. - 343 с.
31. Сухоедов М. С. Параметрический синтез линейного регулятора интервальной системы с гарантированными корневыми показателями качества / М. С. Сухоедов, С. А. Гайворонский, С. В. Замятин // Известия Томского политехнического университета. - Т.311. - № 5. - 2007. - С. 10 - 13.
 32. Ткачев С. Б. Реализация движения колесного робота по заданной траектории / С. Б. Ткачев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки. - 2008. - № 2. - С. 33 - 55.
 33. Цюй Д. Управление мобильным роботом на основе нечетких моделей / Д. Цюй // Современные проблемы образования и науки. Технические науки - Российская Академия Естествознания, 2007. - № 6. - Ч. 2. - С. 115 - 122.
 34. Шахворостов, С.А. Технические средства автоматизации: учеб. пособие/ С.А. Шахворостов. – М.: МАДИ, 2011. - 109 с.
 35. Шахинпур М. Курс робототехники / М. Шахинпур - М.: Мир– 1990. – 527 с.
 36. Aníbal O. B. Robótica: Manipuladores y Robots Móviles / O. B. Aníbal. - Barcelona: Marcombo, S. A., 2001. - 464 p.
 37. Barmish B. R. Robust stability of perturbed systems with time delays / B. R. Barmish, Z. Shi // Automatica. - V.25. - № 3. - 1989. - P. 371 - 381.
 38. Filaretov V.F. Planning smooth paths for mobile robots in an unknown environment / V. F. Filaretov, D. A. YU»(рисунки)khimets // Journal of Computer and Systems Sciences International. - Vol. 56. - Issue 4. - 2017. - pp. 738 - 748.
 39. Hernandez R. Kharitonov's theorem extension to interval polynomials which can drop in degree: a Nyquist approach / R. Hernandez, S. Dormido // IEEE Transactions on Automatic Control. - Vol. 41. - Issue 7. - 1996. - pp. 1009 – 1012.
 40. Martynenko, U. Y»(при)UG. Motion Control of Mobile Wheeled

Robots / U. G. Martynenko // Journal of Mathematical Sciences. - 2007. -
Vol. 147, №. 2. - pp. 6569 - 6606.

41. Siegwart R. Introduction to autonomous mobile robots / R. Siegwart,
I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza. - (Intelligent robotics and autonomous
agents series). - Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- 321 p.