

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ С.М.Ковбаса
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізація – електромеханічні системи автоматизації та електропривод

на тему: Розробка та дослідження системи керування колісним роботом

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕП-11мп

_____ Рассомагін Іван Павлович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к.т.н., доц. Волянський Роман Сергійович _____

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

(підпис)

Консультант з _____

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент к.т.н., доц. Коваленко Михайло Анатолійович _____

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

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2022 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність – 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ – ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.М.Ковбаса
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Рассомагіна Івана Павловича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Розробка та дослідження системи керування колісним роботом

науковий керівник дисертації Волянський Роман Сергійович к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ___ » _____ 2022 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: трьох колісний мобільний робот з диференційним приводом.

4. Предмет дослідження: система керування колісним мобільним роботом з диференційним приводом.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналітичний огляд колісних роботів, їх складових, конструкцій, використовуваних електроприводів та систем керування; виконати розрахунок та вибір приводних двигунів і силової частини; створити систему керування заданим положенням та її промоделювати; розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: схемотехнічні рішення силової робототехніки, дослідження кінематики триколісного мобільного робота, математичне моделювання синхронного реактивного двигуна, розв'язання прямої задачі динаміки мобільного робота, синтез регуляторів системи керування положенням робота, дослідження системи керування положенням робота.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Розв'язання прямої та зворотної задач динаміки для триколісного мобільного робота з двома ведучими колесами.
Рассомагін І.П., магістрант, Волянський Р.С., к.т.н., доц.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання 02.09.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналітичний огляд колісних мобільних роботів	19.09.2018	
2.	Розрахунок та вибір приводних двигунів	26.09.2018	
3.	Розрахунок та вибір силової частини	10.10.2018	
4.	Створення моделі синхронного реактивного двигуна	27.10.2018	
5.	Розробка системи керування рухом робота	31.10.2018	
6.	Проведення моделювання системи керування	14.11.2018	
7.	Розробка стартап-проекту	28.11.2018	
8.	Оформлення роботи та підготовка до захисту	12.12.2018	

Студент

(підпис)

І.П. Рассомагін

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Р.С. Волянський

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота вміщує 115 сторінок, 4 основні частин, 63 рисунків, 19 таблиць, 63 джерел використаної літератури та 6 листів графічної частини на форматі А1.

Метою даної роботи є розробка високо-формалізованої математичної моделі, триколісного мобільного робота з двома ведучими колесами, які приводяться до руху синхронними реактивними двигунами та використання цієї моделі для синтезу багатоканальної системи керування рухом робота. Для дослідження проведено аналітичний огляд колісних мобільних роботів, основних складових, конструктивних конфігурацій та особливостей, розглянуто використання електроприводів та систем керування. Наведено детальний алгоритм вибору приводного двигуна та силової частини. Побудовано та досліджено модель синхронного реактивного двигуна. Створено систему керування переміщенням колісного робота. На основі розробленого алгоритму, сконструйовано модель системи керування в режимах позиціонування у задану точку простору та відпрацювання бажаної траєкторії. Створена система керування є асимптотично стійкою, та дозволяє відпрацьовувати бажане переміщення.

Розрахунок і реалізація даної магістерської роботи забезпечувалась за допомогою використання наступних програм: *MATLAB R20014a*, *Microsoft Office Word 2014*, *Microsoft Office Visio 2040*, *MathType 6.9*.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, КОЛІСНИЙ РОБОТ, ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ПРИВОД, РОЗРАХУНОК ПРИВОДНОГО ДВИГУНА ДЛЯ РОБОТА, СИНХРОННИЙ РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОПРИВОД

					141.0006.008.МД			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Рассомагін І.П.			Розробка та дослідження системи керування колісним роботом	Літ	Арк.	Аркушів
Перевір.		Волянський Р.С					4	115
Н. Контр.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського» Каф. АЕМС-ЕП		
Затверд.		Ковбаса С.М.				Гр. ЕП -11мп		

SUMMARY

The Master Thesis consist of 115 pages and 63 figures, 19 tables and 63 references and the graphical part on 6 pages A1.

The purpose of this work is to develop a highly formalized mathematical model of a three-wheeled mobile robot with two driving wheels driven by synchronous jet engines and to use this model for the synthesis of a multi-channel robot motion control system. For the research, an analytical review of wheeled mobile robots, main components, structural configurations and features was carried out, the use of electric drives and control systems was considered. A detailed algorithm for choosing a drive motor and a power unit is given. A model of a synchronous reluctance motor was built and studied. A system for controlling the movement of a wheeled robot has been created. Based on the developed algorithm, a model of the control system was constructed in the modes of positioning at a given point in space and working out the desired trajectory.

The created control system is asymptotically stable and allows you to work out the desired movement.

Calculation and realization of the project was provided through the use of these programs: *MATLAB R2014a*, *Microsoft Office Word 2014*, *Microsoft Office Visio 2014*, *MathType 6.9*.

CONTROL SYSTEM, WHEEL ROBOT, DIFFERENTIAL DRIVE,
CALCULATION OF DRIVE MOTOR FOR ROBOT, SYNCHRONOUS
RELUCTANCE MOTOR , ELECTRIC DRIVE

					141.0006.008.BW			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.	I. Rassomahin				Development and research of a wheeled robot control system	L	Page	Pages
Choked	R. Volyansky						5	115
N. Contr.						«KPI» Department. AEMS-ED Gr. EP -11mp		
Approved	S. Kovbasa							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Типи коліс мобільних роботів	13
1.1.1 Стандартне колесо	13
1.1.2 Поворотне колесо.....	14
1.1.3 Шведське колесо	14
1.1.4 Сферичне колесо	15
1.1.5 Порівняння різних типів колес	16
1.2 Способи керування колісним транспортним засобом.....	16
1.2.1 Диференційних привод.....	17
1.2.2 Синхронний привод.....	18
1.2.3 Всеспрямований привод.....	19
1.2.4 Рульове управління Акермана	22
1.3 Конструкції колісних роботів	23
1.3.1 Роботи з одним колесом.....	23
1.3.2 Роботи з двома колесами.....	24
1.3.3 Роботи з трьома колесами	24
1.3.4 Роботи з чотирма колесами.....	25
1.4 Електродвигуни колісних роботів.....	26
1.4.1 Колекторний двигун	26
1.4.2 Безколекторний двигун	27
1.4.3 Кроковий двигун	29

1.4.4 Асинхронний двигун	32
1.4.5 Синхронний двигун з постійними магнітами	33
1.4.6 Синхронний реактивний двигун	34
1.5 Системи керування колісними роботами	36
1.5.1 Методи побудови систем керування.....	36
1.6 Висновки до першого розділу.....	39
2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ДВИГУНА І СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ.....	41
2.1 Розрахунок приводів.....	41
2.2 Розрахунок акумуляторної батареї.....	49
2.3 Розрахунок силової частини	50
2.3.1 Розрахунок автономного інвертора	51
2.3.2 Розрахунок драйвера керування ключами	52
2.3.3 Розрахунок ємнісного фільтру для зарядного кола.....	53
2.3.4 Розрахунок давачів струму та напруги.....	54
2.4 Висновки до другого розділу	54
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	56
3.1 Кінематична модель робота з диференціальним приводом	56
3.2 Математична модель синхронного реактивного двигуна.....	68
3.3 Розробка динамічної моделі робота з диференціальним приводом у безперервному часі	77
3.4 Розробка системи керування.....	84
3.4.1 Синтез регулятора швидкості.....	84
3.4.2 Загальна структура системи керування	86
3.4.3 Розробка формувачів руху робота.....	87
3.4.4 Структурна схема математичної моделі системи керування роботом..	90

3.5 Висновки до третього розділу	97
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	98
4.1 Опис ідеї проекту	98
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	99
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	100
4.4 Розробка ринкової стратегії	103
4.5 Висновки до четвертого розділу	104
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	107
ДОДАТОК А	114

ВСТУП

В наш час мобільні роботи широко застосовуються при виконанні різних технологічних операцій у цілому ряді галузей народного господарства. Ці операції пов'язані з транспортуванням вантажів та обладнання, виконання робіт щодо визначення стану технічного об'єкту чи споруди, їх конструювання чи ремонту, виконання робіт з дослідження певної території та складання відповідних карт тощо. В останній час перелік операцій, які можуть виконувати мобільні роботи розширився поліцейськими та військовими операціями [1-3].

Очевидно, що від швидкості та точності руху таких роботів залежить безпека персоналу, який працює поруч, та час, який необхідний для виконання відповідних операцій. Тому виникає важлива задача дослідження та формування траєкторій руху мобільних роботів.

В наш час така задача розв'язується за допомогою методів та підходів сучасної теорії керування. В першу чергу до таких методів слід віднести методи інтелектуального керування, яке базується на використанні нечіткої логіки та машинного навчання [4-5]. Суттєвим недоліком таких методів є високій рівень суб'єктивізму з боку проектувальника відповідних систем керування та персоналу, який здійснює їх налагодження. Відповідно функціонування системи керування залежить від рівня знань та навичок конструкторсько-налагоджувального персоналу і може відбуватися у непередбачених на етапі проектування системи режимах у випадку недостатньої проробки алгоритмів керування. З іншого боку, використання класичних алгоритмів автоматичного керування для керування роботами не гарантує стійкості їх руху та бажаної швидкодії [6,7]. Тому на теперішній час найбільш придатними для керування мобільним роботами будемо вважати методи, які базуються на новітніх розробках в області теорії автоматичного керування, які базуються на методах оптимізації, адаптації та робастності і використанні теорії стійкості руху [8-10].

Використання цих методів дозволяє розглядати мобільний робот як деяку динамічну систему з декількома входами та виходами. Математичний опис такої

динамічної системи може бути використаний для аналізу та синтезу бажаних траєкторій руху шляхом розв'язання відповідних прямої та зворотної задач динаміки. Тому створення математичної моделі мобільного робота є актуальною задачею, розв'язання якої дозволяє створити та дослідити системи керування роботом, які забезпечують рух по наперед-заданим бажаним траєкторіям.

Мета магістерської роботи. Розробка високо-формалізованої математичної моделі триколісного мобільного робота з двома ведучими колесами, які приводяться до руху синхронними реактивними двигунами та використання цієї моделі для синтезу багатоканальної системи керування рухом робота.

Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналітичний огляд колісних роботів, їх складових, конструкцій, використовуваних електроприводів та систем керування;
- виконати розрахунок та вибір приводних двигунів і силової частини;
- створити систему керування заданим положенням та її промодельовати.

Об'єктом дослідження є процеси керування колісним мобільним роботом.

Предмет дослідження є система керування трьох-колісний мобільний робот з диференційним приводом.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувались: методи узагальненої теорії автоматичного керування, теорія керування електроприводами та методи моделювання в середовищі MatLAB.

Практична цінність. При виконанні магістерської роботи отримано наступні практичні результати:

1. наведено алгоритм розрахунку приводних двигунів для колісного робота з диференційним приводом;
2. розроблено систему керування колісним роботом для переміщення в задані координати;
3. розроблено систему керування колісним роботом для відпрацювання заданої траєкторії руху.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Міжнародний стандарт ISO 8373:2021 [11] визначає термін “робот” як приводний механізм, програмований по двох і більше осях, має деякий ступінь автономності, що рухається всередині свого робочого середовища та виконує призначені йому завдання. Іншими словами, це механізм що має за допомогою датчиків сприймати навколишній світ, будувати моделі на основі усвідомлення навколишнього, та впливати на фізичний світ тим чи іншим способом.

Загальної класифікації не існує, так як з розвитком робототехнічного напрямку пристрої постійно змінюють свій вигляд, та збільшують функціональність. Тому роботів можна класифікувати [12,13] за областями використання, середовищами їх роботи, функціональним направленням, за ступенем мобільності. В даній роботі орієнтуємося на найбільш популярний способів – за пересуванням або кінематикою. Згідно цих критеріїв, поділяються на два великі класи широкого призначення - маніпуляційні та мобільні роботи.

Маніпуляційний робот - автоматична стаціонарна машина або також може бути обмежено пересувна. Виконавчий орган, як правило виконаний у вигляді маніпуляційного агрегату, що має декілька ступенів рухливості. Набули найбільшого поширення в промисловості, а саме машинобудівних та приладобудівних галузях. Мобільний робот - автоматична машина, яка має змогу самостійно пересуватися у просторі.

Роботи що рухаються [14]: у свою чергу поділяють за способами пересування.

Колісний метод — метод пересування з використовуваних коліс, являється найрозповсюдженішим, оскільки не складний у проєктуванні та вдосталь практичний.

Гусеничний спосіб — мобільність надається за допомогою гусеничної стрічки, яка забезпечує більше зчеплення з дорогою, тим самим зменшуючи просковзування, найчастіше використовується у військовій галузі.

Крокуючий спосіб - для пересування використовуються аналоги ніг. Такі роботи складні у проектуванні, але можуть переміщатися будь-якими поверхнями, недоступними для колісних та гусеничних роботів.

Пересування повітрям – так звані БПЛА (безпілотний літальний апарат), ракети, коптери, з функцією самостійного пілотування.

Плаваючий спосіб - БППА (безпілотний плаваючий апарат) а також кораблі, оснащені автопілотом.

Як бачимо, існує велика різноманітність мобільних роботів, зі своїми перевагами та недоліками, тому вибір підходу переміщення робота являється важливим аспектом, та першочергово залежить від поставленої для нього задачі та робочого середовища.

Колесо є найпопулярнішим механізмом пересування в мобільній робототехніці, та у створених людиною транспортних засобах загалом. В цілому, колісні роботи споживають менше енергії [15] та пересуваються швидше, ніж інші кінематичні механізми (наприклад, роботи на ногах або гусеничні машини). Мають відносно просту механічну реалізацію, що передбачає меншу кількість і менш складні деталі, тим самим полегшує виготовлення. Проблеми з балансом рівноваги не становлять великих труднощів, оскільки робот постійно контактує з поверхнею. Мають менший знос рухомої поверхні, порівняно зі гусеничними роботами. Незважаючи на те, що долати пересічену місцевість чи нерівності ґрунту складно, колісні мобільні роботи підходять для широкого класу цільових середовищ та практичних задач.

Мобільні роботи на колесах, як правило, складається з трьох систем:

- Кінематичної схеми, яка виходить з конфігурації коліс та їх розташуванні;
- Системи приводів, що дозволяє кінематичній структурі рухатись;
- Силового перетворювача для активації приводів.

В даному розділі детально розглянуто структуру колісного мобільного робота, типи використовуваних коліс, конструктивні виконання, способи керування та електроприводи. Представлено кілька динамічних моделей з описом найбільш поширених реалізацій.

1.1 Типи коліс мобільних роботів

Конструктивні особливості конфігурацій коліс [16] можна розділити на два основні типи: стандартне колесо та спеціальне колесо. Під стандартним колесом розуміють звичайну шину. Спеціальні колеса мають унікальні механічні конструкції, включаючи ролики або сфери.

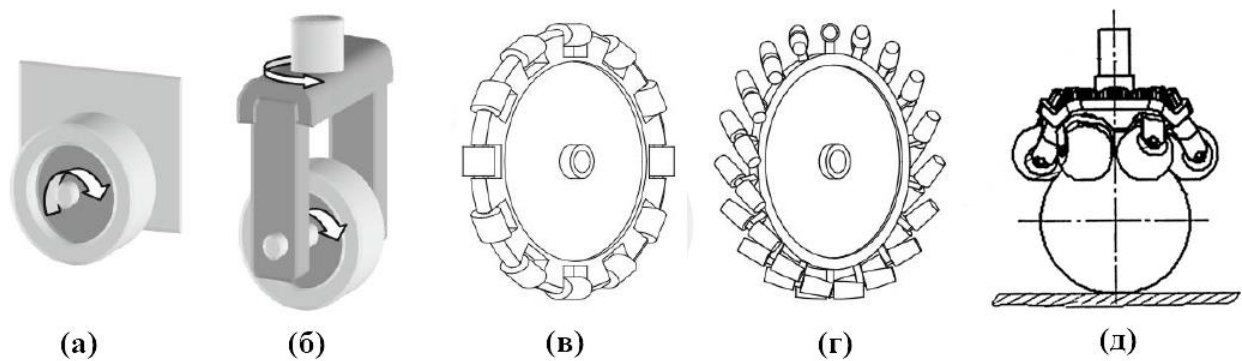


Рисунок 1.1 – Різновидності коліс використовуваних у мобільних роботах:

(а) стандартне колесо; (б) поворотне колесо; (в, г) шведське колесо, ролики можуть бути розміщені двома різними способами: 90° варіант показаний малюнку в) і 45° варіант малюнку г); (д) кульове або сферичне колесо

Всі ці типи коліс сильно відрізняються своєю конструкцією і тому той чи інший тип значно впливає на всю кінематику мобільного робота [17,18].

1.1.1 Стандартне колесо

Стандартне колесо широко розповсюджене, завдяки своїй простоті та функціональним можливостям. Це колесо має одну ступінь свободи, що дає можливість рухатися вперед або назад (рис. 1.2 а). Центр колеса закріплено на шасі робота, а кут між шасі та площиною колеса ніколи не змінюється. Цей тип коліс зазвичай зустрічається у більшості мобільних роботах, де колеса напругу чи за допомогою редуктора прикріплені до двигунів, в якості приводу. Також можуть використовуватися як пасивні колеса, а для досягнення більшої мобільності їх можна комбінувати разом з іншими типами коліс.

Виготовляються з металу, пластмаси, композитів і т. д. Щоб надати поверхні колеса додатковий коефіцієнт тертя, на нього можна покласти матеріал

з високим зчепленням, наприклад, каучуковий композит або поліуретан. Вартість виготовлення дуже низька через просту геометрію.

1.1.2 Поворотне колесо

Основна відмінність між стандартним колесом полягає в тому, що звичайне колесо може обертатися лише вперед та назад, а поворотне колесо також може пасивно обертатися на 360 градусів по відношенню до вертикальної осі (рис. 1.2 б). Одним із найбільших недоліків цих поворотних коліс є ефект флатеру, коли колесо не торкаючись землі обертається у непередбачуваному напрямку. При зіткненні з поверхнею, колесо може хибно зорієнтувати робота.

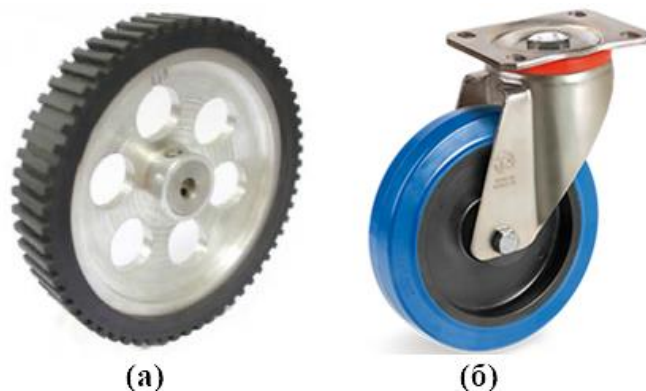


Рисунок 1.2 – (а) Стандартне колесо; (б) поворотне колесо

1.1.3 Шведське колесо

Концепція Шведських коліс полягає у синтезі основного активного колеса і пасивних роликів, що вільно обертаються. Розроблена інженером Бенгт Ілоном зі шведської компанії “Mecanum AB” [19]. Активне колесо та пасивні ролики мають власні осі обертання, саме тому можливий рух у двох напрямках, один по периферії основного колеса, другий за роликами. Це дозволяє підтримувати локомоцію практично в будь-якому напрямку.

Якщо ролики розташовані перпендикулярно до осі активного колеса, то називають колесо Ілона (рис. 1.3 а) або всеспрямоване колесо (omni wheel). Зазвичай допоміжні ролики мають форму циліндра, а їх кількість може змінюватись. Один шар роликів використовується для меншої колісної бази, а для ширшої бази два або більше шарів кріпляться один до одного [20]. В ролики

інколи монтується підшипники за для досягнення плавності ходу. З фінансової точки зору виготовлення таких колес досить дороге.

Якщо ролики нахилені під кутом 45 градусів по відношенню до осі базового колеса, то такі колеса називаються “Mecanum” (рис. 1.3 б). В залежності від положення колеса ролики нахилені або вліво або вправо. Оскільки конструкція цих колес дуже складна, вартість виробництва вища порівняно з колесами Ілона. Використовується лише один шар установки для будь-якого розміру колісної бази. Ці колеса здатні котитися навколо осі основного колеса, також навколо осі роликів під кутом 45 градусів. Ролики обов'язково встановлюються на підшипники, щоб зменшити втрати на зношування, тому що вони частково задіяні, навіть коли колесо обертається виключно навколо осі основного колеса, на відміну від коліс “Omni”.

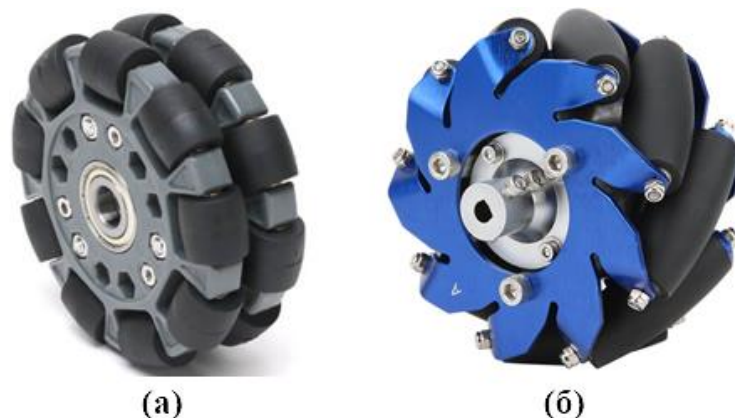


Рисунок 1.3 – Шведські колеса: (а) omni колесо; (б) mecanum колесо

Зазвичай шведські колеса виготовляються із пластику або металевих сплавів, а ролики – матеріалу з високим зчепленням (каучукового композиту) для забезпечення більшого коефіцієнту тертя.

1.1.4 Сферичне колесо

Сферичне колесо — колесо яке має змогу рухатись у будь-яку сторону. Розроблене таким чином, що його можна активувати для обертання в будь-якому напрямку за допомогою двох або більше двигунів [21,22]. Один із механізмів реалізації сферичної конструкції можна побачити на прикладі комп'ютерної миші (застарілий варіант - з кулькою) з активними приводними роликами, які

спираються зверху на поверхню сфери та передають зусилля для обертання. В робототехніці зустрічається вкрай рідко у зв'язку з складною реалізацією.

1.1.5 Порівняння різних типів колес

За чутливістю до стану підлоги та складністю виготовлення, прості типи коліс (звичайні та поворотні) володіють більшими перевагами. Так як не мають складної конструкції і майже стійкі до рельєфної поверхні певної міри. У той же час шведські та сферичні колеса чутливі до дрібних предметів, які можуть з'явитися на шляху, тобто простір між сферою, що обертається, і її кришкою може бути забито дрібними частинками. Звичайні колеса кращі за вантажопідйомністю завдяки своїй простій конструкції, тоді як всеспрямовані колеса більш чутливі. За вартісним показником шведське та сферичне колеса поступаються стандартним колесам. Хоча стандартні колеса вигідні через їх хорошу надійність, відсутність умови бокового ковзання обмежує його рух. Спеціальні колеса можна використовувати для забезпечення всеспрямованого руху, тобто гарантованого забезпечення трьох ступенів свободи двовимірного руху.

Таким чином, у кожного типу коліс є свої сильні та слабкі сторони. Звичайні колеса дуже надійні та міцні, але не забезпечують вільного пересування у будь-якому напрямку, як всеспрямовані колеса. Всеспрямовані колеса – відмінний вибір для забезпечення маневреності робота у приміщенні та у вузькому просторі, але, ймовірно, це найгірший вибір для застосування на вулиці. Роликові колеса – це оптимальний і простий спосіб забезпечити більш вільне пересування для класичних коліс.

1.2 Способи керування колісним транспортним засобом

Існує чотири загальні способи керування механічною частиною мобільних колісних роботів, а саме: диференціальний, синхронний, всеспрямований та рульове управління Акермана.

1.2.1 Диференційних привод

Диференційний привод представляє собою об'єднання щонайменше двох колес, що приводяться в рух різними двигунами, та розташовуються на одній осі. Для забезпечення стійкості, до конструкції інколи встановлюються пасивні допоміжні колеса. Принцип роботи досить простий, напрямлення руху робота залежить від величин та напрямку обертання кожного колеса [2322]. Така концепція використовується у пересуванні армійського танку.

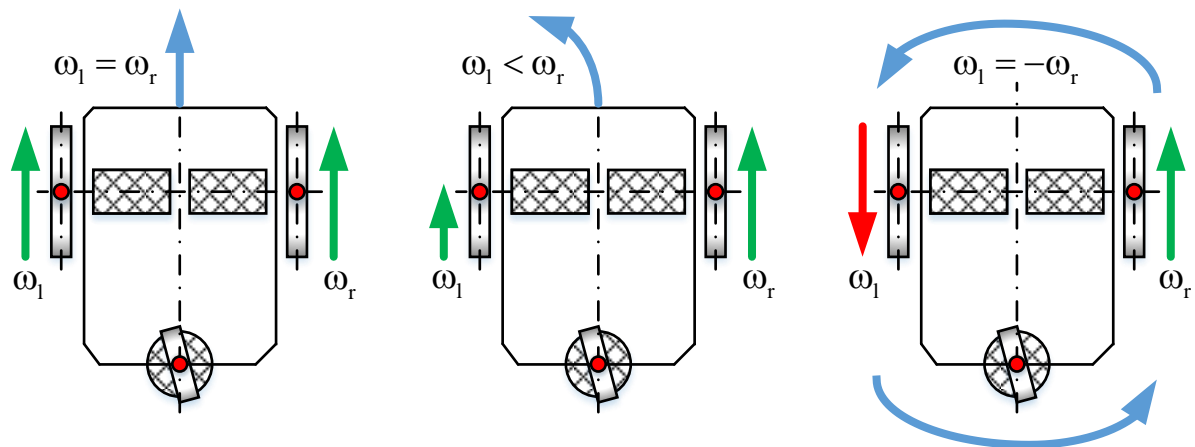


Рисунок 1.4 – Принцип роботи диференційного приводу

Якщо кутові швидкості колес (рис. 1.4) ідентичні як за величиною, так і за напрямком, то робот слідуватиме лінійним шляхом, або вперед, або назад, залежно від обертання двигунів. Якщо обидва колеса обертаються з однаковою швидкістю, але в протилежному напрямку, то робот буде обертатися навколо своєї вертикальної осі. Ця можливість повного повороту є однією з найбільших переваг робота з диференціальним приводом (поворот із нульовим радіусом). Якщо кутові швидкості колес різні за величиною, то робот здійснює криволінійний рух.

Диференціальний привод пропонує досить високу керованість, що дозволяє роботам рухатись у вузьких місцях. Недоліком такого приводу є неможливість точно передбачити центр обертання робота, у зв'язку з заносом у момент маневру. Але незважаючи на це, привод широко використовується в

робототехніці, так як досить простий у розробці та керуванні, не дорогий та може виконувати практично всі побутові роботи.

1.2.2 Синхронний привод

Синхронний привод (рис. 1.5) як правило використовується з трьома, чотирма або будь-якою кількістю коліс. Також може бути побудований з використанням центрованих або зміщених від центру коліс. Сама концепція припускає що всі колеса мають обертатися разом, тобто з однією кутовою швидкістю та в одному напрямку. Ця конфігурація цікава, тому що для керування всього використовуються тільки два двигуни. Один двигун забезпечує швидкість разом всіх коліс, а інший двигун відповідає за рульове управління, обертаючи всі колеса разом навколо кожної з окремих вертикальних осей [24]. З цього випливає, що шляхом зміни орієнтації коліс, робот може рухатись у будь-якому напрямку. Але орієнтацію шасі робота змінити не має змоги, тоді додатково використовується турель.

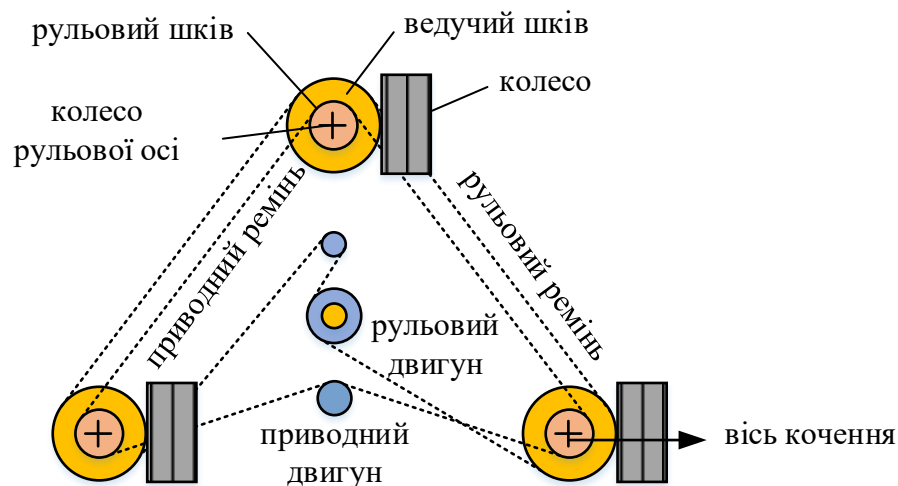


Рисунок 1.5 – Синхронний привод на основі трьох-колісного робота

Різноманітність роботів із синхронним приводом знайшли своє застосування у мобільних роботах для приміщень. З точки зору точності керування системи синхронного приводу, зазвичай, перевершують всі спрямовані конфігурації, але поступаються системам диференціального приводу і рульового управління Акермана. Недоліками цієї системи є досить складна механічна конструкція, та те що двигун приводить у рух колеса за допомогою одного ремня. Через люфт

колесо, що знаходиться ближче до двигуна, починає обертатися раніше ніж інші, генеруючу помилку орієнтації шасі.

1.2.3 Всеспрямований привод

Всеспрямований привод здатний миттєво направляти робота в будь-якому напрямку незалежно від його поточного положення. Може бути реалізований з використанням **сферичних, колісних** або **шведських коліс**. Нижче наведено приклади реалізації даного приводу.

При використанні **сферичних**, робот має володіти щонайменше трьома колесами, кожне з яких приводиться в дію одним двигуном. Конструкція передбачає, що сферичні колеса підвішені на трьох контактних точках, дві з яких мають сферичні підшипники, а одна - колесо, з'єднане з віссю двигуна. Цей варіант має досить просту конструкцію та гарну маневреність. Недоліками є невелика вантажопідйомність, робот в даному конструктивному виконанні не може пересуватися по рельєфній площині. Сферичні колеса, самі по собі мають малий коефіцієнт тертя, що впливає на ефективність.

Привод з використанням **шведських коліс** дає змогу легко сконструювати всеспрямований мобільний робот. Переваги полягають у тому, що для зміни траєкторії, колеса не виконують ніякого механічного руху, а закріпленні статично, що спростовує конструкцію. З іншого боку механічна конструкція колеса дещо ускладнюється. Недоліками таких систем є виникаючі під час руху вібрації, внаслідок неплавності руху, та, в порівнянні з стандартними колесами, низька зносостійкість. Зазвичай такі роботи використовують або триколісну, або чотириколісну платформу (кількість коліс не обмежена). Кожна конструкція має свої переваги та недоліки [25].

Три “Omni” колеса. В такому виконанні робот обладнаний трьома незалежними колесами, що розташовані на однаковій відстані один від одного під кутом 120 градусів. При активації двигунів отримуємо три сили, які сумарно складають поступальну силу і момент. Керування дещо специфічне, залежить від напрямку та швидкості кожного колеса (рис. 1.6).

Триколісна платформа, завдяки розподіленню сили реакції тільки за трьома точками, забезпечує велику тягу. Усі колеса контактують з поверхнею навіть при деяких нерівностях ландшафту. Конструкція має найпростішу форму з усіх можливих екземплярів, використуваних на основі шведських колес. При русі під горку з високим центром тяжіння виникають проблеми зі стійкістю. У зв'язку з конструктивним облаштуванням, усі колеса не задіяні у повному обсязі, що впливає на потужність та швидкість пересування робота.

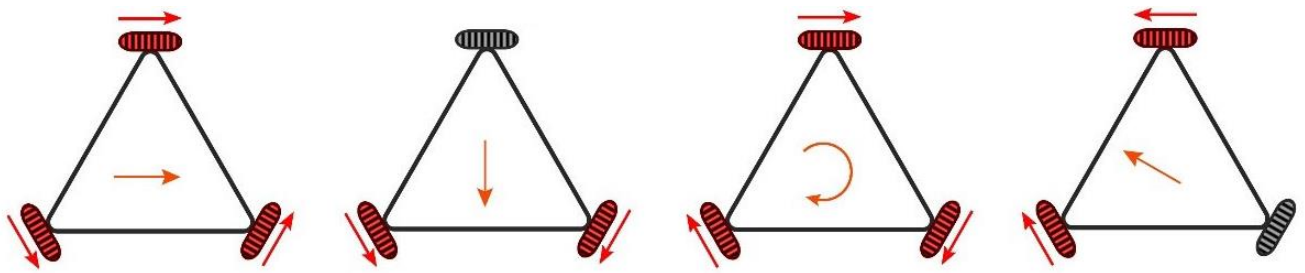


Рисунок 1.6 – Приклади переміщення триколісного робота

Чотири “Omni” колеса. Робот для забезпечення всенаправленого руху може конструюватися з чотирма колесами Ілона, розміщеними як на чотирьох кутах під наклоном 45 градусів, так і посередині на кожному з чотирьох боків. Це означає, що два колеса паралельні один одному, а інші два колеса перпендикулярні. На рис. 1.7 показані деякі приклади переміщень з використанням чотиріколісного робота з використанням колес Ілона.

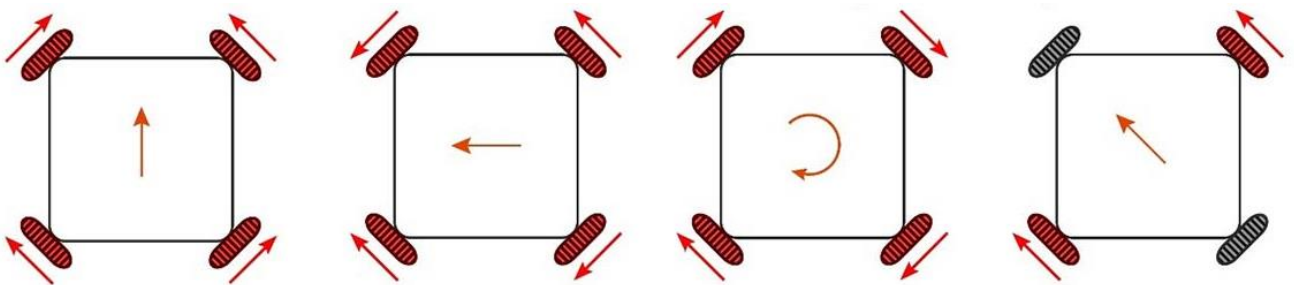


Рисунок 1.7 – Приклади переміщення чотиріколісного робота з “Omni” колесами

Для забезпечення поступального руху, два протилежні колеса мають рухатися в одному й тому ж напрямку, та з однаковою кутовою швидкістю. Обертальний рух можливий при активації усіх коліс, що крутяться в одному

напрямку. Завдяки чотирьох-колісному виконанні, робот має один зайвий ступінь свободи, що накладає деякі труднощі при керуванні.

Чотири “Месапум” колеса. Завдяки синтезу цих чотирьох коліс, мобільний робот може рухатися в будь-якому напрямку при будь-якому повороті транспортного засобу. Платформа може бути квадратною або прямокутною, у кожному куті шасі розташовано по одному колесу, так щоб утворювались дві дзеркальні колісні пари. Робот переміщується завдяки сумарному вектору тяги, створений кожним окремим колесом.

Для лінійного прямого чи протилежного руху (рис. 1.8) всі чотири колеса обертаються однаково “вперед” або “назад” відповідно. Для бокового переміщення одна діагональна пара коліс обертається в одному напрямку, а інша діагональна пара обертається в протилежному напрямку. Однак система має чотири керовані змінні, при трьох ступенях свободи. Ця проблема може призвести до конфлікту при спрацьовуванні.

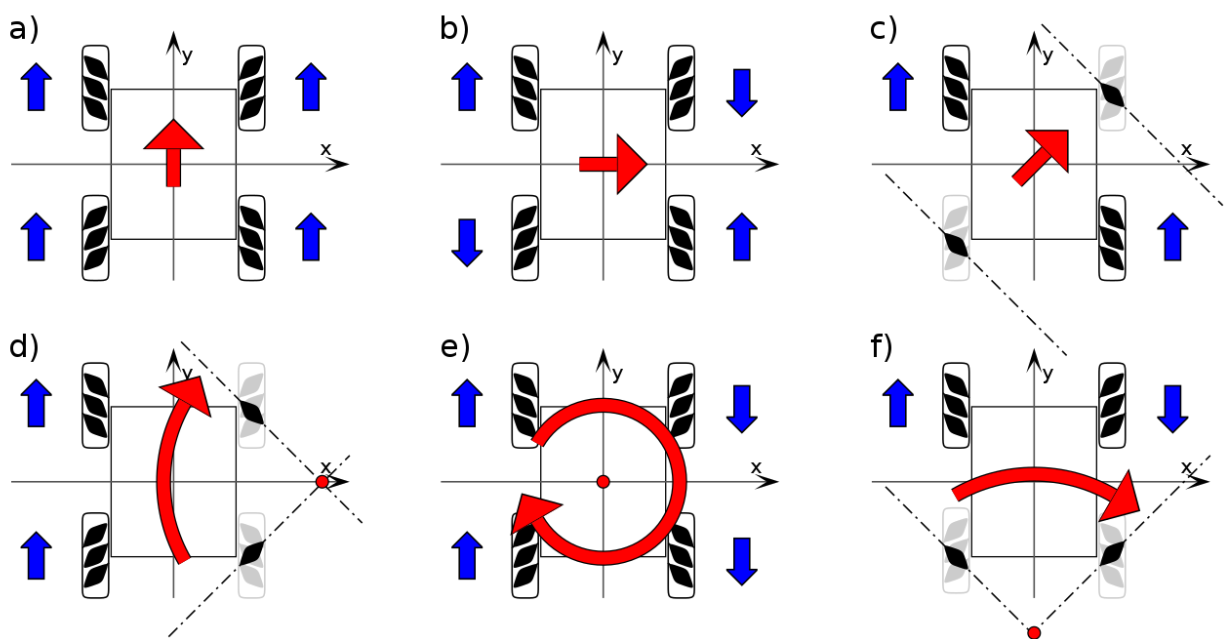


Рисунок 1.8 – Приклади переміщення чотирьохколісного робота з “Месапум” колесами

Всеспрямований привод з **активними самовстановлюваними колесами.** Необхідно три таких колеса (рис 1.9) для забезпечення всесторонньої мобільності робота. Керування припускає створення лінійних та кутових

швидкостей незалежно від того як розміщені колеса [26,27]. Поворотний блок з електроприводом, забезпечує функції приводу та рульового керування, засновані на різниці обертання двох двигунів [28]. Головна перевага, над приводом з використанням шведських колес, є те, що використовуються гумові шини, які нівелюють вертикальні вібрації. Але при швидкій зміні напрямку на протилежний, є імовірність різкої само-орієнтації коліс, що хибно відобразиться на рульовому керуванні. Цей ефект аналогічний при використанні магазинного візка. Для передачі колесу крутного моменту використовується зубчаста передача, так як під'єднати безпосередньо до двигуна не можливо, бо проводи керування або будуть обмежувати рух колеса або намотуватимуться – що недопустимо. А це в свою чергу дещо ускладнює механічну структуру.



Рисунок 1.9 – Активне самовстановлюване колесо

1.2.4 Рульове управління Акермана

Одна з найвідоміших конфігурацій для керування усіх транспортних засобів є керування за Акерманом [29]. Використовується в усіх сучасних автомобілях. Кермо Акермана механічно координує кут нахилу двох передніх коліс, закріплених на загальній осі для керування і двох задніх коліс, закріплених на іншій осі для руху. Перевагою такої конструкції є підвищений контроль, краща стійкість та маневреність на дорозі, менша пробуксовка та менше енергоспоживання. Концепція рульового управління Акермана розроблена таким чином, що при повороті внутрішнє колесо повертається на більший кут, ніж зовнішнє, як результат протидії прослизанню шини [30].

Але без недоліків не обійтись, до основним можна віднести не змогу забезпечити такий всеспрямований рух, як з використанням синхронного, диференційного приводів, та систем зі сферичними та шведськими колесами. Тобто Кермо Акермана не може забезпечити нульовий радіус повороту, хоча має велику популярність у робототехніці.

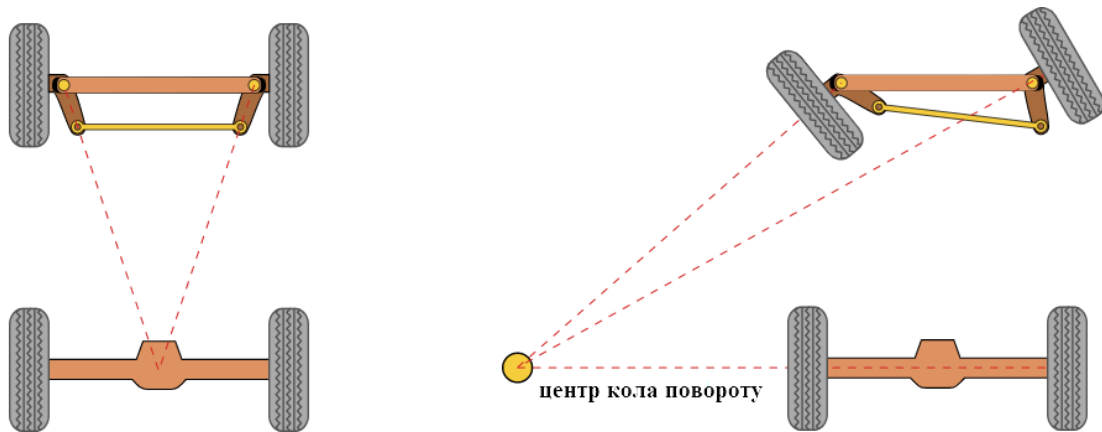


Рисунок 1.9 – Геометрія повороту керма Акермана

1.3 Конструкції колісних роботів

Єдиної конструкції мобільних роботів, що забезпечує маневреність, керованість та стійкість не існує. Так як роботи проектуються індивідуально для різних середовищ та цільових задач. Також вибір типу коліс тісно пов'язаний із вибором розташування та геометрії виробу. У цьому розділі конструкції роботів класифікуються за кількістю коліс [31].

1.3.1 Роботи з одним колесом

Основним прикладом такого робота є одноколісний велосипед. Колесо можна використовувати у формі м'яча для регбі, щоб збільшити стійкість. Також сферичний робот є прямим потомком одноколісного робота [32]. Сама конструкція робота по основі одного колеса нестійка та для підтримання балансу вимагає належного динамічного керування. Але має свої переваги у гарній маневреності та низькому опорі кочення. На практиці використовуються не часто, так як необхідно створювати допоміжні балансуєчі механізми. Керування таким агрегатом не просте, через складність обчислення положення.

1.3.2 Роботи з двома колесами

Розмір робота можна зменшити за рахунок використання двоколісних роботів у порівнянні з конструкціями які мають три та більше коліс. Існує два типи двох-колісних роботів. Робот велосипедного типу (рис. 1.10 а) має два послідовно розміщені колеса, переднє виконує керуючу дію, а заднє статичне з активним приводом. Як і двоколісний велосипед, така конфігурація робота може забезпечити динамічну стійкість тільки при русі, тому такий тип використовується рідко.

Робот типу перевернутого маятника (рис. 1.10 б) має два паралельні колеса, у таких установках використовується диференціальний привод. Досягти статичної стійкості можна за рахунок точного розміщення центру ваги на осі колеса. Однак зазвичай застосовують керування динамічним балансуванням, яке аналогічно звичайному керуванню перевернутим маятником.

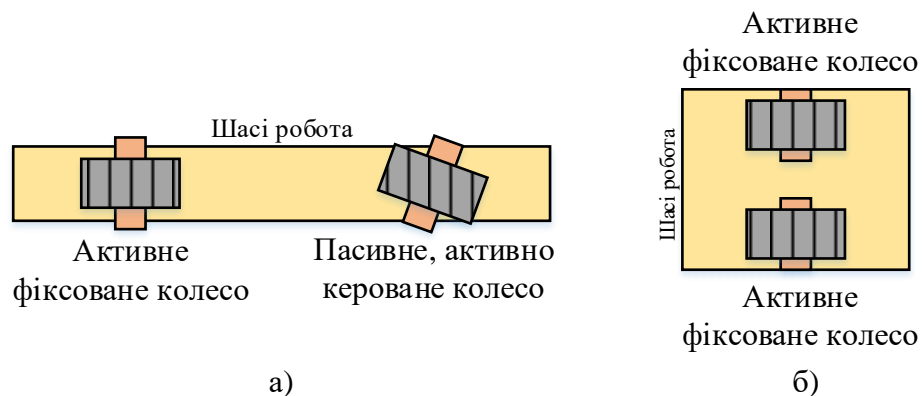


Рисунок 1.10 – Двоколісні роботи: (а) Велосипедного типу;
(б) Тип перевернутого маятника

1.3.3 Роботи з трьома колесами

Робот із трьома колесами є статично стабільним і має просту конструкцію, тому це одна з найбільш широко використовуваних конструкцій для колісних роботів. Існує велика кількість конструкцій відповідно до вибору окремих типів коліс:

- двоколісний диференціальний привід з допоміжним пасивним колесом або безприводним всеспрямованим колесом;

- три колеса з синхронним приводом керуванням;
- три моторизовані шведські або сферичні колеса, розташовані трикутником;
- два з'єднаних ззаду тягових колеса (диференціал), та одне кероване колесо спереду;
- два вільних колеса ззаду, та одне кероване тягове колесо спереду;
- трьох-колісний робот з активними самовстановлюваними колесами.

1.3.4 Роботи з чотирма колесами

Для роботів із більш ніж трьома колесами, які пересуваються рельєфною площиною, зазвичай потрібна система підвіски для підтримки контакту коліс із землею. Одним із найпростіших підходів до створення підвіски є гнучкість самого колеса. Різні конфігурації чотирьох-колісних роботів:

- два моторизованих колеса ззаду, два керованих колеса спереду. Зміна напрямку виконується за допомогою рульового управління Акерманом. Аналог автомобіля із заднім приводом;
- два моторизованих і керованих колеса спереду та два вільних колеса ззаду. Аналог автомобіля із переднім приводом;
- чотири керованих і моторизованих колеса. Аналог повного приводу;
- два тягових колеса (диференціал) ззаду або спереду, та два всепрямованих колеса спереду/ззаду;
- чотири моторизовані шведські колеса;
- двоколісний диференціальний привід з двома допоміжними пасивними колесами;
- чотирьох-колісний робот з активними самовстановлюваними колесами.

Кількість колес для роботів не обмежується чотирма, але конфігурації залиються такими самими, що розглянуто вище, тому описувати їх немає сенсу.

1.4 Електродвигуни колісних роботів

Для мобільних роботів електричний привод є одним з основних елементів, що дає можливість рухатись. В мобільних колісних роботах використовуються двигуни як постійного струму, так і змінного, та існують кілька варіантів кожного з них [33].

1.4.1 Колекторний двигун

Колекторний двигун – це найпоширеніший тип [34] із класу двигунів постійного струму. Ці двигуни мають малі габаритні розміри та вагу, здатні забезпечити крутний момент в три-чотири рази більший за номінальний. Ротор складається з котушок та комутаторного пристрою, що при обертанні створює рухоме магнітне поле. Статор на внутрішній поверхні має постійні магніти, які використовуються для створення стаціонарного магнітного поля. Принцип роботи двигуна заключається у притягуванні та відштовхуванні магнітного поля ротора та нерухомого поля статора. Комутатор має у складі виготовленні з міді сегментовані контакти та нерухомі вугільні щітки. Саме під впливом тертя щіток передається напруга на відповідні обмотки.

Керування не потребує ніяких додаткових електронних схем, коли необхідне забезпечити обертання в одному напрямку без контролю швидкості та крутячого моменту, клеми живлення напряму під'єднуються до двигуна. Для зміни напрямку руху, під'єднанні клеми необхідно поміняти місцями. Для повноцінного керування швидкістю, крутним моментом і напрямком використовується «Н-мост» (рис. 1.11), що складається з електронних ключів - транзисторів, IGBT або MOSFET. Схема дозволяє подавати напругу на двигун будь-якої полярності, що забезпечує наявність реверсу. Для встановлення бажаної швидкості та моменту користуються широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Вал двигуна пропорційно обертається, в залежності від прикладеної напруги. Для забезпечення вищої керованості зустрічається приєднання до двигуна енкодера.

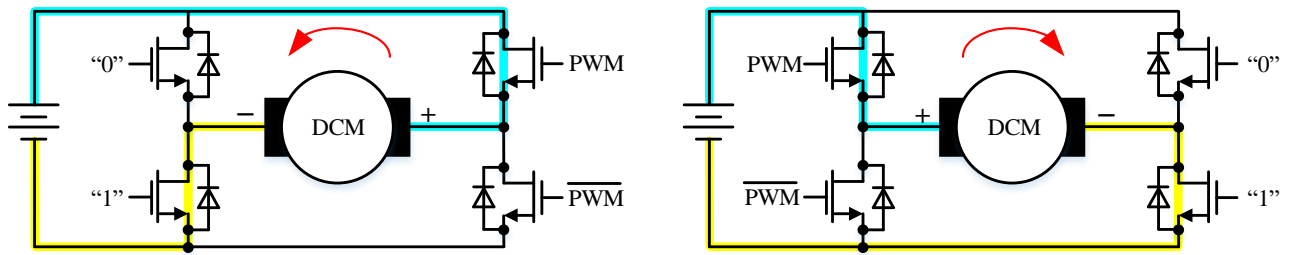


Рисунок 1.11 – Керування колекторним двигуном через H-міст

Так як двигуни не є конструктивно складними та не використовують для керування дорогих електронних компонентів, то вартість низька у порівнянні з іншими типами двигунів. Одним з недоліків даних двигунів є невеликий життєвий цикл, так як конструкція має в наявності колекторний вузол, щітки якого мають тенденцію до швидкого зносу, що у свою чергу вимагає частій заміни та періодичного обслуговування. На високих швидкостях двигун може працювати не стабільно, із-за нестійкого контакту щіток з колектором, що супроводжується іскрінням. Так як комутатор представляє собою перемикач, то присутній електричний шум, що може потрапити до чутливих к перешкодам ланцюгів. При перемиканні обмоток також спостерігається акустичний шум.

Колекторні двигуни зазвичай використовуються, де не потрібна постійна приводна робота, через не довгий термін експлуатації. Найбільшої популярності знайшли у побутових рішеннях, пилососах, кухонних машинах, в іграшках, в приводах склопідйомників машин. В робототехніці колекторні двигуни можуть використовуватись як для приводів окремих частини робота, так і цілого робота, наприклад, робот-прибиральник.

1.4.2 Безколекторний двигун

Безколекторний двигун постійного струму (BLDC) або ще в літературі зустрічається як двигун з електронною комутацією. BLDC має ротор із постійними магнітами [3534], та статор з обмотками. Для керування швидкістю, данні двигуни використовують зовнішні контролери, які регулюють фазу та амплітуду імпульсів напруги. Цей підхід являється альтернативою механічному комутатору (щіткам), використовуваним у колекторних двигунах. Ротор двигуна

може бути вмонтований як у середину двигуна так і зовні. Обмотка статора може мати різку кількість фаз, найрозповсюджене виконання є трьох-фазне. Три обмотки можуть бути з'єднанні за двома схемами "зірка" або "трикутник". Двигуни можуть мати різну кількість полюсів, для цього ротор вимагає більшої численності магнітних секцій, а у статорі відповідно збільшене число обмоток. Для забезпечення вищої продуктивності використовують багатополусне виконання, а коли необхідно надати належну працездатність при високій швидкості орудують меншою кількістю полюсів.

Для керування застосовуються три схеми приводу «напівміст», кожна з яких складається з двох перемикачів (рис. 1.12). Ключі можуть бути біполярними транзисторами, IGBT або MOSFET, залежно від необхідної напруги та струму. Методів керування трифазних безколекторних двигунів досить багато, найрозповсюдженіші називаються трапецієподібною, блоковою або 120-градусною комутацією [36]. Трапецієподібна комутація імітує алгоритм керування, який використовується в щітковому двигуні постійного струму. В даній схемі в однаковий момент часу одна обмотка закорочена на землю, інша розімкнута, а третя підключена до напруги живлення. В залежності від ширини поданого імпульсу можна задавати бажану швидкість та крутящий момент. При керуванні за трапецією присутній ефект пульсації моменту що крутить, оскільки фази перемикаються швидко в кожній точці комутації. Для більш високої продуктивності використовують інші способи керування: синусоїдальну або 180-ти градусну комутація. Суть полягає у постійному пропусканні синусоїдального струму через усі три фази двигуна, зміщенні на 120 градусі кожна. Цей метод дозволяє мінімізувати пульсації моменту, а також виключити акустичний шум і вібрацію. Переваги даного алгоритму комутації знайшли своє використання у високопродуктивних та високоефективних приводах. Усім вище перерахованим алгоритмам необхідна інформація про положення ротора, яка надходить від датчиків Холла, що встановлені на статорі. Використовуючи три датчики Холла, можна реалізувати трапецієподібну комутацію на основі комбінаційної логіки, яка не потребує складної керуючої електроніки. Інші

методи вимагають складнішої обчислюваної потужності і зазвичай застосовують мікроконтролер. Також можна дізнаватися поточне знаходження ротора без давача, наприклад за контролем проти-ЕРС на незбудженій фазі. Це один більш складний, що вимагає досить потужного процесора, і дуже ефективний метод - це поле-орієнтоване керування.

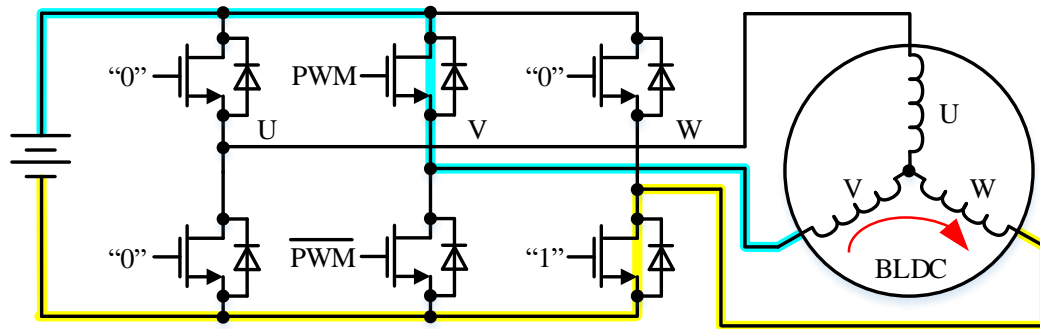


Рисунок 1.12 – Керування трифазним безколекторним двигуном з трьома напівмостами

Безколекторні двигуни стають все більш популярними, заповнюючи все більше сфер використання. У порівнянні з його щітковим аналогом, має більш високу ефективність, через відсутність щіток - високу надійність, має набагато більший термін служби та нижчий електричний та акустичний шуми. Але BLDC вимагають складнішої електроніки, тому загальна вартість безколекторного приводу вище. Ці машини відмінно працюють як приводні двигуни, сьогодні використовуються для всюдиходів, дронів, протезів кінцівок, сервісних та бойових роботів.

1.4.3 Кроковий двигун

Кроковий двигун - це електрична машина, вал якої обертається на фіксовану кількість градусів, тобто переміщується кроками, звідки і походить його назва. Можливо це завдяки конструкції двигуна, що дозволяє дізнатися точне кутове положення валу, без використання датчиків. Ротор може бути різної форми та структури [37]. З постійними магнітами – показує високий та стабільний момент що крутить, але не придатний для великої швидкості обертання. Ротор зі змінним магнітним опором дозволяє працювати при високих

обертах, але не забезпечує весь можливий крутящий момент. Гібридний ротор увібрав переваги усіх вище перерахованих версій, але із-за складного конструктивного виконання має вищу вартість. Статор представляє собою зубці, на які намотані котушки, необхідні для створення магнітного поля. У свою чергу має різне виконання: в залежності від кількості пар полюсів та численності незалежних котушок (фаз). За виглядом обмоток виділяють два типи крокових двигунів. Уніполярний - має одну обмотку на фазу з відгалуженням у центрі, потребує простішу схему керування (рис. 1.13), але із-за структурної особливості не може забезпечити максимальний магнітний потік. Двополярний – має одну обмотку на фазу, тим самим досягається максимальний крутний момент, користується найбільшою популярністю.

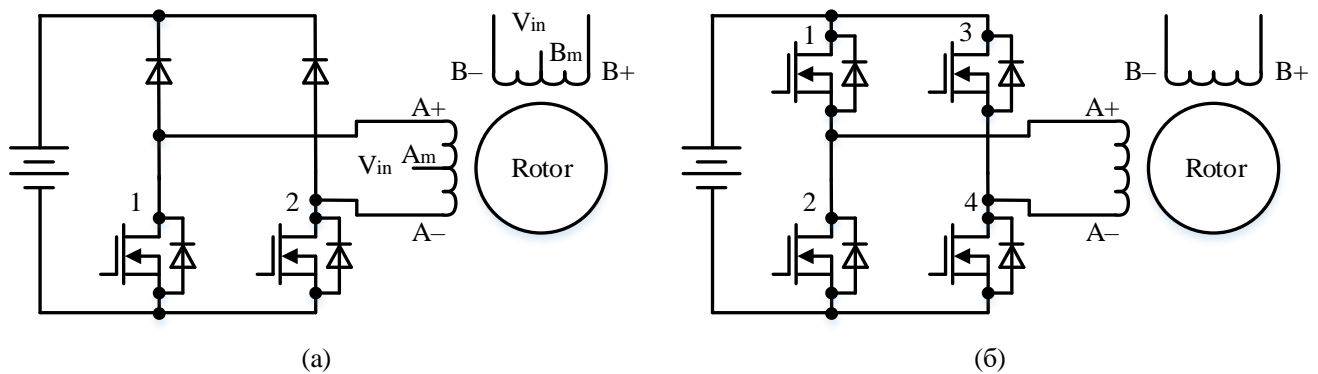


Рисунок 1.13 – Схеми керування кроковим двигуном. (а) Уніполярним.

(б) Двополярним

Принцип роботи двигунів базується на орієнтації магнітного поля ротора з магнітним полем одної або декількома котушками, на які подається живлення. Завдяки послідовній подачі струму на різні фази, досягається бажане положення.

Існує чотири алгоритми керування крокових двигунів (режими) [38]. У **хвильовому режимі** одночасно подається живлення лише на одну фазу, недоліком є великий крок обертання, та не можливість досягти максимального моменту, так як працює тільки одна котушка. У **повнокроковому режимі** дві фази завжди забезпечені напругою одночасно. Кроки обертання аналогічні як у хвильовому режимі. Але відмінність полягає в тому, що в двигун має вищий момент що крутить, оскільки створюється сильніше магнітне поле.

Напівкроковий режим є поєднанням хвильового і повнокрокового алгоритмів. Дозволяє вдвічі зменшити розмір кроку пересування валу двигуна. Недоліком є те що спрацьовує різна кількість котушок (фаз), як результат не можливо забезпечити постійний момент що крутить. **Мікрокроковий режим** – це вдосконалення напівкрокового режиму. Дозволяє забезпечити постійний обертовий момент, та зменшити розмір кроку. Алгоритм заснований на контролю величини сили струму, що направляється до кожної фази. Але для обчислень вимагає більш продуктивного керуючого драйверу.

Для реалізації алгоритмів керування для кожної фази використовується транзисторний міст (рис 1.13), що фізично управляє електричним з'єднанням котушок двигуна. Для узгодження спрацювання ключів, забезпечуючи необхідну напругу та струм, відповідає драйвер, що у свою чергу керується мікроконтролером.

Однією з важливих переваг крокових двигунів є визначення положення двигуна без допоміжних пристроїв, що у свою чергу зменшує вартість та габарити електроприводу. Має великий термін служби. Керування не потребує потужних обчислюваних систем. Деякі алгоритми управління забезпечують високу точність позиціонування, приблизно до $0,007^\circ$. Двигуни на малих обертах гарантують великий крутний момент, мають змогу утримуватися у заданому положенні. До недоліків слід віднести постійне споживання максимального струму, навіть при нерухомому стані, що знижує ефективність. При роботі на високих швидкостях мають низький момент що крутить та досить помітний акустичний шум. При високих навантаженнях є імовірність пропуску кроку, особливо в мікрокроковому режимі.

Данні двигуни переважно застосовуються у пристроях де необхідна висока точність позиціонування, таких як друкуючі головки принтерів, гравірувальні верстати, у фотокамерах, в якості приводу для роботів і тд. Для важких промислових роботів крокові двигуни поки що занадто дорогі і малопотужні.

1.4.4 Асинхронний двигун

Асинхронний двигун [3938] відноситься до найрозповсюдженіших в промисловості двигунів змінного струму. Зарекомендував себе завдяки простій конструкції, високій надійності та низькій вартості. Асинхронний двигун працює за принципом електромагнітної індукції. Обертове магнітне поле статора перетинає нерухомий ротор, тим самим в роторі індукується струм, що змушує його обертатись. Статор складається з тонколистової сталі з отворами для обмоток, від певної послідовності розташування залежить кількість полюсів. Така конструкція значно зменшує негативний ефект вихрових струмів, що виникають при перемагнічуванні сердечника. Ротор буває двох видів: короткозамкнений та з фазним ротором. У першому випадку ротор має форму циліндричного сердечника, що нагадує білячу клітку. Двигун с фазним ротором або також називають з контактними кільцями має в роторі пази для розміщення обмотки, на які подається живлення завдяки контактним кільцям. Дані типи двигунів вимагають наявності зовнішніх резисторів [40] для забезпечення високого пускового моменту. АД з фазним ротором має кращі пускові та регульовальні властивості, проте йому притаманна більша маса, розміри та вартість, ніж з короткозамкненим ротором. Асинхронні двигуни поділяються на два типи: однофазні та трифазні. Як впливає з назви, однофазний АД підключається до однофазного джерела живлення змінного струму, тоді як трифазний АД може бути підключений до трифазного. Однофазний двигун не є самозапускним, та вимагає допоміжних пускових конденсаторів, тоді як трифазний асинхронний двигун має змогу самостійно запускатись. Трифазна обмотка статора електродвигуна може з'єднуватися за схемою "зірка" або "трикутник" залежно від напруги живлення мережі.

Запуск та керування АД має три основні способи: підключення двигуна напряму до мережі, відключення за допомогою пристрою плавного пуску та частотне керування. Перші два не дають змогу повноцінно керувати швидкістю обертання двигуна, а забезпечують лише запуск. Частотне керування у свою

чергу поділяється на скалярне керування та векторне. Саме векторне керування дозволяє точно керувати швидкістю та моментом двигуна та має найефективніші показники з погляду ККД.

Цей тип двигуна використовується в основному для живлення провідних коліс електромобіля, тому може знайти місце і в колісній робототехніці.

1.4.5 Синхронний двигун з постійними магнітами

Синхронний двигун з постійними магнітами один із типів синхронних двигунів змінного струму [41], в якому поле збуджується за допомогою постійних магнітів. СДПМ дуже ефективні, не мають колекторного вузла, працюють на високих швидкостях та забезпечують гарні динамічні характеристики. Двигун надає плавний крутячий момент, має низький рівень шуму і в основному використовується для високошвидкісних додатків, таких як робототехніка. Статор аналогічний як і у асинхронного двигуна. Ротор, як було зазначено раніше складається з постійних магнітів, як правило з самарію-кобальту та міді, або заліза та бору. Широко використовуваним постійним магнітом є неодим-бор-залізо через його меншу вартість та доступність. В залежності від монтування [42] магнітів, ротор може бути з поверхневим розташуванням або з вбудованим. З внутрішнім розташуванням використовується для високошвидкісних задач, так як має більшу конструктивну надійність. Коли на статор подається трифазний змінний струм, створюється обертове магнітне поле що індукуються з полем, створюваним постійними магнітами. Це дозволяє ротору обертатись синхронно з полем статора, звідки і походить назва. СДПМ не мають змогу самозапущатися, тому необхідно керувати змінною частотою статора електронним способом.

Системи керування двигунів з постійними магнітами мають досить велику різноманітність. Звичайно вибір залежить від конкретно необхідних виконаних задач електропривода.

Загалом усе керування можна розділити на два основні види, це трапецеїдальне та синусоїдне.

До **трапецієподібної** категорії відносяться:

- Схема без зворотного зв'язку. Відрізняються своєю простотою, але не підходить для керування моментом який змінюється;
- Схема з зворотнім зв'язком реалізованим за допомогою датчика положення. Виникають пульсації моменту, та присутня необхідність додаткових пристроїв, які по-перше дещо збільшують вартість, а по-друге роблять систему менш надійною;
- Схема з зворотнім зв'язком без датчика. Потребує більшої обчислювальної потужності. Не підходить для роботи на низьких обертах, та має пульсації моменту.

До **синусоїдальної** категорії відносяться:

- Скалярне керування. Не підходить для точного керування зі змінним статичним моментом;
- Векторне керування, що у свою чергу поділяється на полеорієнтоване управління та пряме керування крутним моментом. Мають ефективні динамічні характеристики та великий діапазон регулювання.

Не дивлячись на всі переваги СДПМ, найбільшим недоліком є його вартість, що вища за інші типи двигунів.

1.4.6 Синхронний реактивний двигун

Синхронний реактивний двигун (СРД) був винайдений близько 100 років тому, але через складність розв'язання задачі керування не користувався популярністю. Зростання технології силової електроніки дозволило масово виробляти прості та дешеві частотні перетворювачі, цим вдалося вирішити проблему управління даного двигуна. А вражаючі показники ефективності роблять СРД фаворитами серед різних електричних машин. СРД працює за принципом реактивного опору [43], та обертається синхронно з полем статора. Трифазна обмотка статора може бути розподіленою або зосередженою, а також з'єднана за схемою зірка або трикутник. Ротор у цьому двигуні не має ні обмотки збудження, ні постійних магнітів, за формою є несиметричним, та виготовленим

з феромагнітного матеріалу. Виділяють три основні типи ротора (рис. 1.14) реактивного двигуна: ротор з явно вираженими полюсами, аксіально-розширений ротор і поперечно-розширений ротор. При подачі напруги на обмотки статора, створюється магнітне поле, що обертається. При перетині ротора магнітним полем створюється сила, яка намагається вирівнятися з магнітним полем статора.

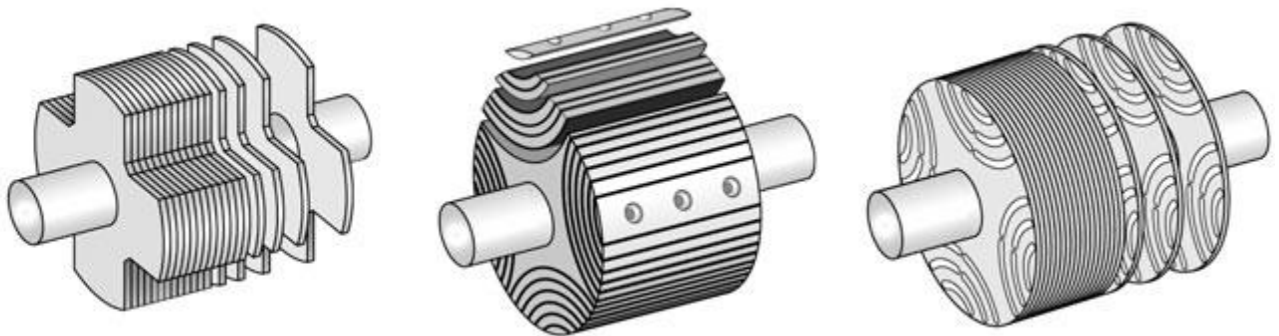


Рисунок 1.14 – Конструкція ротора СРД: а) явнополюсний; б) аксіально-розширений ротор; в) поперечно-розширений ротор

Синхронні реактивні двигуни характеризуються високою енергоефективністю, надійністю та компактністю, міцністю та конструктивною простотою. У вузлі ротора відсутні струми, тим самим виключають наявність втрат, і нагрівання при тривалій експлуатації. Завдяки тому, що в роторі немає рідкісноземельних магнітів, СРМ має нижчу вартість порівняно з СДПМ. Момент інерції у цих двигунів менший, що позитивно впливає на динаміку розгону. З недоліків можна назвати основний, це низький коефіцієнт потужності.

До типових сфер застосування [44] СРД зазвичай відносять пристрої з механічною вентиляторною характеристикою: насоси, вентилятори, компресори. Використовуються для транспортування вантажів у конвеєрах та транспортерах. В даний час цей тип двигуна стає дуже популярним для електричних та гібридних транспортних засобів.

1.5 Системи керування колісними роботами

Системи колісних роботів відрізняються наявністю пружних передач, які з часом можуть змінюватися разом з параметрами, та наявністю редукторів, які в процесі експлуатації зношуються. При русі завжди діє змінний момент вітрового навантаження та сухого тертя. Все це негативно впливає на точність керування даних пристроїв, генеруючи відхилення та помилки, що недопустимі при роботі з персоналом або у небезпечному середовищі. Тому системи керування колісних роботів мають забезпечувати належну надійність, високу швидкодію, керованість, точно відпрацьовувати задану траєкторію руху та мати необхідний запас стійкості.

1.5.1 Методи побудови систем керування

В умовах дії різних збурень, при зміні параметрів об'єкта та наявності нелінійностей, дуже складно забезпечити задані динамічні властивості. Тому сучасна теорія керування пропонує декілька напрямків вирішення завдання [45].

В середині двадцятого століття, почала круто розвиватися теорія самоналагоджувальних систем. Принцип базується на адаптації системи, яка штучно створює ефект пристосування до умов, що змінюються. За рахунок адаптивного керуемого пристрою, система зчитує, обробляє та аналізує бракуючу інформацію про керований об'єкт. Цей підхід дозволяє знизити вплив невизначеності на якість керування шляхом компенсування недоліків апріорної інформації про керований процес на стадії проектування. Розрізняють два види адаптивних систем:

- непрямі – ідентифікують параметри на основі використання його моделі, що будується;
- прямі – використовують безпосередньо модель керуемого пристрою;
- квазіпрямі – використовують налаштування прогнозуючої моделі (упереджувача) що відрізняється від моделі об'єкту.

Але використання таких систем дещо обмежене, оскільки вимагає досить складної технічної реалізації. Необхідність у швидкодіючому контурі

самоналаштування, досить повільні зміни параметрів або точного аналітичного опису об'єкта керування. Тим паче, принцип адаптації не передбачає усунення впливу координатних обурень на властивості замкнутих систем.

В теорії інваріантності були виконані декілька інших підходів до побудови систем з низькою чутливістю до зовнішніх збурень. Сама концепція теорії основана на принципі комбінованого керування, це означає, що керування відбувається як за відхиленням, так і по зовнішніх задаючій і обурюючій діях. В замкнутій системі керування, введення додаткових зв'язків за збурюючій та задаючій діях не змінює характеристичного полінома. Оскільки збурення виміряти досить складно, тому потужний інтерес представляє метод непрямих оцінок параметрів. Даний алгоритм використовує поточну інформацію, яка надається в реальному масштабі часу. Ці методи синтезу входять до структур керуючих пристроїв, які мають моделі обурюючих дій (метод внутрішніх моделей). Але, потрібне завдання точної моделі збурення у вигляді диференціального або різницевого рівняння (моделі формуючого фільтру). Або рішення задачі ідентифікації збурень з використанням наявної інформації. Нажаль, неповна ідеалістична та поточна інформація про збурення утрудняє вибір адекватних математичних моделей (ідентифікацію по непрямих вимірах). Опис характерних для технологічних об'єктів керування нестационарних і стрибкоподібно змінних збурень потребує використання складних багатопараметричних моделей. Але в той же час, це ускладнює систему керування. А збільшення числа оцінюваних параметрів, впливає на збільшення похибок оцінювання внаслідок некоректності завдання ідентифікації по непрямих вимірах. У ряді випадків наявних вихідних даних взагалі виявляється недостатньо для обґрунтованого вибору відповідної моделі, що робить неможливою саму постановку завдання ідентифікації збурень. В межах комбінованого управління не має змоги забезпечити не лише низьку чутливість до параметричних збурень, але і точність компенсації зовнішніх дій.

З широким впровадженням в теорію автоматичного керування методів простору станів, а також методів алгебри і диференціально-геометричних

алгоритмів, дозволило представити новий етап у розвитку теорії інваріантності. Це дає змогу перейти до представлення завдань синтезу багатовимірних інваріантних систем з багатьма входами і виходами. Однак, практичне використання умов інваріантності у формі абстрактної алгебри ускладнене і вимагає вирішення ряду допоміжних завдань, що часто носять складний характер.

Для синтезу високоточних систем керування, вживання теорії чутливості, що забезпечують низьку чутливість до параметричних збурень, не дає необхідного ефекту внаслідок значного ускладнення, а інколи відсутньої адекватної реалізації знайденого алгоритму керування. Крім того, по відношенню до зовнішніх обурень, використання алгоритмів теорії чутливості не надає системі властивостей інваріантності

Ще один варіант побудови замкнутих систем керування з заданими показниками якості може бути представлено у вигляді теорії модального керування. Базується дана теорія на синтезі регулятора, що дає змогу представити на комплексній площині полюси замкнутої системи бажаним чином, а також задати необхідну швидкість зміни відповідним їм складовим перехідного процесу. Зазвичай використовують злічені розподіли кореня на комплексній площині, як бажаний розподіл кореня характеристичного рівняння замкнутої системи.

Бажані прямі показники якості управління можуть бути математично подано у вигляді еталонного руху або еталонної керованої системи. Але необхідно враховувати можливість відтворення реальною системою еталонного руху при конкретних параметрах об'єкту керування, а також заданих обмеженнях на керовану дію, та окремі змінні стану.

Принцип комбінованого керування є досить популярним, але в той же час, вимагає інформації про зміну збурюючої дії, що ускладнює процес реалізації системи керування.

До синтезу нелінійних систем керування відносять роботи по кусочно-безперервних функціях Ляпунова.

Вживання рядів Вольтера дозволяє представити нелінійні системи у вигляді послідовно-паралельного з'єднанні лінійних і нелінійних частин. Це призводить до появи багатовимірних передавальних функцій, на підставі яких здійснюється синтез керуючої дії.

1.6 Висновки до першого розділу

Важливо відзначити, що в останні роки розвиток мобільних роботів дозволив досягти значних успіхів у різних галузях людської діяльності завдяки широкому спектру сфер, в яких можливе їх використання. Кількість можливих реалізацій колісних мобільних роботів практично безкінечна, що залежить від кількості, типу, геометричних характеристик та моторизації коліс.

У даному розділі порівняно усі типи коліс: звичайне, рульове, самовстановлюване, шведські і сферичні колеса. Кожен тип колеса використовується в залежності від поставлених завдань до проектного механізму. Звичайні колеса міцні, але не забезпечують таку маневреність, як шведські колеса. Однак всеспрямовані колеса мають складну конструкцію виготовлення і високу чутливість до умов пересування по поверхні.

У роботах знайшли застосування практично всі відомі типи приводів: синхронний, диференціальний, всеспрямований та Акермана. Диференційний привод – найчастіше використовувана форма системи пересування у роботах, оскільки її найпростіше реалізувати. Недоліками диференціального приводу є його залежність від самовстановлюваного колеса, яке погано працює на високих швидкостях, і труднощі під час руху по прямій, оскільки для цього потрібно, щоб обидва двигуни працювали з однаковою швидкістю. Всеспрямовані колісні мобільні роботи зазвичай використовують комбінацію з трьох-чотирьох *omni* або *mesapunt* колеса. Неголомні колісні роботи не можуть рухатися вбік або паралельно осі валу. Прикладом є рульове керування Акермана, яке найчастіше використовується в автомобілях. Синхронний привод краще підходить для переміщення по рівним поверхням, оскільки має дуже чутливу навігацію.

Продемонстровано використовувати двигуни для створення приводу мобільного колісного робота. Колекторний двигун здатен створювати високий початковий крутящий момент, має просте керування швидкістю. Однак недоліком є щітко-колекторний вузол, який вимагає більш високого рівня обслуговування в порівнянні з іншими двигунами. Безколекторний двигун, завдяки позбавленню щіток, більш технологічно досконалий. Ефективний і забезпечує високий пусковий момент, що крутить, широко використовуються як колісні двигуни в робототехніці. Кроковий двигун керується імпульсними командними сигналами і може зупинятися точно в заданій точці без використання гальм або вузлів зчеплення. Але для утримання заданого положення вони споживатимуть енергію. Двигуни змінного струму в потужній колісній техніці використовуються більше ніж двигуни постійного струму, оскільки вони дешевші та ефективніші, їх обирають більшість великих виробників електромобілів. З аналізу системи керування, не має однозначного рішення, все залежить від індивідуального підходу.

І хоча дослідження, проведені на сьогоднішній день, зробили значний внесок у розробку та концепцію мобільного робота, до ідеального виконавчого пристрою ще далеко. Тому все ще необхідно досліджувати як конструктивну частину робота так і поліпшувати системи приводів та алгоритми керування.

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ДВИГУНА І СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

В даному розділі розглядається алгоритм розрахунку приводних двигунів мобільного робота з диференціально-керованою системою приводу. Конструкція робота має вигляд одновісного шасі, яка складається з двох незалежних активних колес та додатково самовстановлюючим колесом для забезпечення стійкості. Це рішення забезпечує чудову мобільність. Представлено розрахунок силової частини системи керування колесним роботом, та вибір відповідних складових, таких як: силові ключі та драйвери керування інвертором, фільтр зарядного кола, давачі струму та напруги.

2.1 Розрахунок приводів

Для реалізації простої конструкції робота, але у той же час статично стабільної, найбільш широко використовуються конструкції з трьома колесами, два приводні та одне допоміжне (рис. 2.1). Рульове керування планується реалізувати перемиканням напрямків та швидкостей обертання двох двигунів.

Так як проєктований робот призначений для вантажно-грузових робіт у складі, для розрахунку задамо попередні параметри, які наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри проєктованого колісного робота

Параметр	Значення
Маса робота, [кг]	1000
Грузопідйомність, [кг]	500
Радіус колеса, [м]	0.3
Габаритні розміри (д х в х ш), [м]	2.0 x 1.5 x 1.0
Максимальна швидкість, [м/с]	5.6 м/с (20 км/год)
Максимальний доланий кут нахилу, [°]	15
Швидкість зустрічного вітру, [м/с]	0
Прискорення, [м/с ²]	0.5

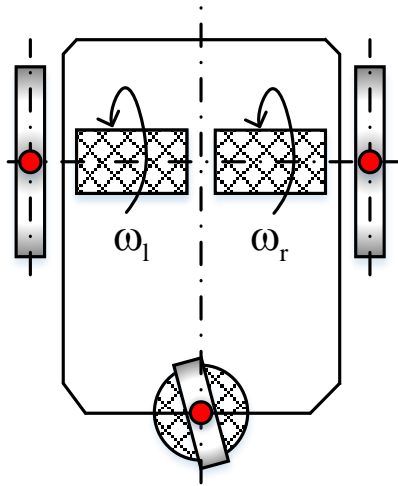


Рисунок 2.1 – Тип платформи колісного робота

Так як проєктований робот призначений для вантажно-грузових робіт у складі, для розрахунку задамо попередні параметри, які наведено у табл. 2.1.

Можливість пересування будь-якого колісного транспорту визначається такою нерівністю [46]:

$$F_t \geq \sum F_i, \quad (2.1)$$

де F_t – сила тяги всіх двигунів колісного робота, [Н];

F_i – сума всіх сил супротиву колісного робота, [Н].

Розглянемо завдання тягового розрахунку робота, як проєкції усіх сил що діють. Модель колісного робота статично визначена, тому підлягає розв'язку, якщо прийняти ряд припущень:

- конструкція колісного мобільного робота є твердою та симетричною платформою;
- при русі, колеса не деформуються і рівновіддалені від центру мас;
- рух робота виконується без просковзування.

Розглянемо ескіз в плоскому вигляді, врахувавши корпус і шасі робота (рис. 2.2), сила тиску розподіляється по трьом колесам, а сила тяги надається тільки від двох. Як бачимо завади руху транспортного засобу включають: опір моментів кочення, аеродинамічного супротиву, та опір підйому в гору.

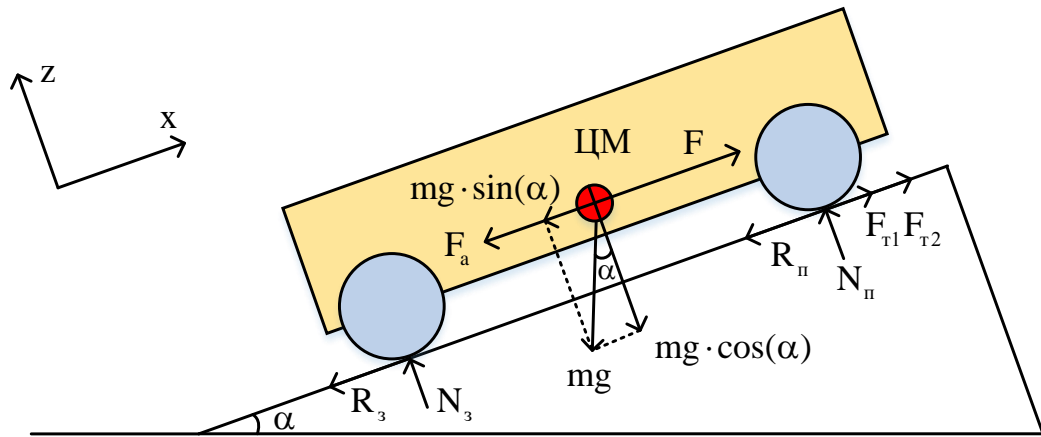


Рисунок 2.2 – Розстановка діючих сил

Запишемо другий закон Ньютона для даної системи в проекції на вісь Ox :

$$ma = F_{T1} + F_{T2} - 2R_{\Pi} - R_3 - mg \cdot \sin(\alpha) - F_a, \quad (2.2)$$

де m – маса автомобіля, [кг];

a – прискорення, [$\text{м}/\text{с}^2$];

g – прискорення вільного падіння, [$\text{м}/\text{с}^2$];

F_{T1}, F_{T2} – сила тяги першого та другого двигуна, [Н];

R_{Π}, R_3 – сила тертя кочення переднього та заднього колеса, [Н];

N_{Π}, N_3 – нормальна реакція опори переднього та заднього колеса, [Н];

F_a – сила аеродинамічного супротиву, [Н];

α – кут нахилу площини руху, [$^\circ$].

Розглянемо [47] сили, які діють колесо (рис. 2.3).

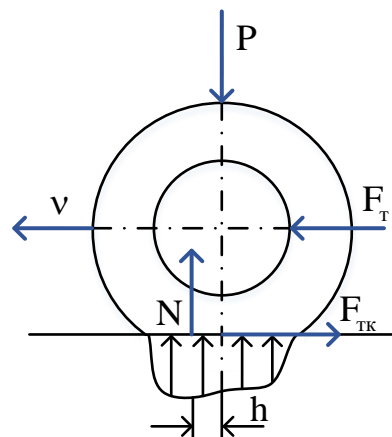


Рисунок 2.3 – Сили, що діють на колесо

З рисунка 2.3 видно, що на колесо діють 4 сили:

- P – вертикальне навантаження (дорівнює вазі робота);
- N – сила реакції опори (пропорційна силі тиску);
- $F_{\text{тк}}$ – сила тертя кочення;
- $F_{\text{т}}$ – сила тяги приводу.

Під час руху робота колеса продавлюють поверхню, тиск у передній половині контактній площині більше, ніж у задній половині. Це явище призводить до того, що сила реакції опори дещо зміщується вперед. Момент, створюваний зміщенням уперед результуючої сили реакції землі, називається моментом опору кочення. Щоб колесо продовжувало котитися, потрібна сила, що діє на центр колеса, щоб врівноважити цей момент опору коченню. Ця сила виражається як сила тертя кочення:

$$F_{\text{тк}} = Pf_{\text{т}}, \quad (2.3)$$

де $f_{\text{т}} = h / r_{\text{к}}$ – коефіцієнтом опору кочення;

$r_{\text{к}}$ – радіус шини, [м].

Коли транспортний засіб експлуатується на похилій поверхні, вертикальне навантаження P має бути замінене складовою перпендикулярної поверхні дороги:

$$F_{\text{тк}} = Pf_{\text{т}} \cdot \cos(\alpha) = mg \cdot f_{\text{т}} \cdot \cos(\alpha). \quad (2.4)$$

Коефіцієнт опору коченню $f_{\text{т}}$ залежить від матеріалу шини, конструкції шини, температури шини, тиску в шині, геометрії протектора, шорсткості дороги, дорожнього матеріалу та наявності або відсутності рідин на дорозі. Типові значення коефіцієнтів опору коченню різних дорогах наведено у табл. 2.2.

Основною силою, що перешкоджає підйому робота на похилій площині, є сила опору підйому, яка пропорційна силі тяжіння. Її ще називають силою скочення, та спрямовується паралельно поверхні руху. Вона визначається наступним виразом:

$$F_n = mg \cdot \cos(\alpha). \quad (2.5)$$

Транспортний засіб, що рухається з певною швидкістю в повітрі, стикається з силою, що перешкоджає його руху. Ця сила називається аеродинамічний опір. В основному це відбувається через два компоненти: опору форми робота та тертя корпусу.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти опору коченню

Умови	Коефіцієнт опору коченню
Автомобільні шини на бетонній або асфальтованій дорозі	0.013
Автомобільні шини на укатаній гравійній дорозі	0.02
Бітумний щебінь	0.025
Грунтова дорога	0.05
Поле	0.1-0.35
Вантажна шина на бетонній або асфальтованій дорозі	0.006-0.01
Колесо на залізній рейці	0.001-0.002

Аеродинамічний опір залежить від швидкості транспорту V , лобової площі A_f , форми кузова та щільності повітря ρ :

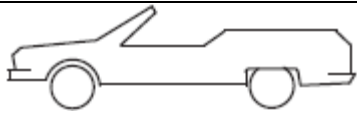
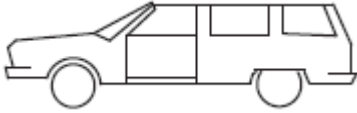
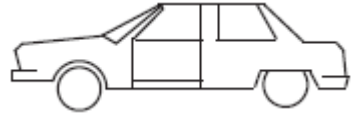
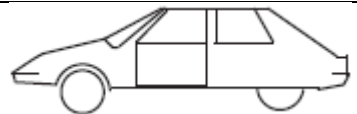
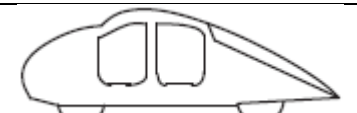
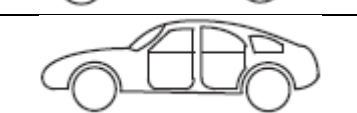
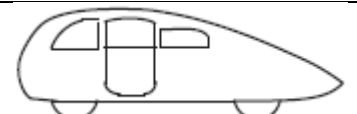
$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V - V_B), \quad (2.6)$$

де C_D – коефіцієнт аеродинамічного опору, що характеризує форму корпусу транспортного засобу;

V_B – швидкість зустрічного вітру (має позитивний знак, коли ця складова спрямована в тому ж напрямку, що і рух робота, і негативний знак, коли вона протилежна), [м/с].

Коефіцієнти аеродинамічного опору для типових форм кузова транспортних засобів показано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти аеродинамічного опору

Тип транспортного засобу	Аеродинамічний коефіцієнт опору
	0.5...0.7
	0.5...0.7
	0.4...0.55
	0.3...0.4
	0.2...0.25
	0.23
	0.15...0.2
Вантажівки, автопоїзди	0.8...1.5
Автобуси	0.6...0.7
Автобуси обтічної форми	0.3...0.4
Мотоцикли	0.6...0.7

Використовуючи формули (2.2), (2.4), (2.5) та (2.6), запишемо рівняння тягового балансу мобільного колісного робота для розрахунку потужності приводів. Підставимо параметри робота, взяті з табл. 2.1. Густина повітря було прийнято при температурі $+5^{\circ}\text{C}$ повітря $1.269 \text{ [кг/м}^3\text{]}$, коефіцієнт аеродинамічного опору було вибрано згідно форми моделі $C_D = 0.5$, коефіцієнт тертя при взаємодії колес з бетонною або асфальтовою дорогою становить $f_r = 0.013$.

$$\begin{aligned}
 F_T &= ma + mg \cdot \sin(\alpha) + mg \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V - V_B) = \\
 &= 1500 \cdot 0.5 + 1500 \cdot 9.81 \cdot \sin(15^\circ) + 1500 \cdot 9.81 \cdot 0.013 \cdot \cos(15^\circ) + \\
 &+ \frac{1}{2} \cdot 1.269 \cdot (1.0 \cdot 1.5) \cdot 0.5 \cdot (5.6 - 0) = 4764.2 \text{ [Н]}.
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Звідси випливає, що сила тяги приводів робота витрачається на подолання сил опору руху та для забезпечення потрібної сили для розгону.

Вважаючи, що маса рівномірно розподіляється по всіх 3 колесах, а сила тяги створюється двома приводами, обчислимо потужність, яку необхідно розвивати одному двигуну:

$$P_{\text{дв}} = F_T \cdot V \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\eta_p} = 4764.2 \cdot 5.6 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0.95} = 14041.9 \text{ [Вт]},
 \tag{2.8}$$

де n – кількість приводів;

η_p – ККД редуктора.

Необхідний момент колеса, обчислюється за такою формулою:

$$M_{\text{кол}} = F_T \cdot r_k \cdot \frac{1}{n} = 4764.2 \cdot 0.3 \cdot \frac{1}{2} = 714.63 \text{ [Нм]},
 \tag{2.9}$$

де r_k – радіус колеса, [м].

З наведених вище розрахунків обираємо синхронний реактивний двигун Oemer QSR – SincroSPE серії 100P [48]. Основні параметри двигуна наведенні в таблиці 2.4.

Розрахунок максимальної вихідної швидкості обертання для вибору редуктора:

$$n_{\text{вих}} = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 5.6}{\pi \cdot 0.6} = 178.34 \text{ [об / хв]},
 \tag{2.10}$$

де D – діаметр колеса, [м].

Передатне число редуктора визначається:

$$i_p = \frac{n_{\text{вх}}}{n_{\text{вих}}} = \frac{4000}{178.34} \approx 20, \quad (2.11)$$

де $n_{\text{вх}}$ – кількість обертів вхідного валу редуктора, тобто обороти електродвигуна, [об / хв];

$n_{\text{вих}}$ – необхідна кількість обертів вихідного валу редуктора, [об / хв].

Таблиця 2.4 – Параметри SRM Oemer QSR – SincroSPE 100P

Параметр	Значення
Робоча напруга, [В]	380
Номінальний крутний момент (безперервний), [Нм]	52.7
Максимальний крутний момент (піковий), [Нм]	120
Номінальна потужність, [кВт]	14.4
Номінальна швидкість, [об / хв]	2600
Максимальна швидкість, [об / хв]	4000
Номінальний струм, [А]	35.3
Момент інерції, [кг · м ²]	0.037
Вага, [кг]	70
ККД, [%]	93.2

Для проекту було обрано планетарний редуктор [49] компанії SITI NRG 20 з параметрами представленими у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри редуктора SITI NRG 20

Параметр	Значення
Вхідна потужність, що застосовується, [кВт]	17.63 Нм
Номінальний крутний момент, [Нм]	1157
Максимальний крутний момент, [Нм]	2000
Передаточне відношення	19.8

Після вибору редуктора, знаючи передаточне число, перевіряємо обраний двигун за забезпеченням належного моменту:

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{кол}}}{i_p} = \frac{714.63}{20} = 35.8 \text{ [Нм]}. \quad (2.12)$$

2.2 Розрахунок акумуляторної батареї

Напруга в ланці постійного струму:

$$U_{dc} = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 380 \approx 540 \text{ [В]}, \quad (2.13)$$

де U – робоча напруга двигуна.

Ємність акумуляторної батареї, для живлення приводних двигунів робота, запас енергії яких має вистачати на 2 години безперервної роботи, визначається як:

$$Q = \frac{n \cdot P_{дв} \cdot t}{U_{dc} \cdot k} = \frac{2 \cdot 14.4 \cdot 10^3 \cdot 2}{540 \cdot 0.7} = 152.4 \text{ [А} \cdot \text{год]}, \quad (2.14)$$

де n – кількість двигунів;

$P_{дв}$ – потужність двигуна, [Вт];

t – необхідний час роботи, [год];

k – коефіцієнт використання АКБ, [%].

Так розраховується мінімальна ємність. Найчастіше слід розраховувати обсяг АКБ із невеликим запасом (наприклад, 20%). У такому випадку батарея пропрацює максимальну кількість часу. Розрахунок виглядатиме так:

$$Q_{бат} = 1.2 \cdot Q = 1.2 \cdot 152.4 = 182.9 \text{ [А} \cdot \text{год]}. \quad (2.15)$$

Вибираємо акумулятор LiFePO4 EVE Energy 3.2V 50Ah [50], параметри наведені в табл. 2.6. У порівнянні зі свинцево-кислотними, продуктивність LiFePO4 значно вища. Показники різняться у 1.5 рази за однаковий проміжок часу роботи. Використовувати літій фосфатні акумулятори можна за температури від -20°C до $+56^{\circ}\text{C}$. Літій фосфатні акумулятори LiFePO4 відрізняє тривалий час експлуатації. Їх можна використати більш ніж 15 років.

Таблиця 2.6 – Параметри LiFePO4 EVE Energy 3.2V 50Ah

Параметр	Значення
Тип	LiFePO4
Ємність	50Ah
Постійний струм розряду	150A
Максимальний струм розряду	250A
Максимальний зарядний струм	50A (рекомендований 10)
Внутрішній опір	$\leq 0.7\text{m}\Omega$
Верхня напруга	3.65v
Робоча напруга	3.2v
Нижня напруга	2v
Кількість циклів	3500
Діапазон робочих температур	-20 ° C до +55 ° C
Габаритні розміри	180 * 135 * 29.3 мм
Вага	1395 г

Знаходимо кількість з'єднаних послідовно акумуляторів:

$$N_{\text{посл.}} = \frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{CELL}}} = \frac{540}{3.2} = 169 \text{ [шт.]}. \quad (2.16)$$

Знаходимо кількість з'єднаних паралельно акумуляторів:

$$N_{\text{пар.}} = \frac{Q_{\text{BAT}}}{U_{\text{CELL}}} = \frac{182.9}{50} = 4 \text{ [шт.]}. \quad (2.17)$$

Загальна кількість акумуляторів:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{посл.}} \cdot N_{\text{пар.}} = 169 \cdot 4 = 676 \text{ [шт.]}. \quad (2.18)$$

2.3 Розрахунок силової частини

Загальний вигляд функціональної схеми електромеханічної системи зображено на рис. 2.4. Так як живлення транспортного засобу відбувається від АКБ, то відсутня необхідність у вхідному фільтрі, випрямлячі та клампері.

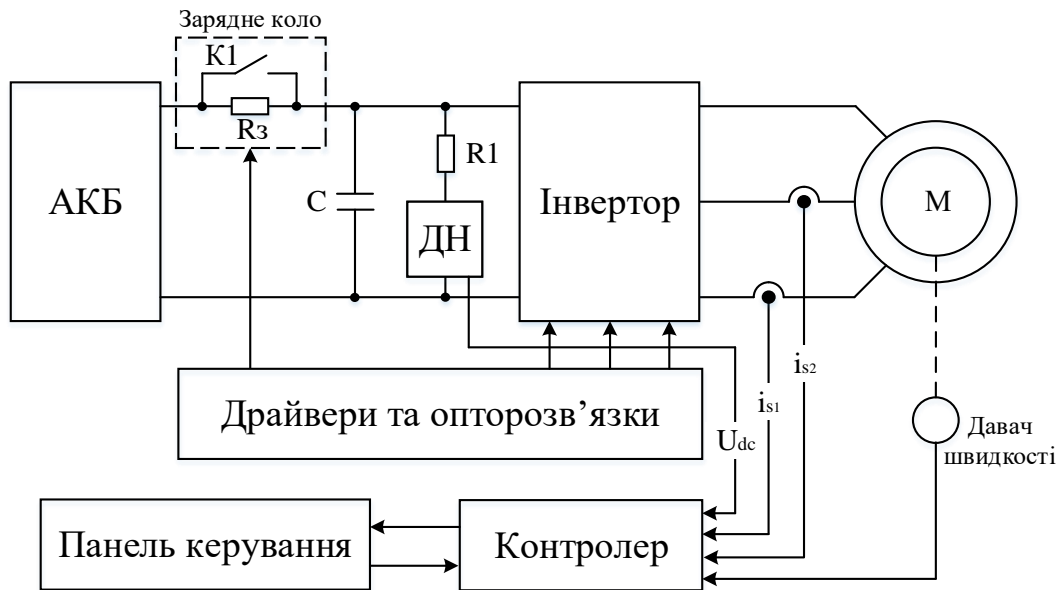


Рисунок 2.4 – Функціональна схема електромеханічної систем

2.3.1 Розрахунок автономного інвертора

Інвертор – перетворює постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої (усереднений на періоді ШІМ) має заданий модуль, частоту та кутове положення.

Вибір IGBT транзисторів здійснюється за критерієм:

$$\begin{aligned} I_C &> (1.1 \div 1.2) I_{\max}, \\ U_{CE} &> 1.5 U_{\max}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

де I_C та U_{CE} – відповідно тривалий струм колектору та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT.

Для вибраного двигуна максимально споживаний струм $I_{\max} = 81.2$ [A], максимальна напруга складає $U_{\max} = 540$ [B]. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку. Для побудови силової частини перетворювача зручно використовувати так звані IGBT-модулі, які в одному корпусі містять 2, 4 або 6 транзисторів з антипаралельними діодами.

Вибираємо по каталогу IGBT модуль компанії Infineon типу FF100R12RT4 [51] з параметрами $U_{CE} = 1200$ [B], $I_C = 100$ [A].

2.3.2 Розрахунок драйвера керування ключами

Драйвери – перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання IGBT ключів. Фактично драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Досить часто драйвери додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання інвертора.

Драйвер обирається за значенням пікового струму, виникаючого при перемиканні ключа, та залежить від параметрів обраного IGBT транзистора:

$$I_{G(\text{peak})} = \frac{(U_{G(\text{ON})} - U_{G(\text{OFF})})}{R_G + R_{G(\text{int})}} = \frac{(15 - (-5))}{7.5 + 1.6} = 2.2 \text{ [A]}, \quad (2.20)$$

де $U_{G(\text{ON})}/U_{G(\text{OFF})}$ – напруги відкриття/закриття транзистора, [В];

$R_{G(\text{int})}$ – внутрішній опір бази, [Ом];

R_G – рекомендоване значення резистора в колі бази транзистора, [Ом].

Обираємо однофазний (для верхнього та нижнього транзисторів) драйвер фірми Semikron типу SKHI 21A R [52] з параметрами: напруга зсуву до $U_{CE} = 1200$ [В], максимальний струм $I_{\text{outPEAK}} = 8$ [А].

Визначимо необхідну потужність джерела живлення драйвера:

$$\begin{aligned} P_{GD} &= Q_G \cdot f_{\text{sw}} \cdot (U_{G(\text{ON})} - U_{G(\text{OFF})}) = \\ &= 0.8 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot (15 - (-5)) = 0.08 \text{ [Вт]}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де Q_G - кількість необхідного заряду для відкриття/закриття транзистора, [Ф];

f_{sw} - частота перемикання ключів, [Гц].

Для забезпечення живлення драйвера, опираючись на залежність $P_{DC/DC} \geq P_{GD}$, обираємо DC/DC перетворювач типу TBA 1-2413 [53] з параметрами: діапазон вхідної напруги 21.6-26.4 [В], вихідна напруга 15 [В], вихідний максимальний струм 65 [мА], потужність 1 [Вт].

2.3.3 Розрахунок ємнісного фільтра для зарядного кола

Виконуємо розрахунок номінального значення струму ланки постійного струму, враховуючи перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} \cdot P_n}{U_{dc} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{інв}} = \frac{3 \cdot 14.4 \cdot 10^3}{540 \cdot 0.932 \cdot 0.95} = 90.4 \text{ [A]}, \quad (2.22)$$

де $k_{ovl} = 3$ – перевантажувальна здатність.

Зарядний опір конденсаторного фільтра:

$$R_3 = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{540}{90.4} = 5.97 \text{ [Ом]}. \quad (2.23)$$

Ємність фільтра визначається за формулою:

$$C = \frac{I_{dc}}{\Delta U f_{sw}} = \frac{90.4}{30 \cdot 10^4} = 301 \cdot 10^{-6} \text{ [мкФ]}, \quad (2.24)$$

де $\Delta U = 30$ – пульсації напруги, [В];

$f_{sw} = 10^4$ – частото широтної модуляції, [Гц].

Обираємо конденсатор МКР1848С73280JY5 [54] з ємністю 320 [мкФ] та напругою 800 [В].

Розрахуємо зарядний резистор, при цьому враховуємо максимальний зарядний струм яким можна заряджати конденсатор – 55 [А].

$$R_3 = \frac{U_{dc}}{I_c} = \frac{540}{55} = 9.3 \text{ [Ом]}, \quad (2.25)$$

Обираємо резистор HSA5010RJ з опором 10 [Ом] та потужністю 50 [Вт] [55].

Час заряду конденсатора рівний:

$$T_c = R \cdot C = 10 \cdot 320 \cdot 10^{-6} = 0.0032 \text{ [с]}. \quad (2.26)$$

2.3.4 Розрахунок давачів струму та напруги

Давач струму можна реалізувати або додатковим проектуванням плати свого давача на основі мікросхем, або скористатися вже готовим рішенням давача на ефекті Холла замкнутого типу. Перший випадок доцільно використовувати у разі розробки у великому обсязі партій, так як розроблений давач коштуватиме в рази дешевше, що приємно вплине на вартість готового виробу. Задача нашого проекту заключається в переобладнанні на електричну тягу одного автомобіля, тому в нашому випадку скористаємося давачем на основі ефекту Холла.

Давач струму обираємо за необхідним максимальним вимірюваним струмом I_{dc} ланки постійного струму, фірми LEM типу НОВ 100-Р [56]. Номінальний струм вимірювання датчика складає 100 [А], діапазон вимірювання досягає 250 [А], напруга живлення – 5 [В].

Канал виміру напруги ланки постійного струму можна реалізувати на основі датчика типу LV-25P [57]. Максимальний струм первинного кола давача складає $I_{pn} = 10$ (мА), $I_{pmax} = 14$ (мА). Тому значення резистору R_1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{DCmax}}{I_{pmax}} = \frac{540}{14 \cdot 10^{-3}} = 38.57 \text{ [кОм]}. \quad (2.27)$$

Обираємо резистор [5858] зі стандартного ряду PTF5638K600BYEK з номіналом $R_1 = 38.6$ [кОм].

2.4 Висновки до другого розділу

В даному розділі для колісного мобільного робота детально розглянуто алгоритм вибору приводних двигунів. Сам аналіз базується на розрахунку усіх можливих сил, що чинять супротив руху, а саме: сила тертя, сила опору підйому та аеродинамічний супротив. Звісно, потужність електроприводу напряму залежить від маси, ваги, габаритів та необхідних поставлених задач. В даному прикладі було обрано два синхронні реактивні двигуни. В даний момент ці

машини є дуже перспективними завдяки простій та надійній конструкції, мають менші габарити та високий ККД, у порівнянні з іншими електричними машинами. Відсутність постійних магнітів робить данні двигуни дешевшими, тому все більше ці машини можна зустріти в електричних транспортних системах. Так як швидкість обертання двигуна досить велика для розробляемого робота, було обрано планетарний редуктор.

Для керування електродвигунами необхідно перетворювач частоти. Тому проведено детальний розрахунок усіх складових силового агрегату. Обрано IGBT ключі та драйвери керування, обчислено зарядний конденсатор, та для точного керування виконано підбір датчиків струму та напруги.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

3.1 Кінематична модель робота з диференціальним приводом

Для отримання кінематики робота, розглянемо просту ілюстрацію мобільного робота, як показано на рисунку 3.1. Положення і орієнтація робота [59] в будь-який момент часу описується вектором $p = [x_Q, y_Q, \varphi]^T$, де (x_Q, y_Q) – положення точки Q (центра осі приводних коліс) та φ – орієнтація робота в глобальній системі координат. Кутова швидкість лівого і правого коліс позначено $\dot{\theta}_l$ і $\dot{\theta}_r$ відповідно. Є три змінні для керування (x, y, φ) і лише два керуючі входи (крутні моменти коліс), тому система недостатньо активована.

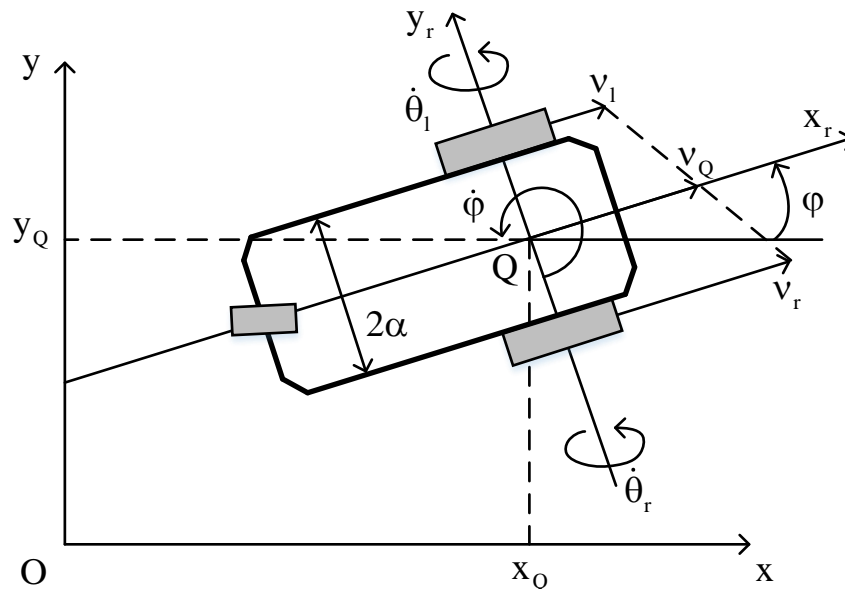


Рисунок 3.1 – Кінематична схема мобільного робота з диференціальним приводом

При розробці кінематичної моделі робота приймемо такі припущення:

- Колеса при русі не мають ефекту просковзування;
- Колеса розташовані перпендикулярно площині Оху, тому при рульовому керування відхилення відсутнє;
- Точка Q, що знаходиться посередині вісі приводів збігається з центром ваги робота.

Повздовжню та поперечну проекції швидкості робота, а також тенденцію зміни кута повороту можна представити, виконавши диференціювання вектору p . Швидкість зміни положення й орієнтації задається:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

З рисунка 3.1 видно, що швидкість коліс можна записати, як:

$$\begin{aligned} v_r &= v_Q + \alpha\dot{\phi}, \\ v_l &= v_Q - \alpha\dot{\phi}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де v_r, v_l – швидкості правого та лівого коліс відповідно; v_Q – швидкість центру мас.

Загальна швидкість робота дорівнює середньому значенню швидкості обох колес:

$$v_Q = \frac{(v_r + v_l)}{2}. \quad (3.3)$$

За допомогою нескладних підстанов виразів (3.2) та (3.3), отримаємо:

$$\dot{\phi} = \frac{v_r - v_l}{2\alpha}, \quad (3.4)$$

Де 2α – довжина колісної бази, тобто відстань між колесами, виміряна вздовж осі обертання коліс.

Представимо на рис. 3.2 проекції переміщення системи:

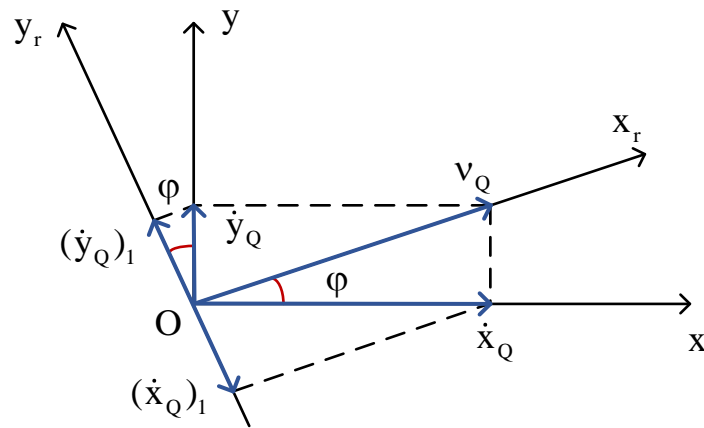


Рисунок 3.2 – Проекції переміщення робота

З рисунка 3.2 маємо такі співвідношення:

$$\dot{x}_Q = v_Q \cos \varphi, \quad \dot{y}_Q = v_Q \sin \varphi. \quad (3.5)$$

Залежність кутової швидкості від лінійної має вигляд:

$$v_r = r \dot{\theta}_r, \quad v_l = r \dot{\theta}_l. \quad (3.6)$$

Підставивши рівняння (3.3) та (3.6) в (3.5) отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{x}_Q &= \frac{r(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \cos \varphi}{2}, \\ \dot{y}_Q &= \frac{r(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \sin \varphi}{2}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Для знаходження залежності кута повороту від кутової швидкості підставимо (3.6) в (3.4):

$$\dot{\varphi} = \frac{r}{2\alpha} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l). \quad (3.8)$$

Коли $\dot{\theta}_r$ більше ніж $\dot{\theta}_l$, робот повертається ліворуч від свого поточного положення, кут орієнтації збільшується, а якщо $\dot{\theta}_l$ більше ніж $\dot{\theta}_r$, робот повертається праворуч.

Представимо вирази (3.7) та (3.8) в матричній формі:

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} (r/2)\cos\varphi \\ (r/2)\sin\varphi \\ r/2\alpha \end{bmatrix} \dot{\theta}_r + \begin{bmatrix} (r/2)\cos\varphi \\ (r/2)\sin\varphi \\ -r/2\alpha \end{bmatrix} \dot{\theta}_1, \quad (3.9)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}, \quad \dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} (r/2)\cos\varphi & (r/2)\cos\varphi \\ (r/2)\sin\varphi & (r/2)\sin\varphi \\ r/2\alpha & -r/2\alpha \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Якобіан \mathbf{J} можна представити у вигляді двох керуючих дії колес:

$$\mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} (r/2)\cos\varphi \\ (r/2)\sin\varphi \\ r/2\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} (r/2)\cos\varphi \\ (r/2)\sin\varphi \\ -r/2\alpha \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Рівняння обмеження всеспрямованого руху, на основі виразу 3.5 має наступний вигляд:

$$\dot{x}_Q \sin\varphi = \dot{y}_Q \cos\varphi. \quad (3.12)$$

На основі отриманих залежностей представлена структурна схема в моделюючій програмі MatLab Simulink (рис. 3.3). За допомогою вхідних сигналів схеми, маємо змогу задати бажані швидкості колес, та отримати переміщення робота за координатами x та y , а також дізнатися кут повороту шасі робота.

Представлено чотири дослідження при різних комбінаціях швидкостей: при однакових швидкостях $\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_1 = 15$ [рад/с], початковий кут повороту $\varphi_0 = 30^\circ$, результати подано на рис. 3.4; при більшій швидкості лівого колеса на 50% за обертання правого, $\varphi_0 = 30^\circ$ (рис. 3.5); при $\dot{\theta}_r = 0$, а швидкість лівого колеса $\dot{\theta}_1 = 15$ [рад/с], початковий кут $\varphi_0 = 30^\circ$ (рис. 3.6); при однакових швидкостях, але направлених у різні напрямки, $\varphi_0 = 30^\circ$ (рис. 3.7).

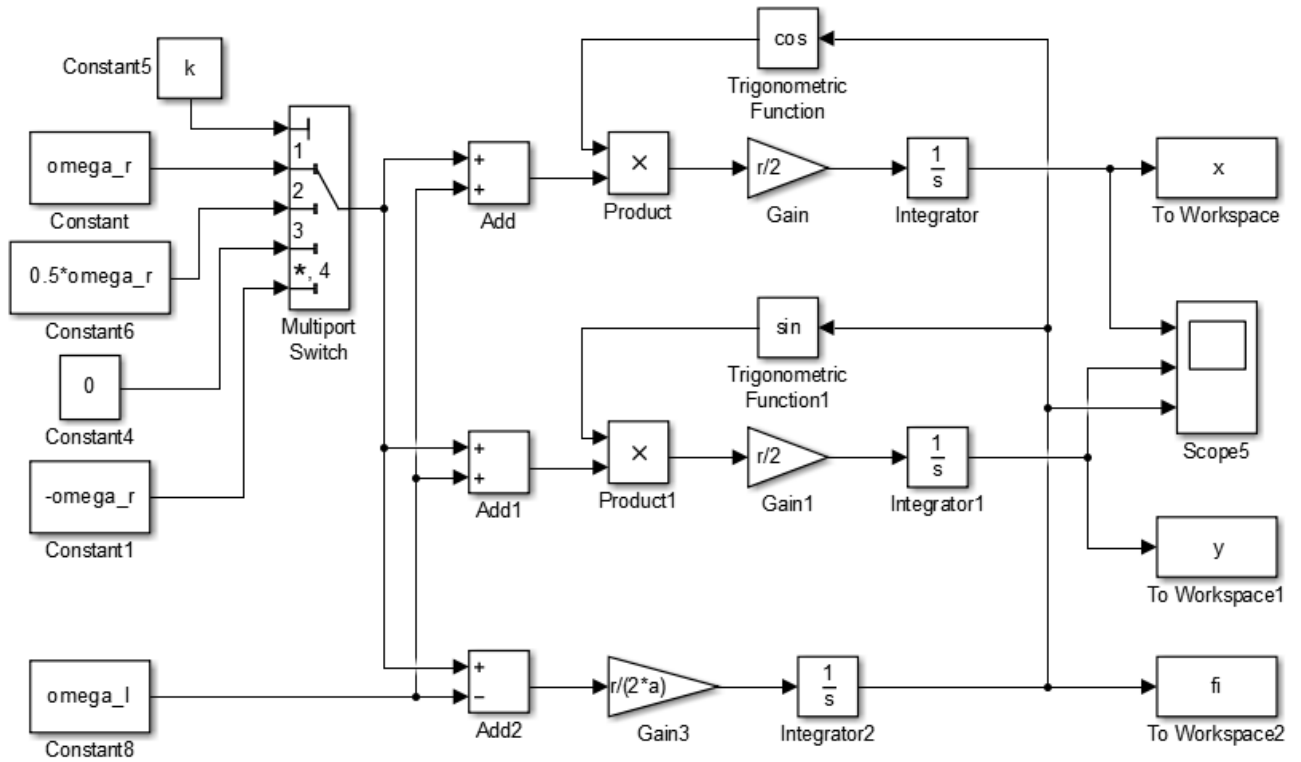


Рисунок 3.3 – Структурна схема прямої задачі кінематики в декартових координатах для робота із диференціальним приводом

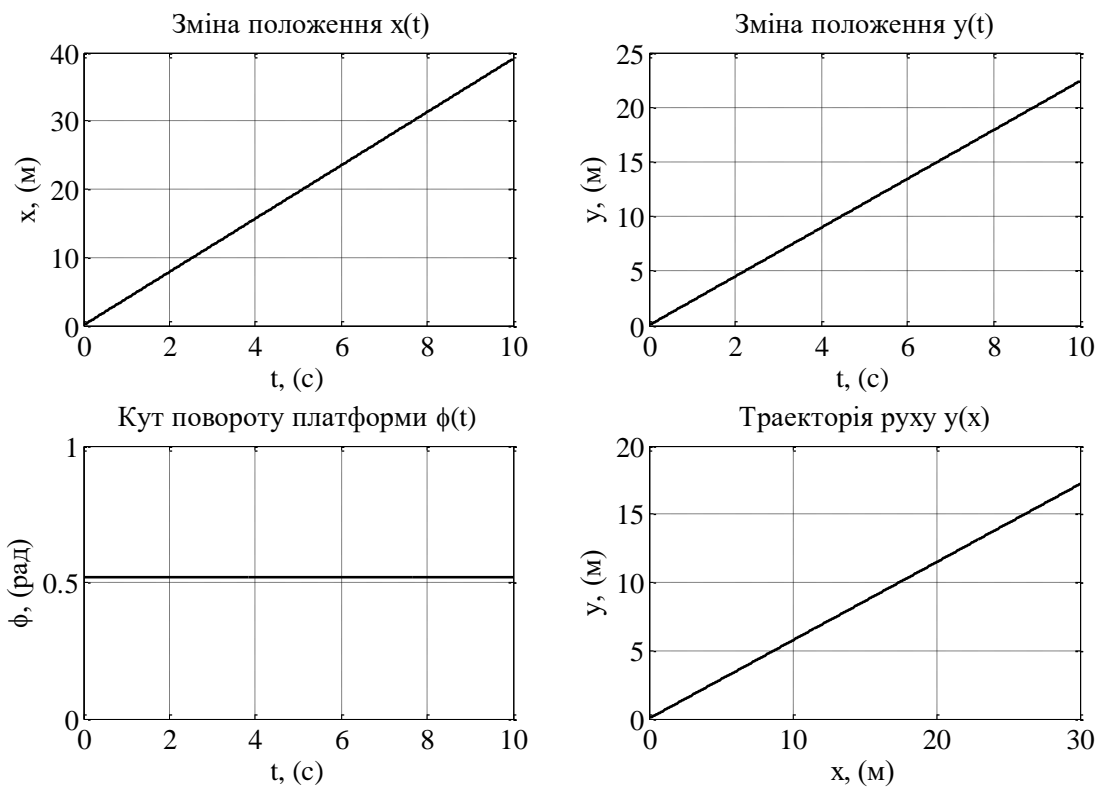


Рисунок 3.4 – Пряма кінематика (декартові координати) при

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_l = 15 \text{ [рад/с]}, \quad \phi_0 = 30^\circ$$

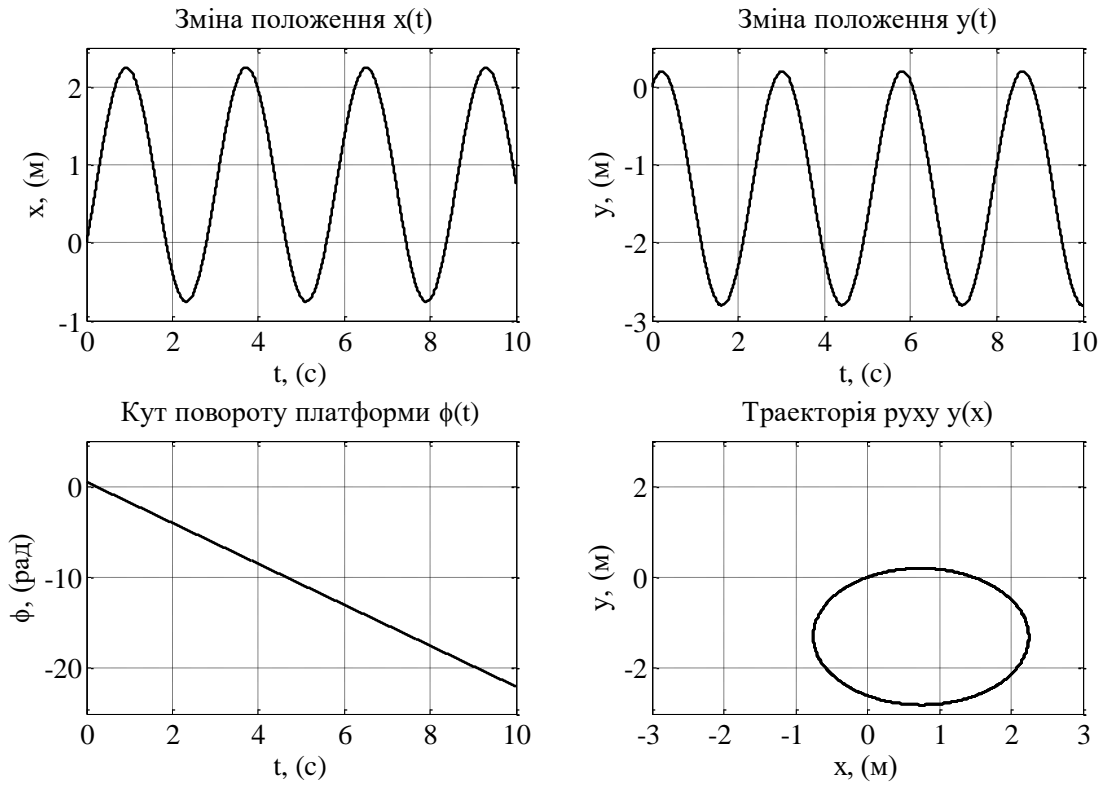


Рисунок 3.5 – Пряма кінематика (декартові координати) при $\dot{\theta}_r = 0.5 \cdot \dot{\theta}_1$,

$$\dot{\theta}_1 = 15 \text{ [рад / с]}, \phi_0 = 30^\circ$$

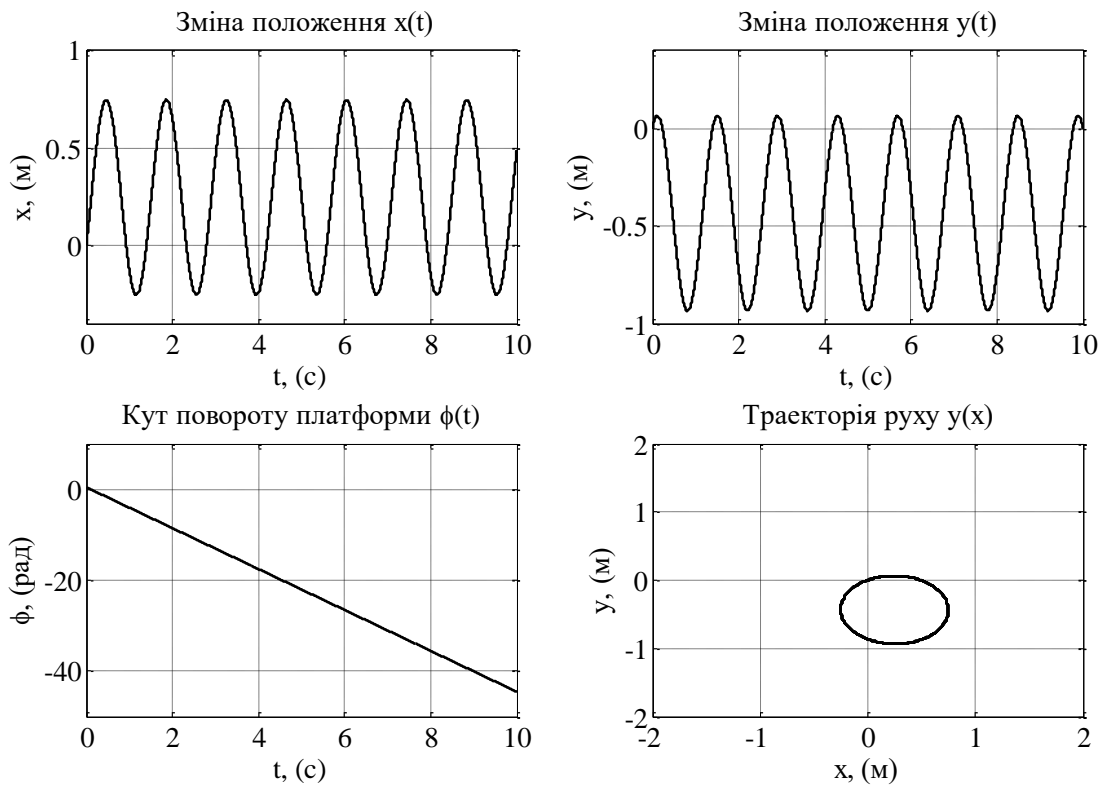


Рисунок 3.6 – Пряма кінематика (декартові координати) при $\dot{\theta}_r = 0$,

$$\dot{\theta}_1 = 15 \text{ [рад / с]}, \phi_0 = 30^\circ$$

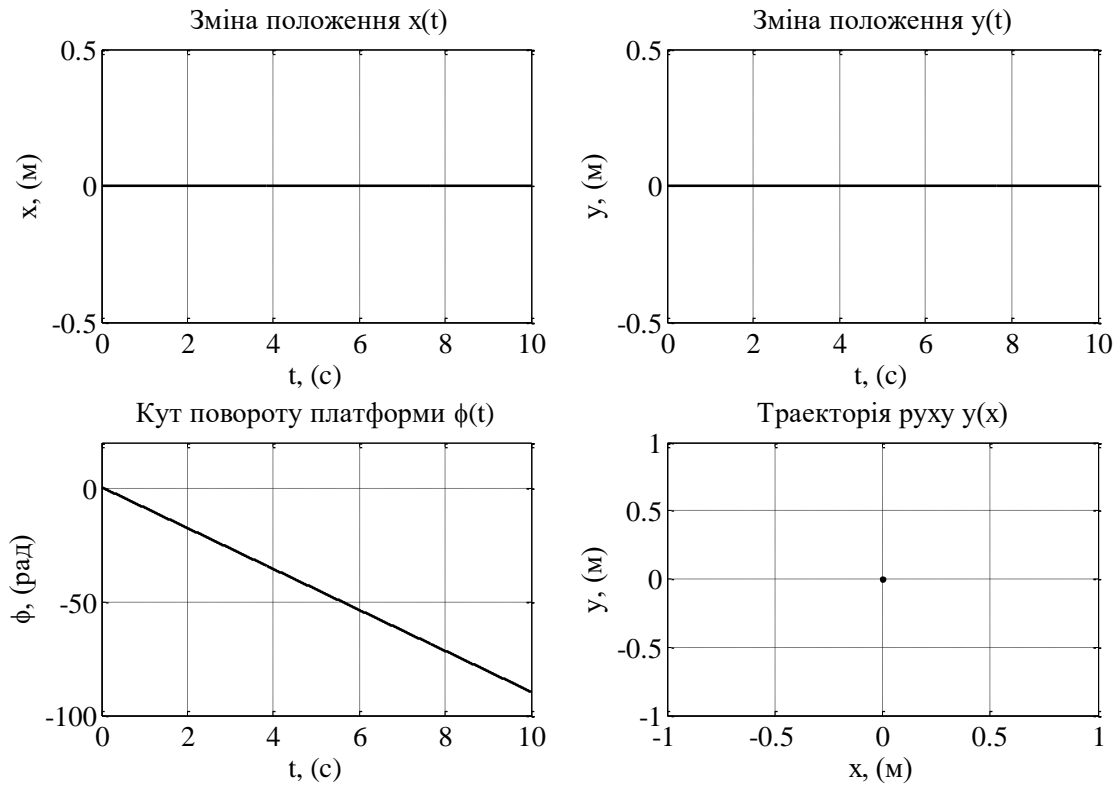


Рисунок 3.7 – Пряма кінематика (декартові координати) при $\dot{\theta}_r = -15$ [рад / с],

$$\dot{\theta}_l = 15$$
 [рад / с], $\varphi_0 = 30^\circ$

З проведених дослідів прямої задачі кінематики в декартових координатах, можемо зробити висновок, що при однакових швидкостях коліс, робот рухається прямолінійно (кут повороту не змінив своє значення). При різних швидкостях, пристрій здійснює криволінійний рух, що описується функцією кола. Чим більша різниця у швидкостях двох коліс, тим менший радіус описує робот. При відсутності тягового впливу одного з колеса, траекторія має радіус, що дорівнює довжині колісної бази шасі. При однакових швидкостях але направлених в різні сторони, робот здійснює так званий розворот на місці, тобто має нульовий радіус розвороту.

Нюансом наведеної структурної схеми є неповна контрольованість, пояснюється тим, що за допомогою двох керуючих дій намагаємося контролювати трьома (координати x , y та кут φ). Одним з рішень є можливість переходу від декартової системи обчислення до полярної.

Представимо вирази (3.5) в іншій формі:

$$v_Q = \sqrt{\dot{x}_Q^2 + \dot{y}_{yQ}^2}. \quad (3.13)$$

У виразі (3.13) виконаємо заміну змінних з (3.7):

$$\dot{\rho}_Q = \frac{r(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l)}{2}. \quad (3.14)$$

Для знаходження кута повороту платформи використовуємо співвідношення (3.8): $\dot{\phi} = \frac{r}{2\alpha}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)$.

Згідно рівнянь (3.14) та (3.8) представлено на рисунку 3.8 структурну модель. Дослідження проведено (рис. 3.9 – рис. 3.12) аналогічні що і при розгляді прямої задачі кінематики в декартових координатах.

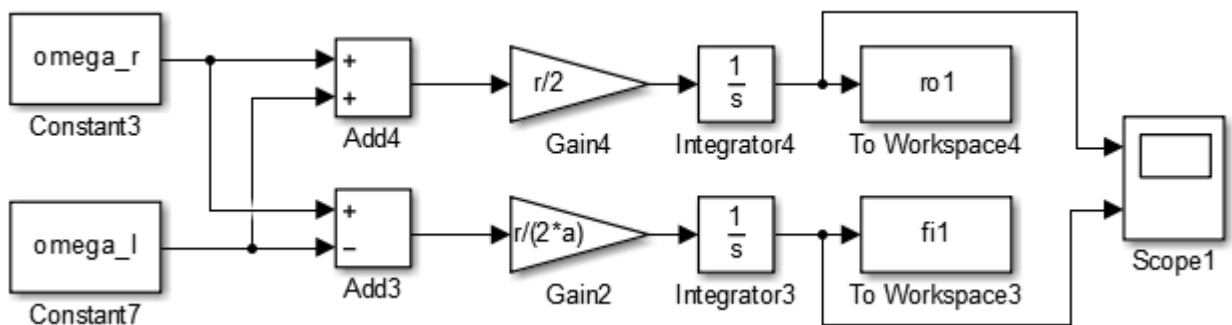


Рисунок 3.8 – Структурна схема прямої задачі кінематики в полярних координатах для робота з диференційним приводом

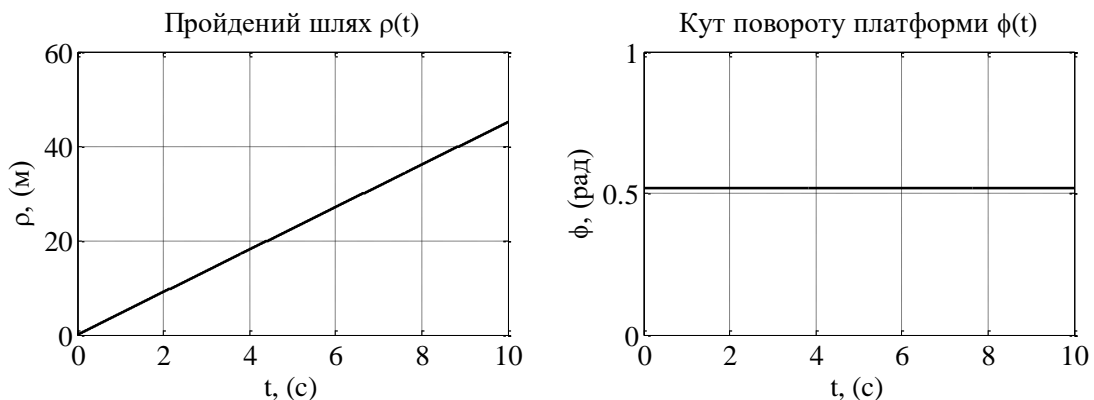


Рисунок 3.9 – Прямая кінематика (полярні координати) при

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_l = 15 \text{ [рад / с]}, \quad \phi_0 = 30^\circ$$

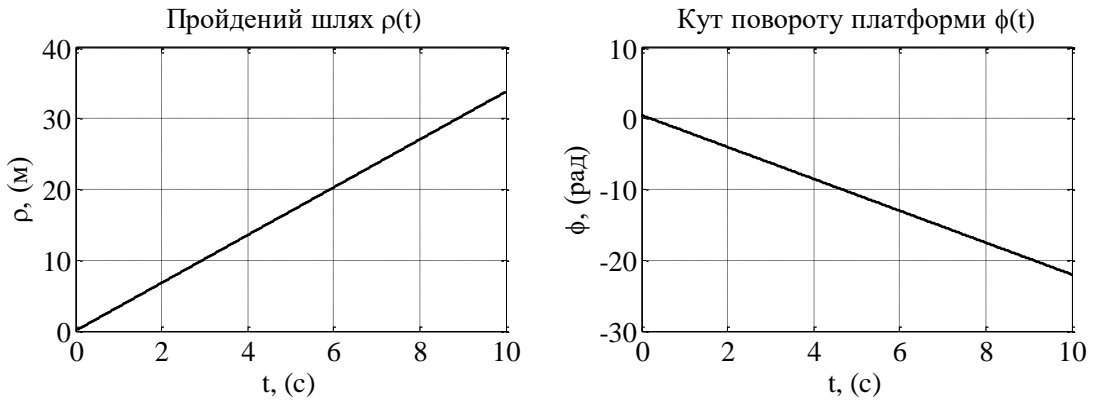


Рисунок 3.10 – Пряма кінематика (полярні координати) при

$$\dot{\theta}_r = 7.5 \text{ [рад / с]}, \dot{\theta}_l = 15 \text{ [рад / с]}, \varphi_0 = 30^\circ$$

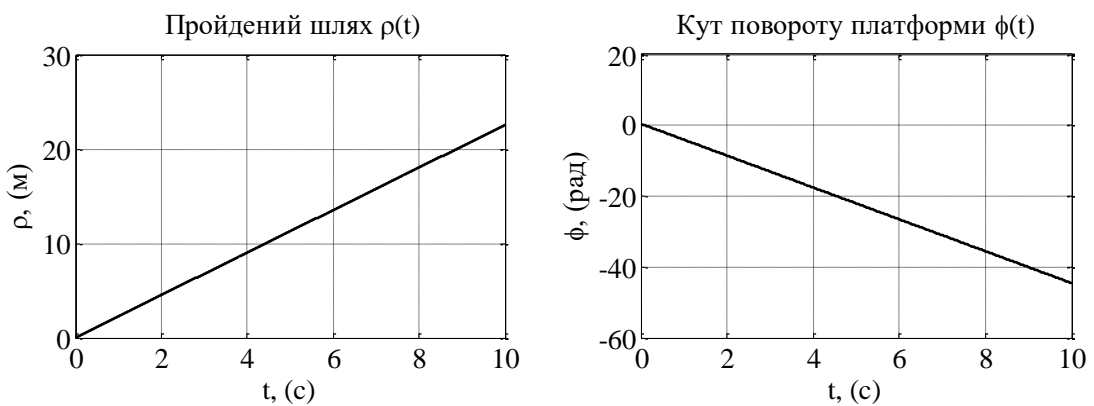


Рисунок 3.11 – Пряма кінематика (полярні координати) при

$$\dot{\theta}_r = 0, \dot{\theta}_l = 15 \text{ [рад / с]}, \varphi_0 = 30^\circ$$

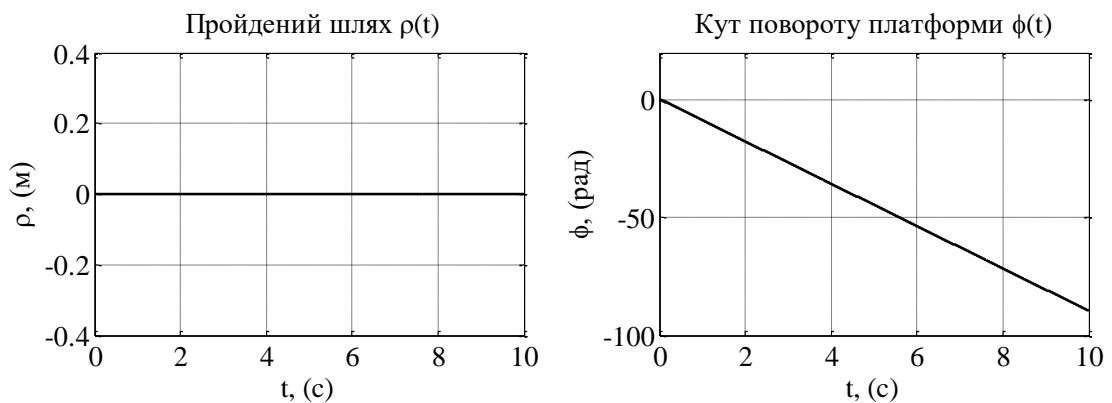


Рисунок 3.12 – Пряма кінематика (полярні координати) при

$$\dot{\theta}_r = -15 \text{ [рад / с]}, \dot{\theta}_l = 15 \text{ [рад / с]}, \varphi_0 = 30^\circ$$

Розглянуті вище структурні схеми призначені для вирішення прямої задачі кінематики, тобто обчислення координат та кута повороту за заданими швидкостями. Для обчислення необхідних швидкостей колес, щоб досягти

бажаних координат (зворотна задача кінематики), необхідно розв'язати рівняння (3.14) та (3.8) відносно швидкостей.

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_l &= \frac{\dot{\rho} - a\dot{\phi}}{r}; \\ \dot{\theta}_r &= \frac{\dot{\rho} + a\dot{\phi}}{r}.\end{aligned}\quad (3.15)$$

Структурна схема в середовищі MatLab Simulink представлена на рисунку 3.13. Дослідження виконано при чотирьох різних варіантах задаючих керованих дій (рис. 3.14 – 3.17).

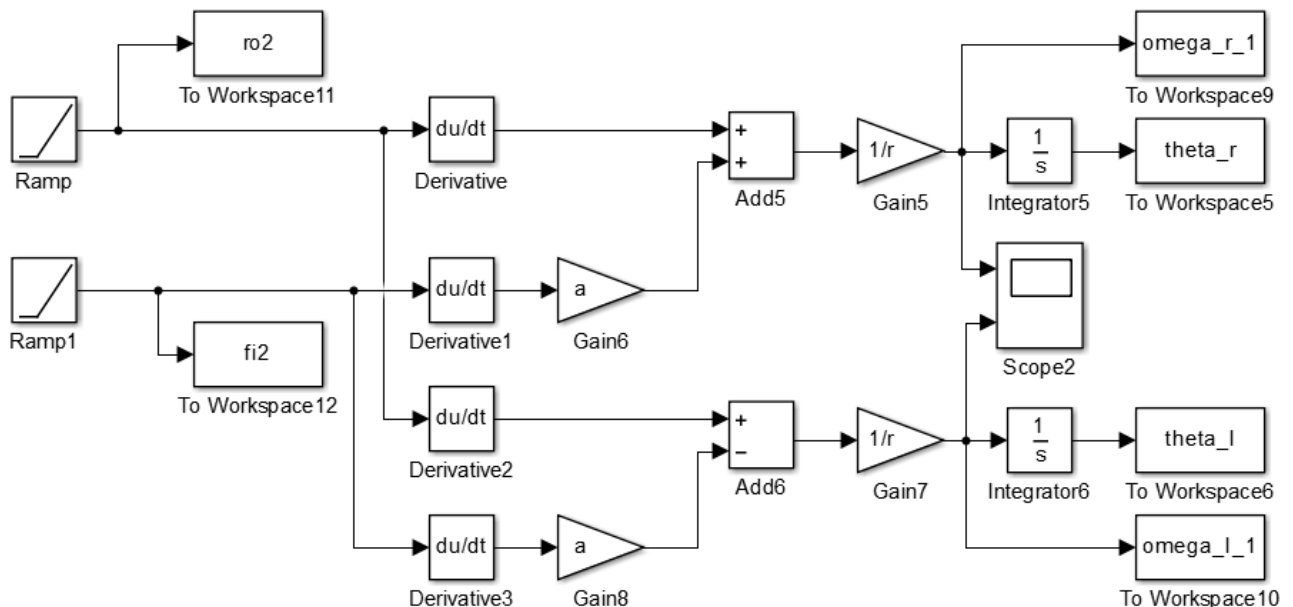


Рисунок 3.13 – Структурна схема зворотної задачі кінематики в полярних координатах робота з диференційним приводом

Результати моделювання зворотної кінематики співпадають з прямою. Тобто при однакових швидкостях обертання колес, робот рухається по прямій лінії. При появі кута повороту, рух набуває форму обертової траєкторії.

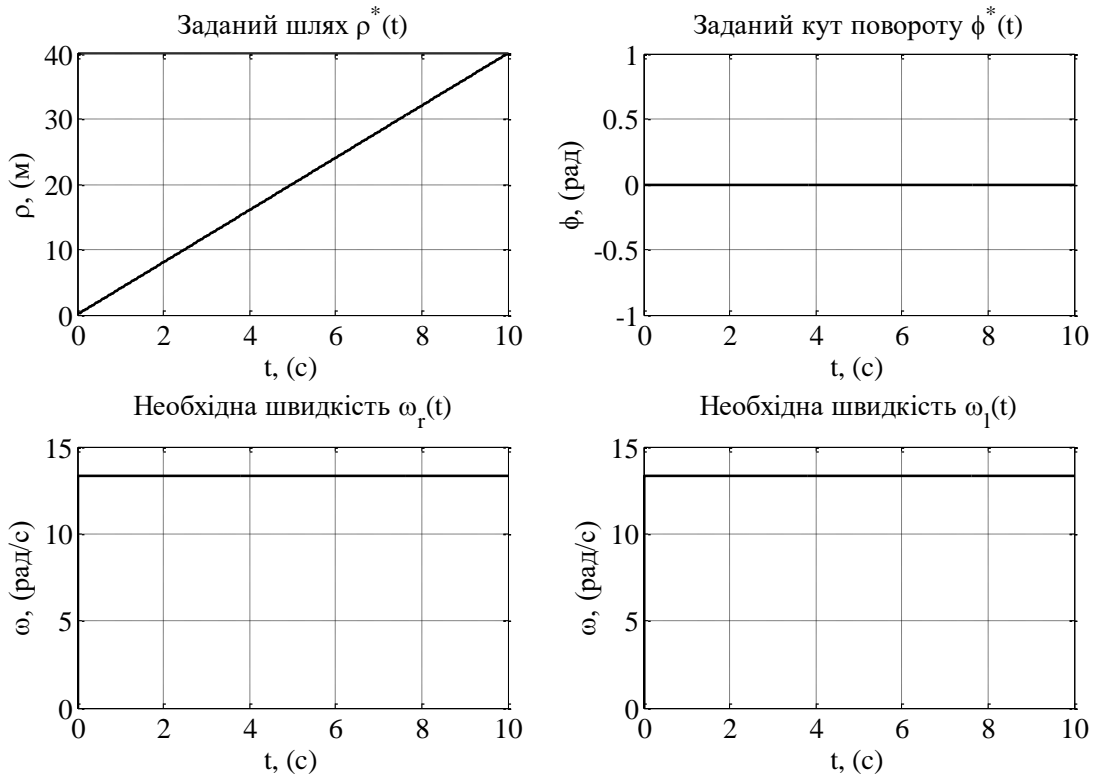


Рисунок 3.14 – Зворотна кінематика (полярні координати) при прямолінійній траєкторії руху

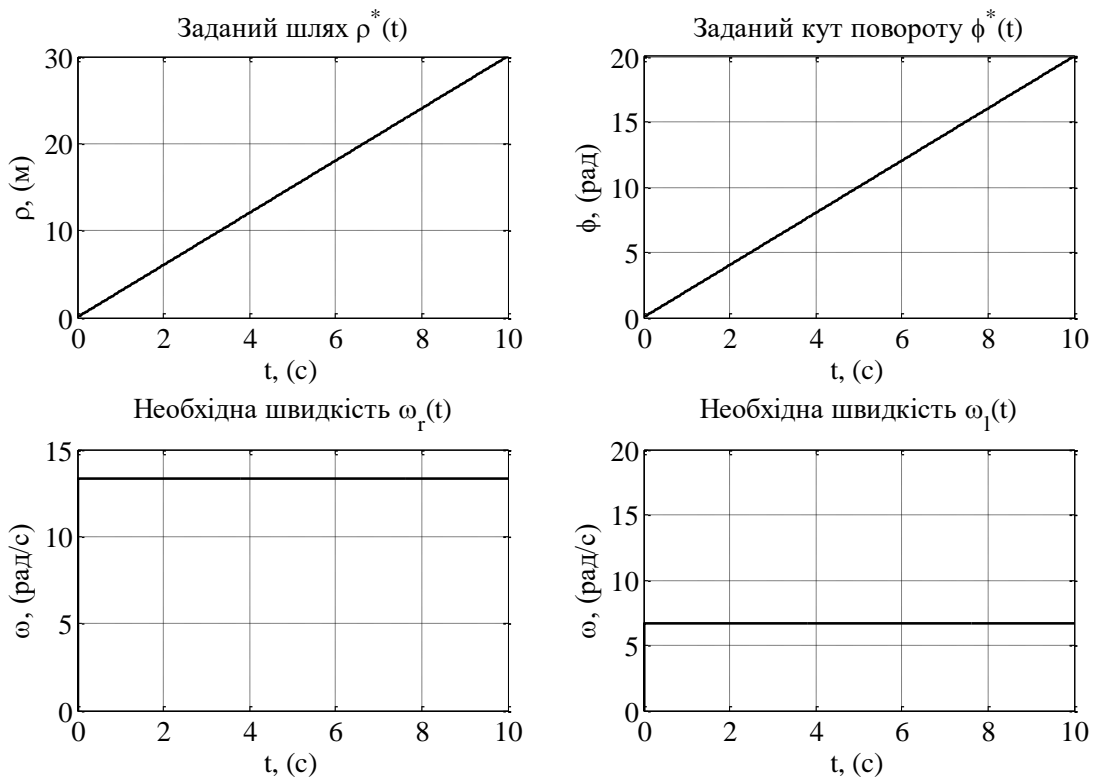


Рисунок 3.15 – Зворотна кінематика (полярні координати) при описі траєкторії повороту

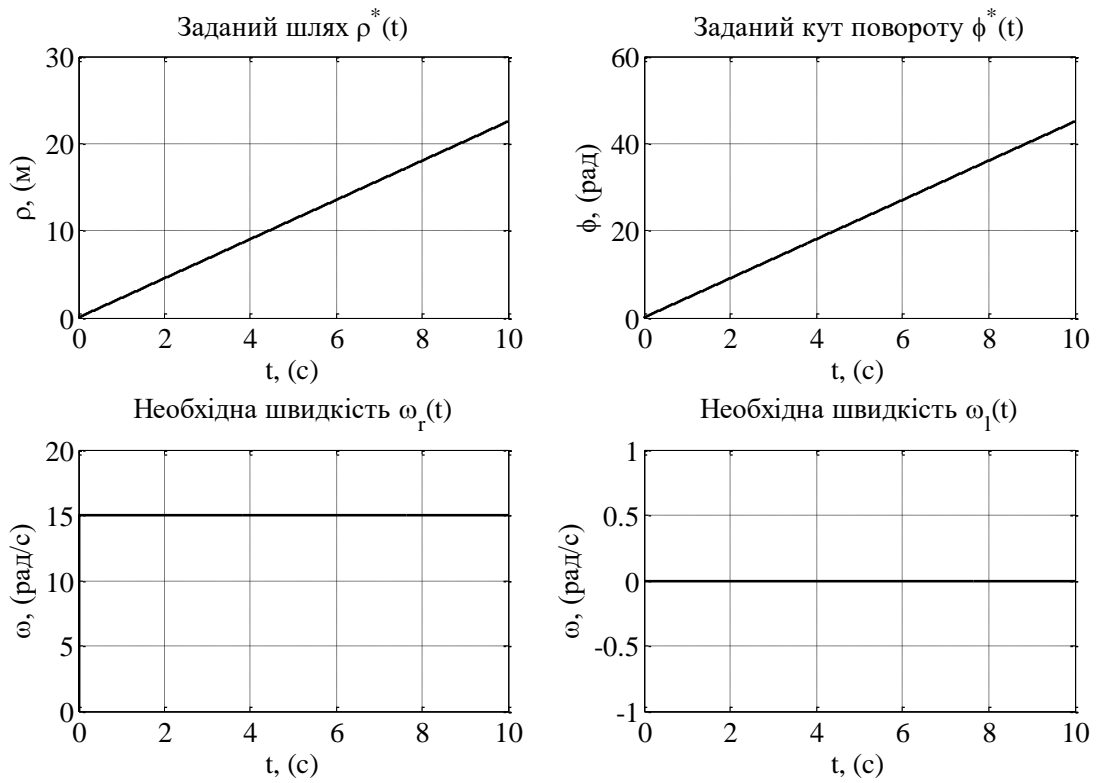


Рисунок 3.16 – Зворотна кінематика (полярні координати) при розвороті з радіусом довжини колісного шасі

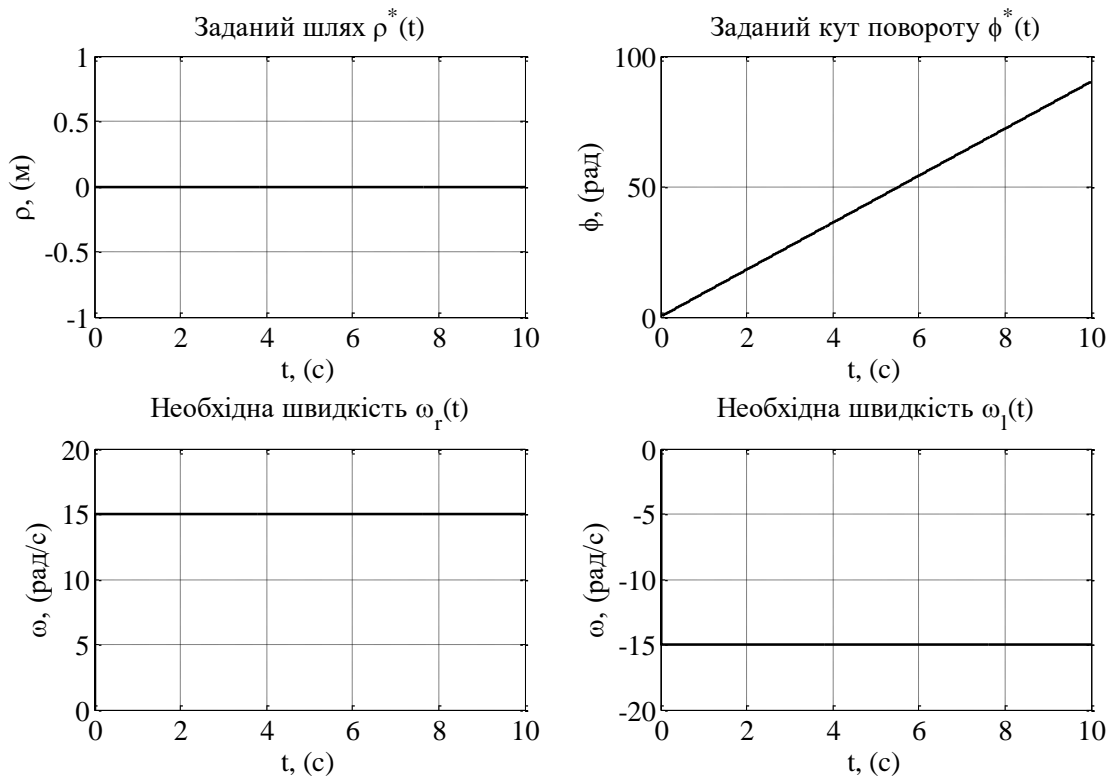


Рисунок 3.17 – Зворотна кінематика (полярні координати) при розвороті з нульовим радіусом

3.2 Математична модель синхронного реактивного двигуна

Розглянемо загальноприйнятту математичну модель [60] синхронного реактивного двигуна (SPM).

Рівняння електричної рівноваги k -ої фази статора визначається виразом:

$$U_k = i_k R_k + i_k \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial \theta} \omega + L_k(\theta, i_k) \frac{di_k}{dt}. \quad (3.18)$$

Електромагнітний момент однієї фази двигуна має вигляд:

$$M_k = i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial \theta}. \quad (3.19)$$

Аналогічні вирази можна записати для усіх фаз електричної машини. Індуктивність яка входить до виразів (3.18) та (3.19) залежить від кута повороту ротора та намагнічування електричної машини. В найпростішому випадку, ці залежності є лінійними

$$L_k = \alpha\theta + \beta, \quad \theta_{\min} \leq \theta < \theta_{\max}, \quad (3.20)$$

де α та β – деякі коефіцієнти апроксимації.

В більш складних випадках, ці залежності можуть бути апроксимовані кусково-нелінійною функцією [61]

$$L = \begin{cases} L_1 = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2), & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 1; \\ L_{11} = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot y + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot y + c_2), & 180 \leq \theta < 360, 0 \leq I/I^* < 1; \\ L_2 = a_{11} \cdot \sin(b_{11} \cdot x + c_{11}) + a_{22} \cdot \sin(b_{22} \cdot x + c_{22}), & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 2; \\ L_{22} = a_{11} \cdot \sin(b_{11} \cdot y + c_{11}) + a_{22} \cdot \sin(b_{22} \cdot y + c_{22}), & 180 \leq \theta < 360, 0 \leq I/I^* < 2; \\ L_3 = p_1 \cdot x^4 + p_2 \cdot x^3 + p_3 \cdot x^2 + p_4 \cdot x + p_5, & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 3; \\ L_{33} = p_1 \cdot y^4 + p_2 \cdot y^3 + p_3 \cdot y^2 + p_4 \cdot y + p_5, & 180 \leq \theta < 360, 0 \leq I/I^* < 3; \end{cases} \quad (3.21)$$

$$dL = \begin{cases} dL_1 = a_1 \cdot \cos(b_1 \cdot x + c_1) \cdot b_1 + a_2 \cdot \cos(b_2 \cdot x + c_2) \cdot b_2, & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 1; \\ dL_{11} = a_1 \cdot \cos(b_1 \cdot y + c_1) \cdot b_1 + a_2 \cdot \cos(b_2 \cdot y + c_2) \cdot b_2, & 180 \leq \theta < 360, \\ & 0 \leq I/I^* < 1; \\ dL_2 = a_1 \cdot \cos(b_1 \cdot x + c_1) \cdot b_1 + a_2 \cdot \cos(b_2 \cdot x + c_2) \cdot b_2, & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 2; \\ dL_{22} = a_1 \cdot \cos(b_1 \cdot y + c_1) \cdot b_1 + a_2 \cdot \cos(b_2 \cdot y + c_2) \cdot b_2, & 180 \leq \theta < 360, \\ & 0 \leq I/I^* < 2; \\ dL_3 = p_1 \cdot x^4 + p_2 \cdot x^3 + p_3 \cdot x^2 + p_4 \cdot x + p_5, & 0 \leq \theta < 180, 0 \leq I/I^* < 3; \\ dL_{33} = p_1 \cdot y^4 + p_2 \cdot y^3 + p_3 \cdot y^2 + p_4 \cdot y + p_5, & 180 \leq \theta < 360, 0 \leq I/I^* < 3; \end{cases} \quad (3.22)$$

де

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.09319, \quad b_1 = 0.00659, \quad c_1 = 0.9777, \quad a_2 = -0.01673, \quad b_2 = 0.0381, \quad c_2 = 1.284, \\ a_{11} &= 0.08349, \quad b_{11} = 0.006494, \quad c_{11} = 0.9864, \quad a_{22} = -0.01064, \quad b_{22} = 0.04145, \\ c_{22} &= 0.9815, \quad p_1 = 8.293 \cdot 10^{-11}, \quad p_2 = -2.986 \cdot 10^{-8}, \quad p_3 = 2.379 \cdot 10^{-6}, \\ p_4 &= 5.539 \cdot 10^{-5}, \quad p_5 = 0.05395. \end{aligned}$$

Ця функція дозволяє представити структурну схему математичної моделі однієї фази СРМ наступним чином

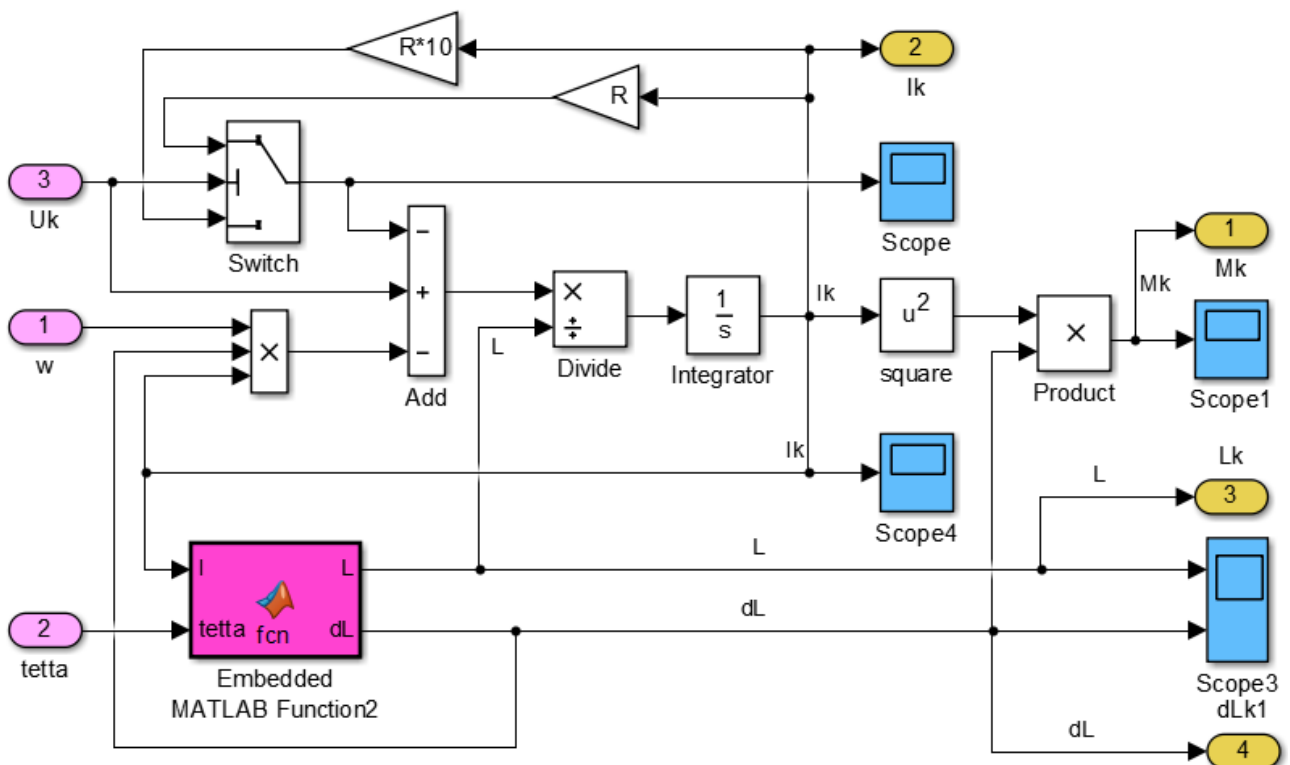


Рисунок 3.18 – Структурна схема однієї фази СРМ

Повна модель синхронного реактивного двигуна представлена на рис. 3.19.

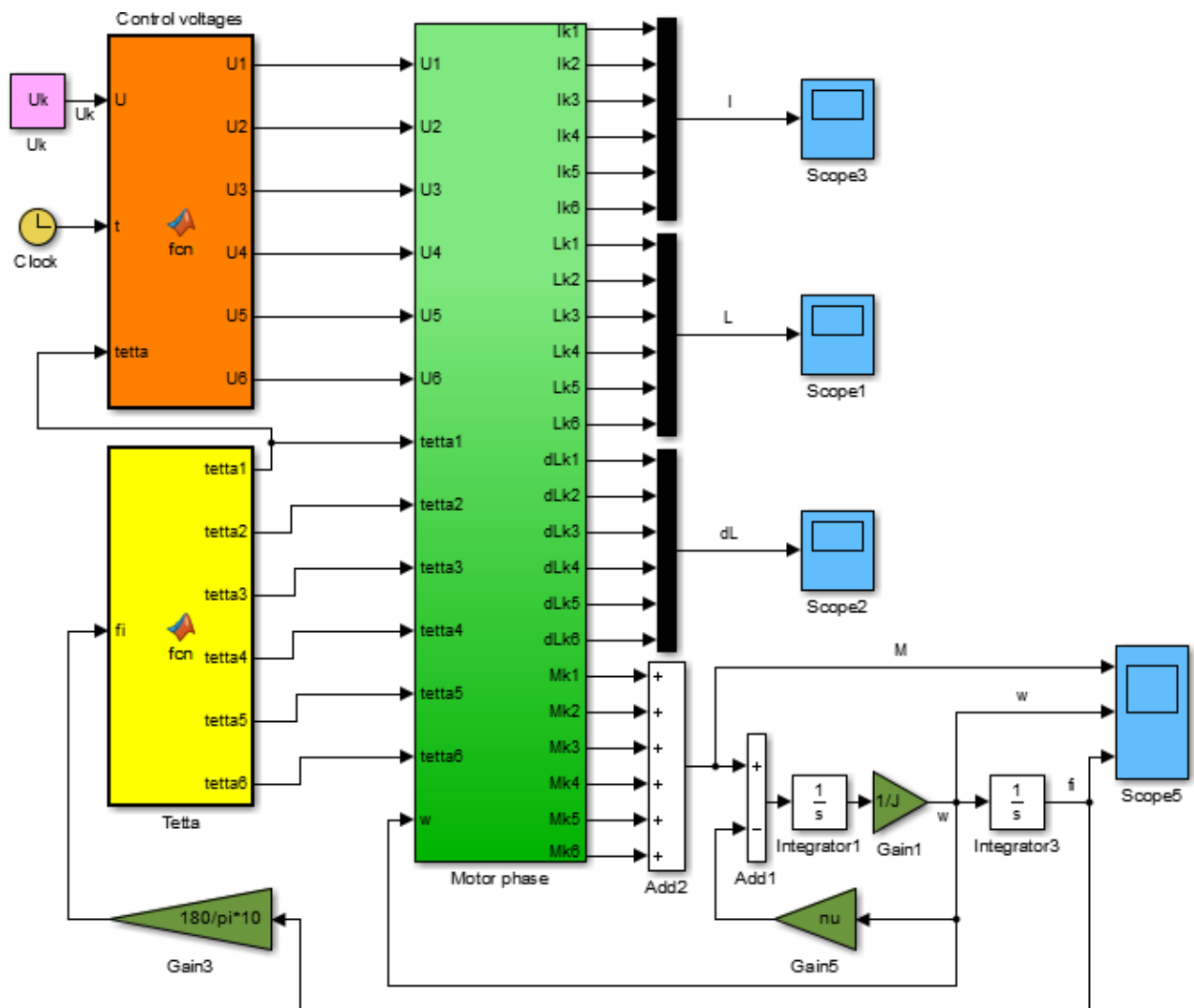


Рисунок 3.19 – Модель синхронного реактивного двигуна

На рис. 3.19 бачимо функціональний блок “Control voltages” який формує керуюче завдання для кожної фази двигуна, в даному варіанті двигун має три пари полюсів, тому відповідно необхідно шість різних напруг живлення. Блок сформований у вигляді функції, з структурою якого можна ознайомитися в Додатку А. Блок “Motor phase” містить в собі шість фаз (рис. 3.18), кожна фаза формує значення струму, моменту, та індуктивності. Функціональний блок “Tetta” математично описує давач положення (Додаток А), який допомагає дізнатися розміщення ротора, що у свою чергу необхідно для коректного формування керуючої напруги.

Моменти, які формуються кожною з фаз, утворюють сумарний електромагнітний момент двигуна

$$M_{\text{ел.}} = \sum_{k=1}^n M_k, \quad (3.23)$$

де n – кількість фаз електричної машини.

Цей електромагнітний момент створює механічний рух ротора відповідно до другого закону Ньютона

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ел.}} - M_c, \quad (3.24)$$

де J – момент інерції двигуна, M_c – момент навантаження.

Для дослідження працездатності двигуна, представлено робочі характеристики напруг та струмів кожної фази у момент пуску (рис. 3.20) і (рис. 3.21) та при роботі на усталеній швидкості (рис. 3.22) і (рис. 3.23) відповідно. Для розгону СРМ відбувається почергове переключення керуючої напруги кожною фазою згідно кута повороту ротора з амплітудою $U_k = 380$ [В]. В результаті робоча напруга не змінюється за амплітудою, проте помітне збільшення частоти керуючих тактів при виході двигуна на задану швидкість. Така сама тенденція спостерігається і для струмів фаз двигуна. Електромеханічний момент для кожної фази представлено на рисунку 3.24. Момент двигуна формується сумою усіх створюваних моментів та рівний за амплітудою $M_{\text{дв}} = 40$ [Нм]. Двигун розганяється за час рівний $t = 1.8$ [с] до номінальної швидкості $\omega_n = 272$ [рад/с] (рис. 3.25).

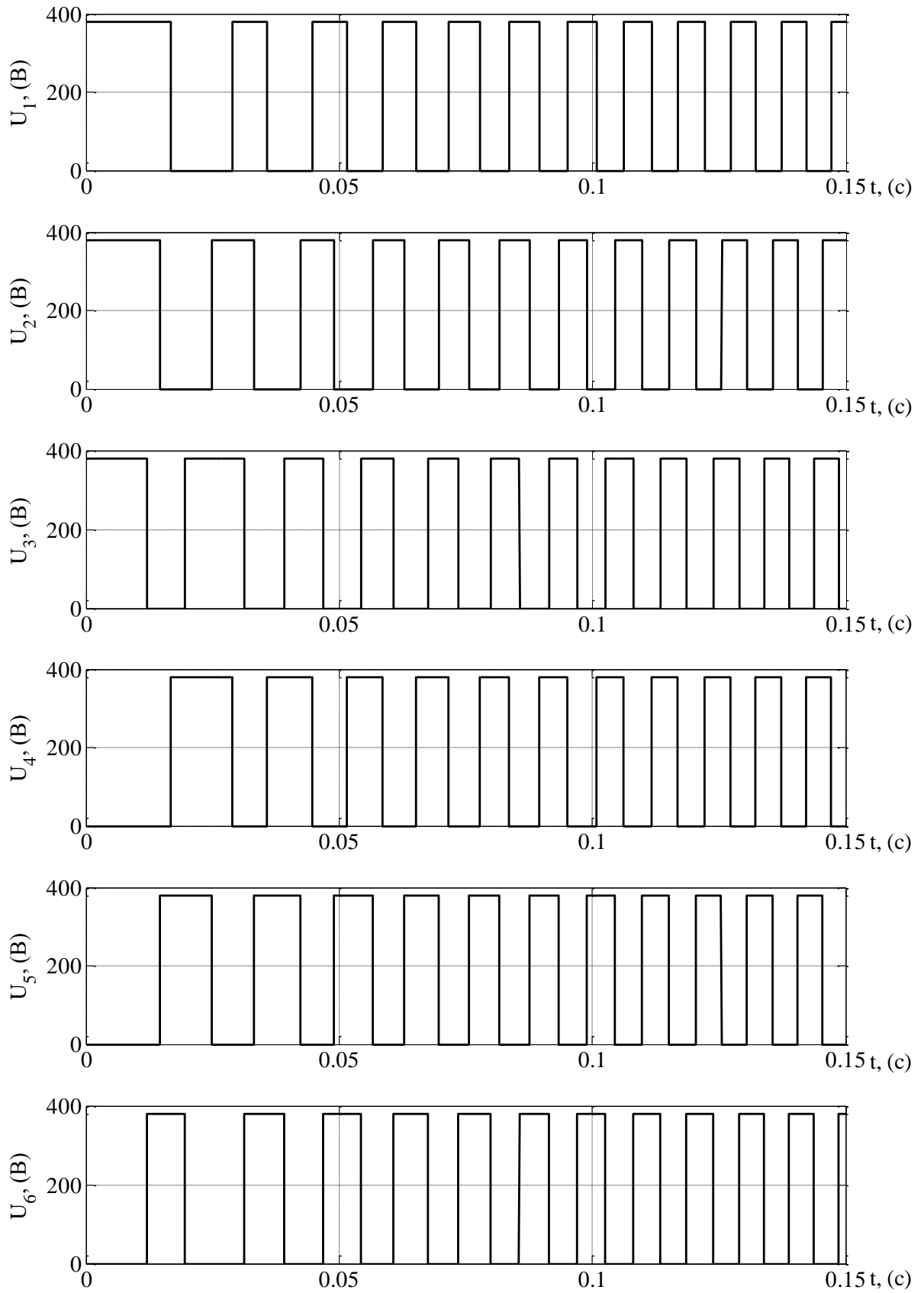


Рисунок 3.20 – Напруги фаз у період пуску двигуна

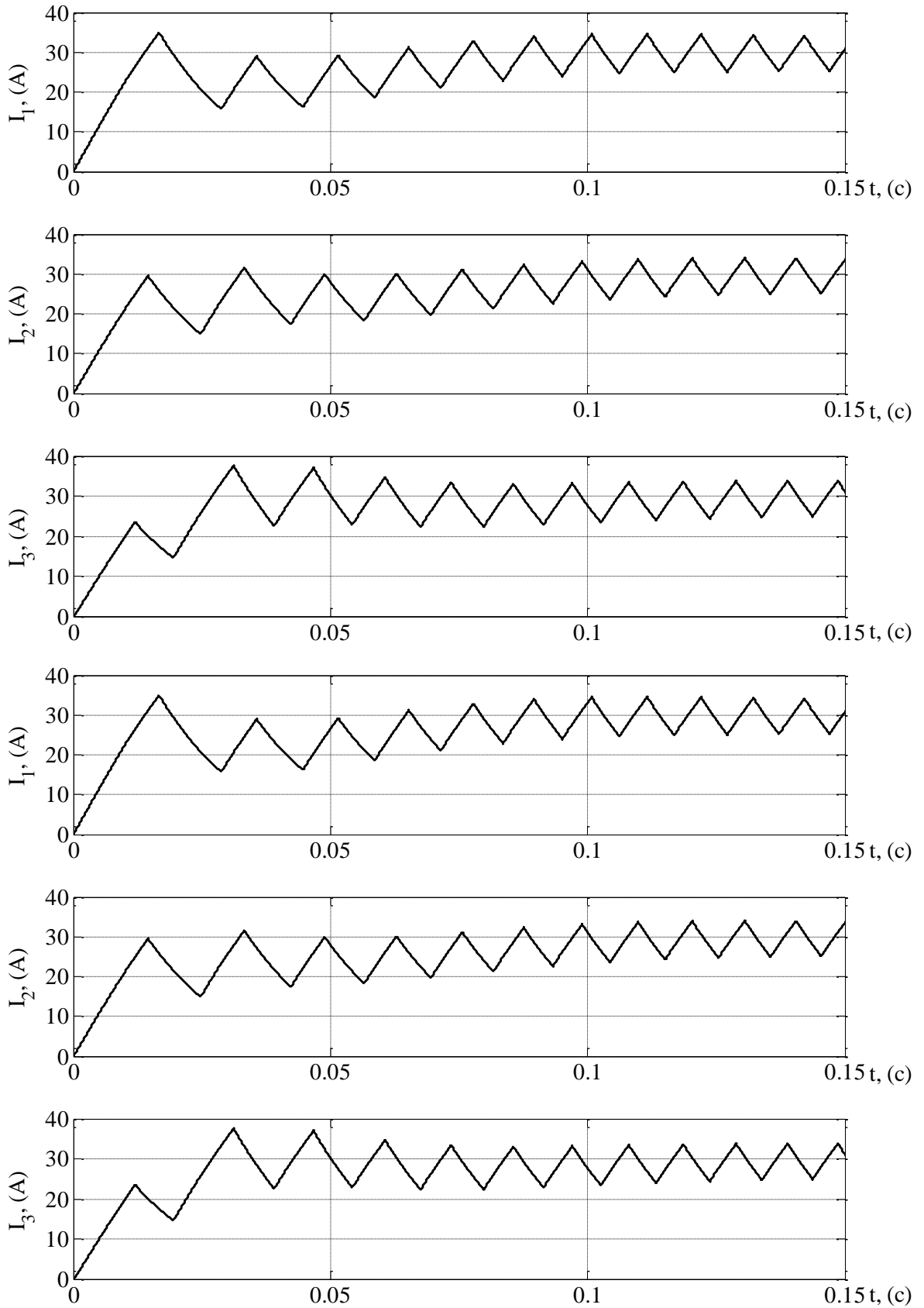


Рисунок 3.21 – Струми фаз у період пуску двигуна

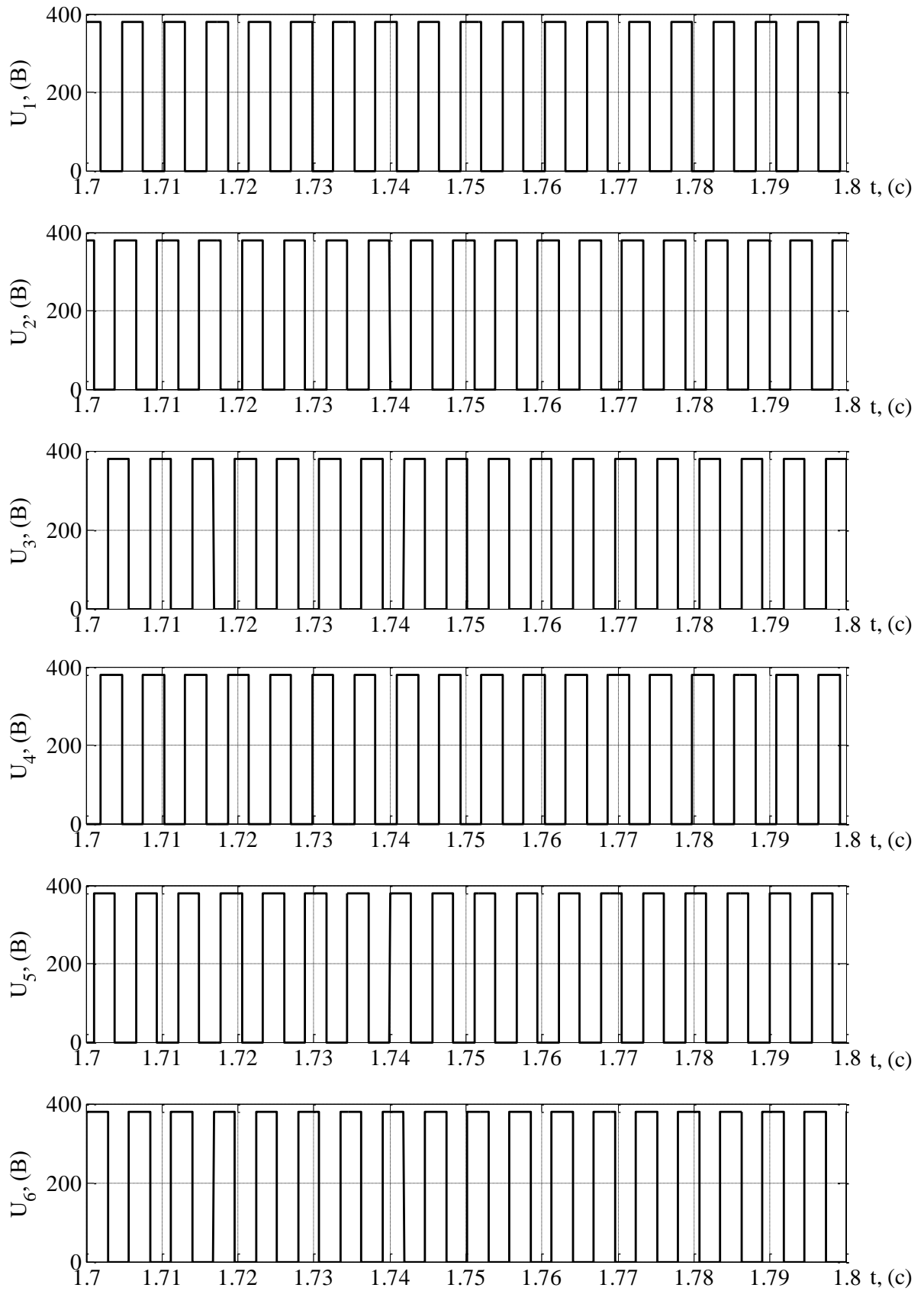


Рисунок 3.22 – Напряги фаз при усталеній роботі двигуна

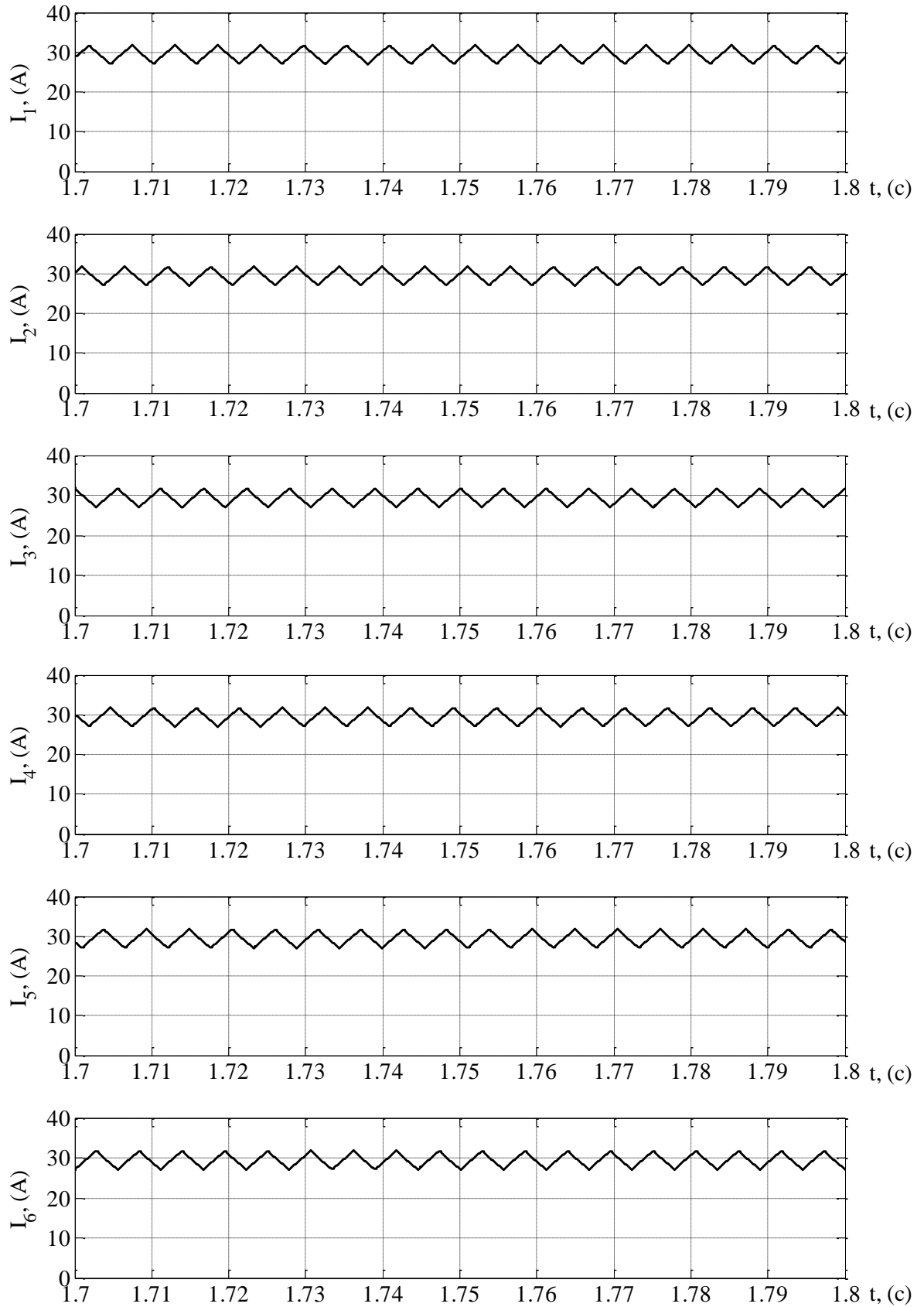


Рисунок 3.23 – Струми фаз при усталеній роботі двигуна

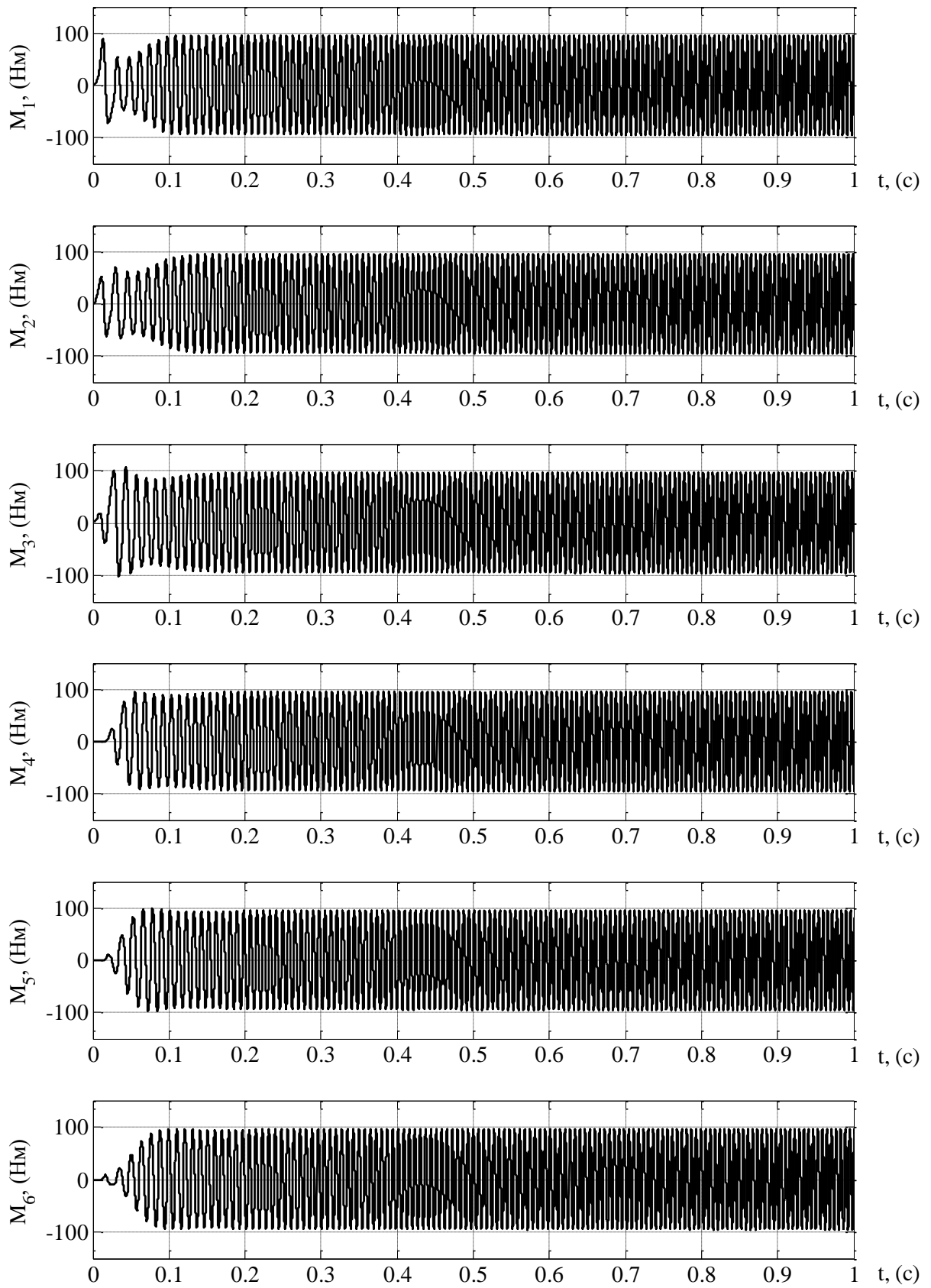


Рисунок 3.24 – Електроємеханічний момент двигуна кожної фази

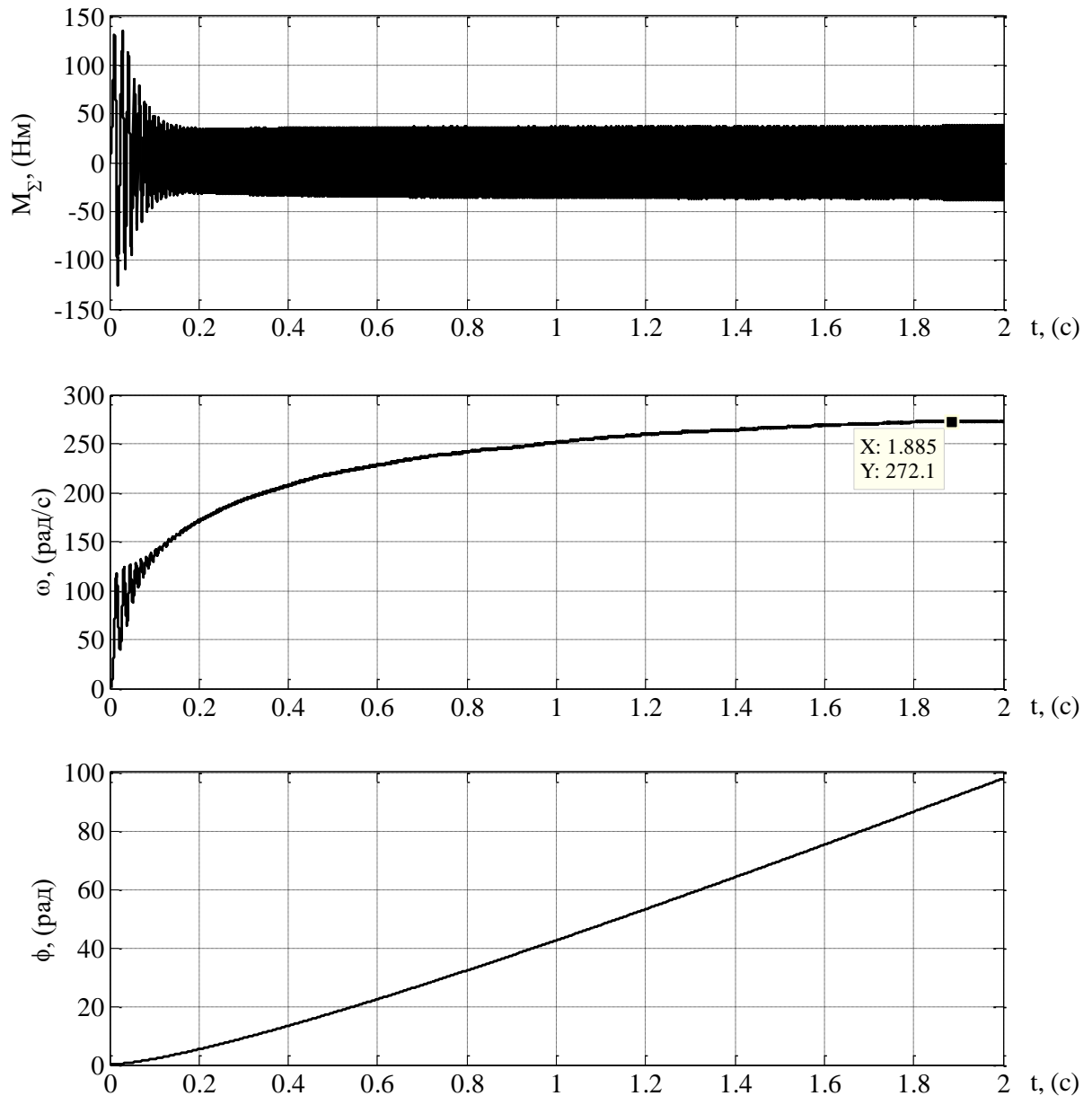


Рисунок 3.25 – Вихідні характеристики двигуна

3.3 Розробка динамічної моделі робота з диференціальним приводом у безперервному часі

Приймаючи до уваги складність розглядаємої електромеханічної системи, яка складається з двох приводних двигунів, які обертають колеса та взаємно впливають один на одний через робототехнічну платформу, ми будемо використовувати, для створення динамічної моделі, знайдені раніше рівняння двигуна та рівняння які описують положення робота через його швидкості (3.10).

Представимо ці рівняння наступним чином

$$\begin{aligned} s\psi &= \omega, \quad sX = V \cdot \cos \psi, \quad sY = V \cdot \sin \psi, \\ V &= \frac{r}{2}(\omega_l + \omega_r), \\ \omega &= \frac{r}{2a}(\omega_l - \omega_r), \end{aligned} \quad (3.25)$$

тут ω_l та ω_r пов'язані зі швидкостями двигунів через передаточне число редуктора

$$\begin{aligned} \omega_{d1} &= \omega_l \cdot i_p, \\ \omega_{d2} &= \omega_r \cdot i_p. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Математична модель, складена на основі рівнянь (3.25), (3.26), (3.18) – (3.24) може розглядатися як розв'язання прямої задачі динаміки. Структурна схема математичної моделі наведена на рис. 3.26. Блок “Kinematics_robot” – структурна схема прямої задачі кінематики в декартових координатах для робота із диференціальним приводом (див. Розділ 3.1).

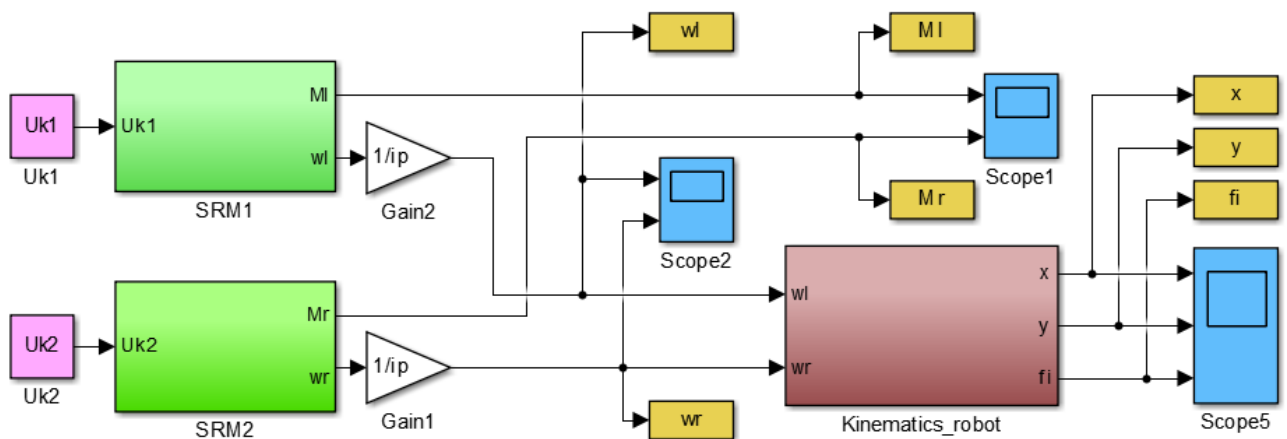


Рисунок 3.26 – Структурна схема розв'язання прямої задачі динаміки

Проведено тест для різних значень керуючих напруг обох двигунів. На рисунку 3.27 показані результати математичного моделювання робота при однакових напругах. При різних напругах живлення як двигуна правого колеса (рис. 3.28), так і лівого (рис. 3.29). У випадку коли відсутня подача керуючого сигналу на одне з двох колес, лівого – рис. 3.30 та правого – рис. 3.31.

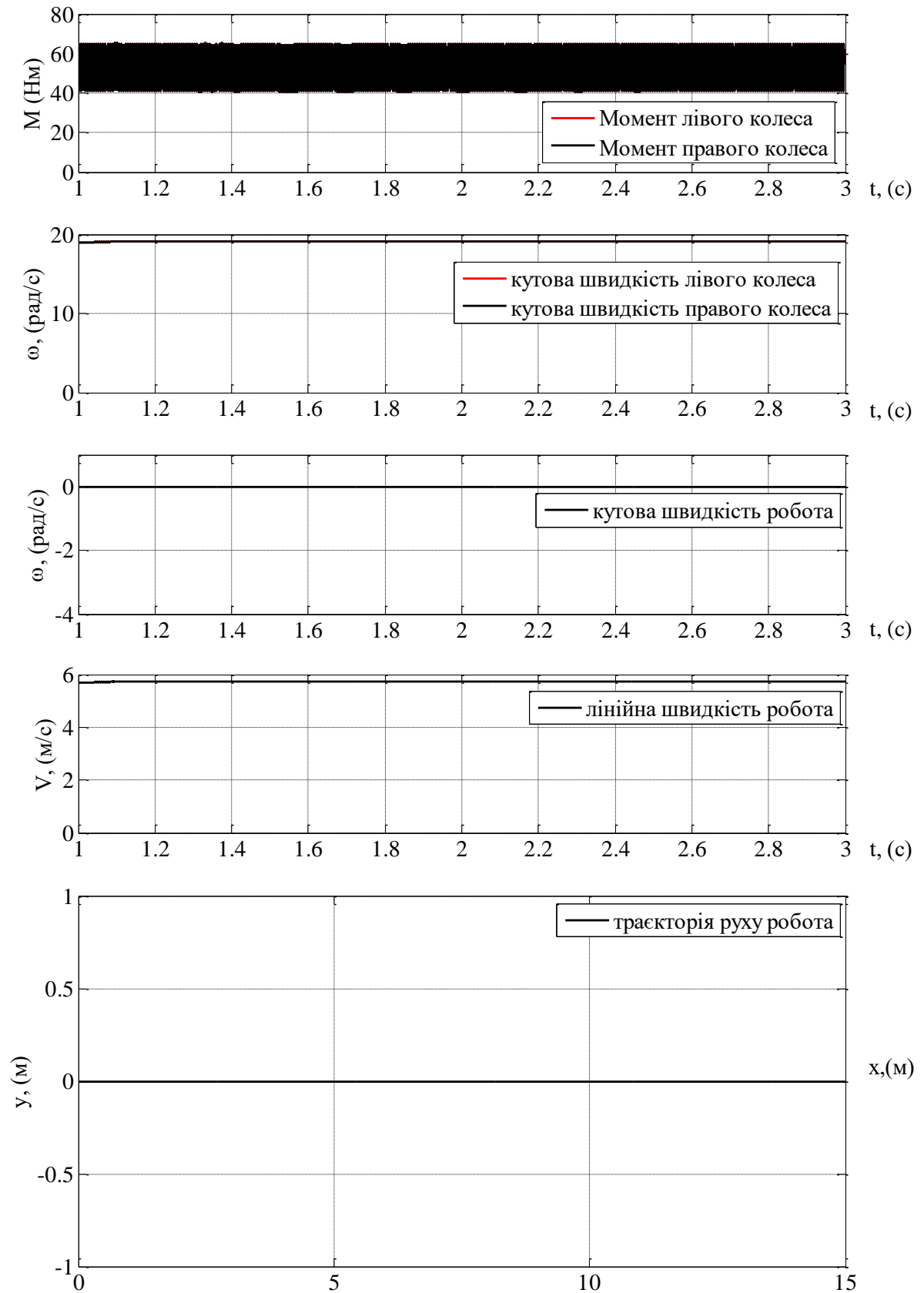


Рисунок 3.27 – Дослідження прямої задачі динаміки при керуючих напругах живлення $U_{d1} = U_{d2} = 380$ [В]

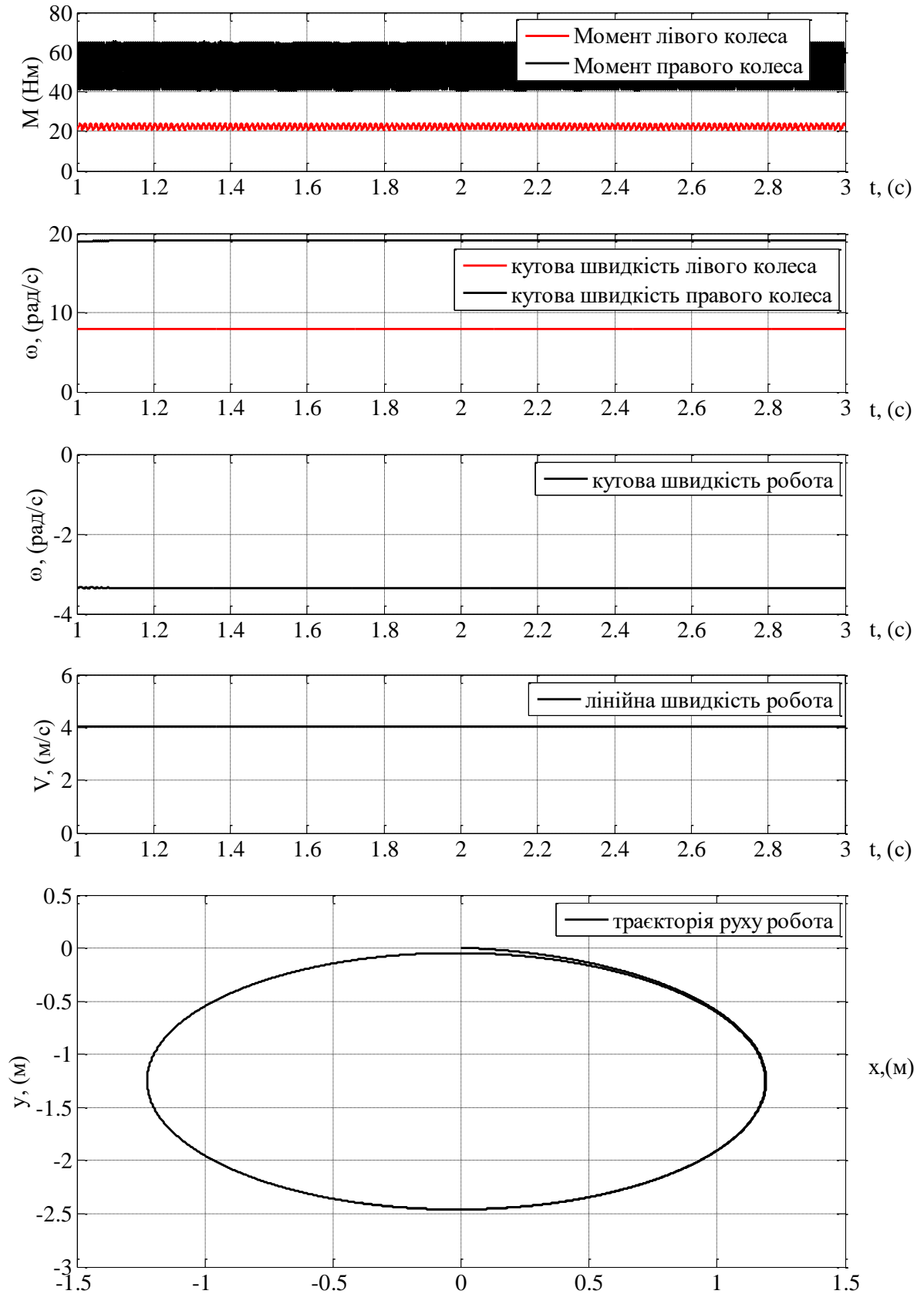


Рисунок 3.28 – Дослідження прямої задачі динаміки при керуючих напругах живлення двигунів $U_{d1} = 100$ [В] та $U_{d2} = 380$ [В]

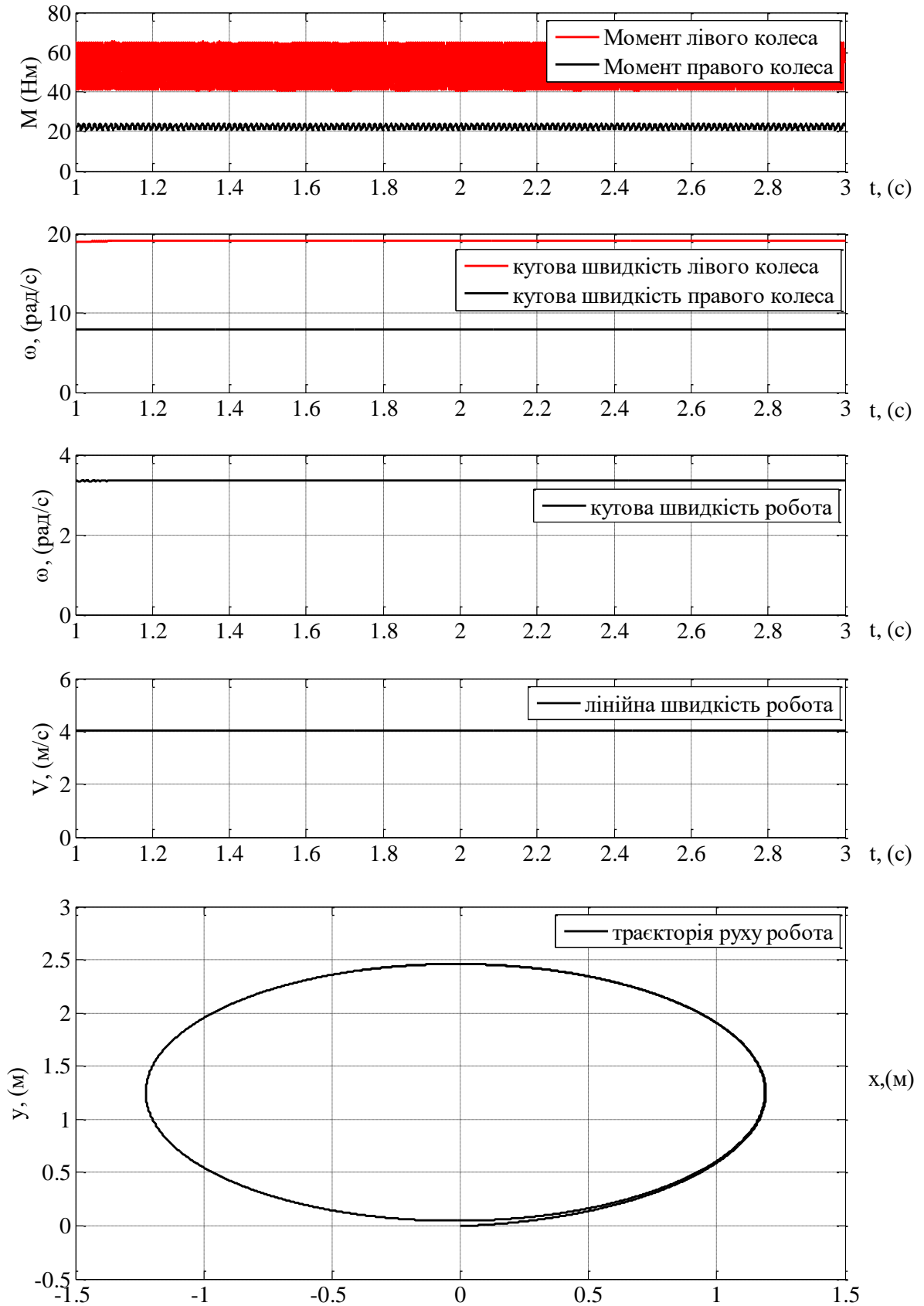


Рисунок 3.29 – Дослідження прямої задачі динаміки при керуючих напругах живлення двигунів $U_{d1} = 380$ [В] та $U_{d2} = 100$ [В]

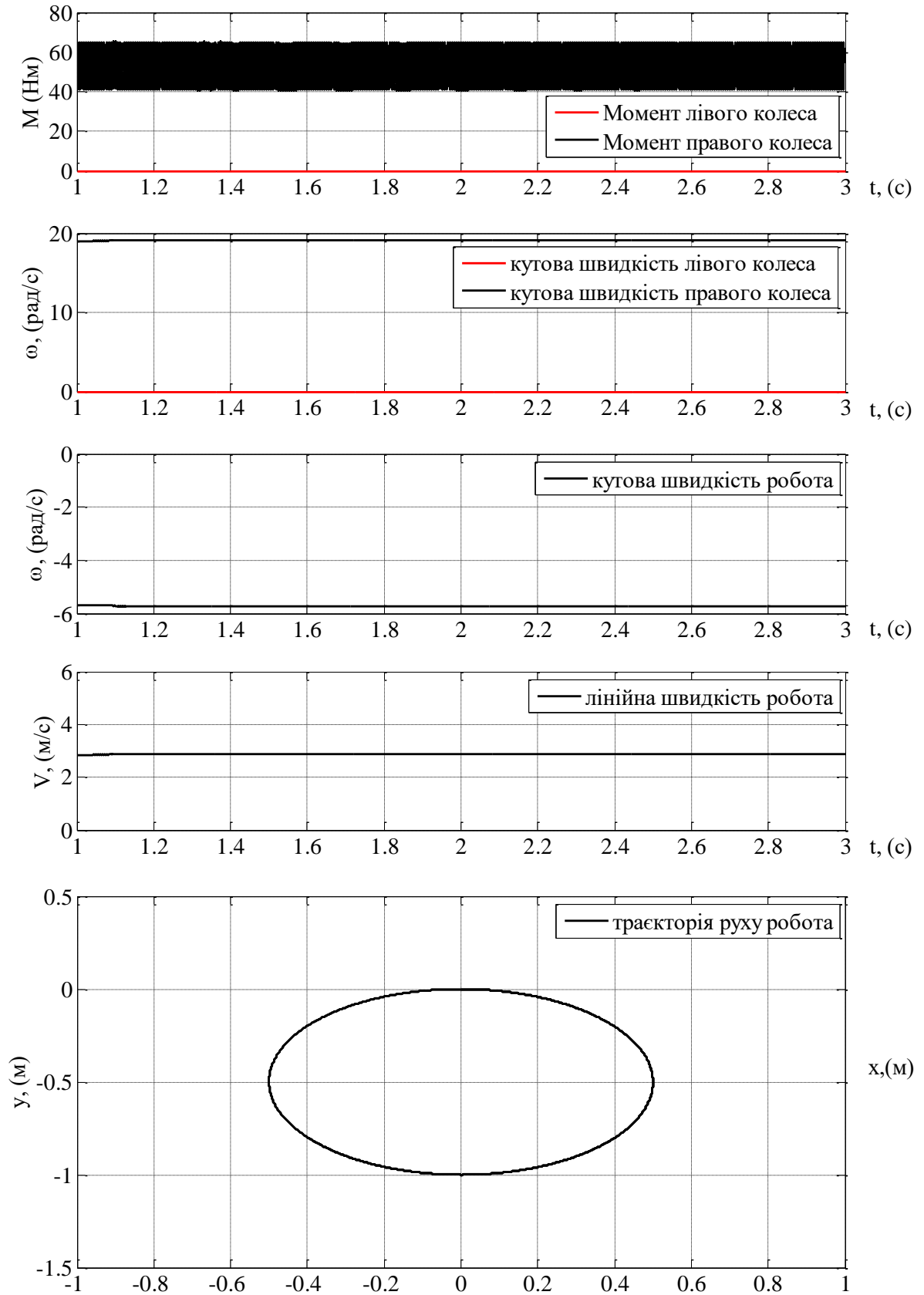


Рисунок 3.30 – Дослідження прямої задачі динаміки при керуючих напругах живлення двигунів $U_{d1} = 0$ [В] та $U_{d2} = 380$ [В]

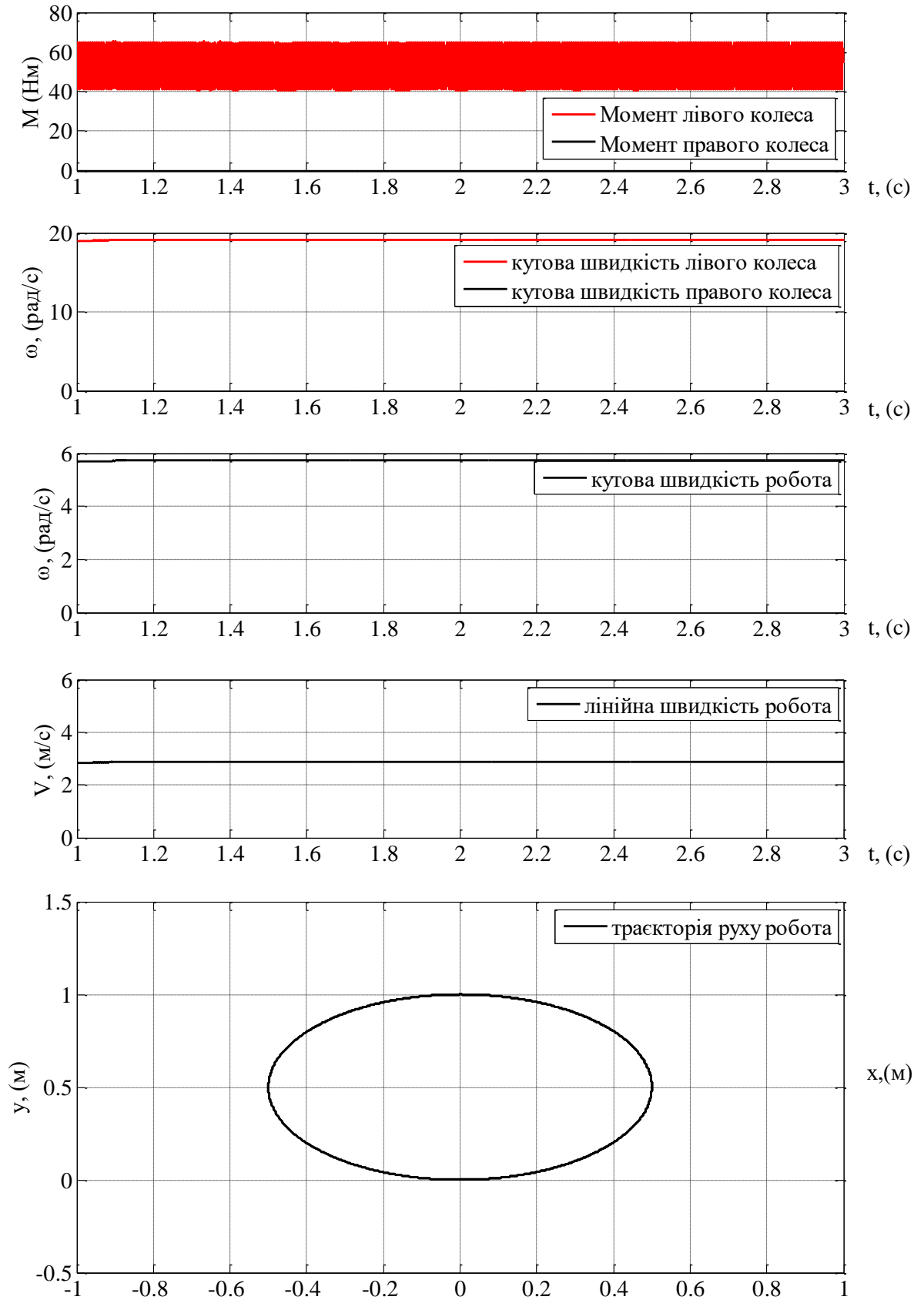


Рисунок 3.31 – Дослідження прямої задачі динаміки при керуючих напругах живлення двигунів $U_{d1} = 380$ [В] та $U_{d2} = 0$ [В]

3.4 Розробка системи керування

Модель, розглянута в попередньому підрозділі, може бути використана і для розв'язання зворотної задачі динаміки. Однак, приймаючи до уваги, змінність структури моделі двигуна, викликану перемиканням його фаз, при розв'язанні зворотної задачі будемо вважати, що до складу системи керування входить швидкодіючий регулятор швидкості.

3.4.1 Синтез регулятора швидкості

Для керування швидкістю кожного з двигунів будемо використовувати релейний ПД регулятор. Керуючий сигнал, який формується цим регулятором, визначається виразом

$$U = U_{\max} \operatorname{sgn} \left[(K_d s + 1)(\omega^* - \omega) \right], \quad (3.27)$$

де U_{\max} – максимальна напруга живлення, K_d – коефіцієнт зворотного зв'язку за прискоренням, ω^* – задана швидкість, ω – швидкість двигуна,

$$\operatorname{sgn} = \begin{cases} 1 & \text{коли } x \geq 0; \\ 0 & \text{коли } x < 0. \end{cases} \quad (3.28)$$

Відповідні структурна схема та результати моделювання показані на рис. 3.32 та рис. 3.33.

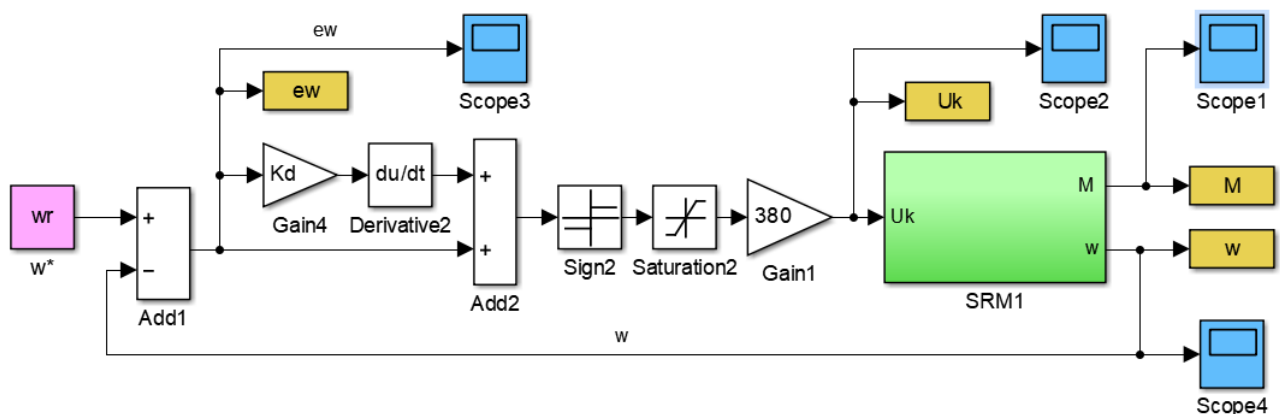


Рисунок 3.32 – Структурна схема регулятора швидкості

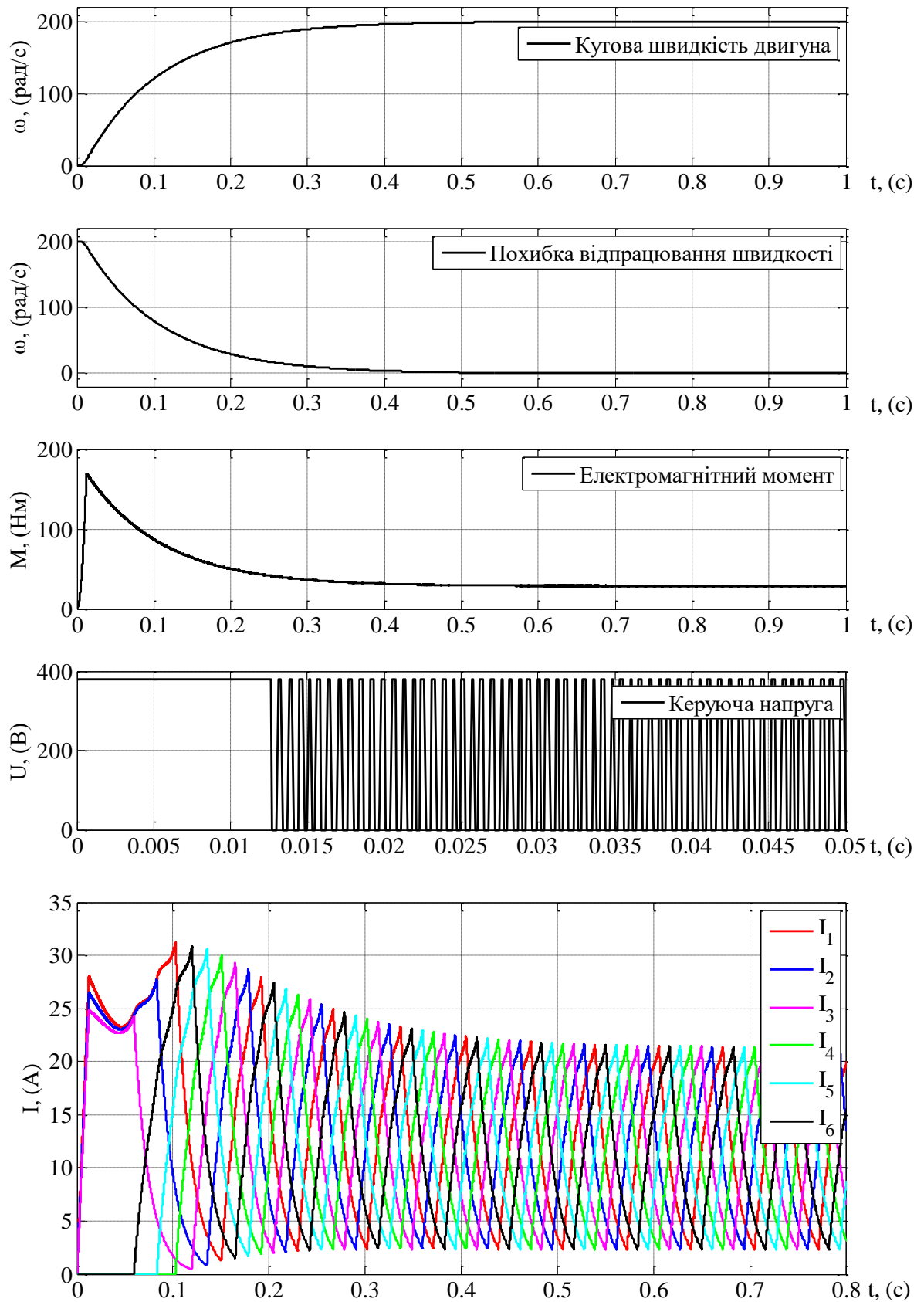


Рисунок 3.33 – Перехідні процеси для дослідження регулятора швидкості

Коефіцієнт K_d у виразі (3.27) визначає характер перехідних процесів у замкненій системі. Для розглянутих двигунів, при коефіцієнті $K_d = 0.01$ вдається отримати перехідні процеси, що є еквівалентними процесам аперіодичної ланки першого порядку.

Таким чином, можна стверджувати, що ковшні режими лінеаризують нелінійний об'єкт та розглянутий двигун з усіма його нелінійностями та змінною структурою, можна замінити аперіодичною ланкою першого порядку.

$$W_d = \frac{\omega_d}{\omega^*} = \frac{1}{T_d s + 1}, \quad (3.29)$$

яка є лінійним динамічним об'єктом. Використання такого об'єкта спрощує математичний опис робота та дозволяє спростити створення системи керування роботом.

3.4.2 Загальна структура системи керування

Систему керування роботом будемо розглядати, як двоканальну систему керування, яка містить два виконавчі двигуни. Структурна схема такої системи показана на рис. 3.34.

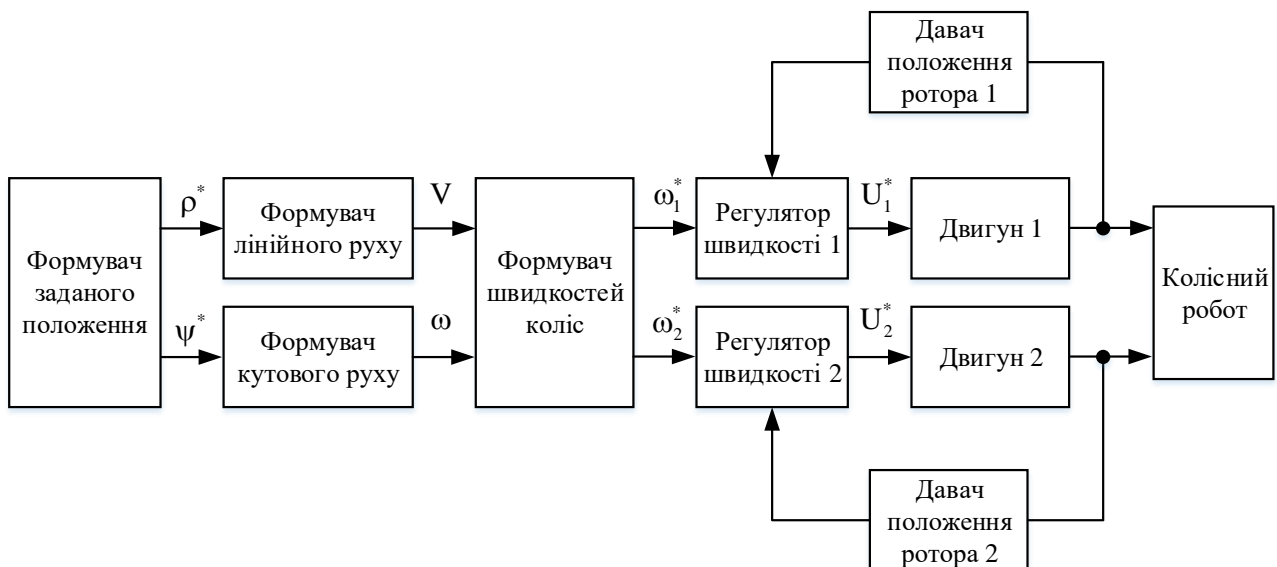


Рисунок 3.34 – Функціональна схема системи керування

Ця схема містить два розглянутих раніше контурів керування швидкістю двигунів, завдання для двигунів формується на основі бажаних лінійної та кутової швидкостей робота. Це формування відбувається на основі відомих рівнянь кінематики

$$\omega_r = \frac{V - a\omega}{r}; \quad \omega_l = \frac{V + a\omega}{r}. \quad (3.30)$$

Бажані швидкості робота визначаються за його бажаним положенням та за умови фізичної реалізації траєкторій переходу в це положення.

3.4.3 Розробка формувачів руху робота

Очевидно, що для фізичної реалізації траєкторії руху робота, необхідно щоб його швидкість та прискорення мали кінцеві значення, які можуть бути відтворені двигунами. Тому, для перетворення заданих координат у бажані швидкості руху двигунів необхідно мати інформацію про диференціальні складові шляху dr/dt та кута повороту $d\psi/dt$. Досить простий та ефективний спосіб визначення цих величин базується на використанні спостерігачів стану. Такі спостерігачі призначені для відновлення окремих компонентів вектору стану системи управління за одним із доступних безпосередньому виміру складових цього вектору. Зазначене завдання може бути вирішене шляхом застосування послідовного спостерігаючого пристрою (СП). За своєю суттю СП являє собою швидкодіючу слідкуючу систему, що відслідковує стан спостерігаємо об'єкта з деякою точністю.

В якості об'єкта управління такої системи, що відновлює, компоненти dr/dt і $d\psi/dt$ для реалізації регуляторів [62], може бути прийнятий ланцюжок з послідовно включених аперіодичного та двох інтегруючих ланок (рис. 3.35). На виходах цих ланок можна отримати першу та другу похідні від положення, які є відповідно швидкістю та прискоренням робота. Для забезпечення бажаної швидкодії спостерігача в роботі обираються коефіцієнти його зворотних зв'язків. Вибір цих коефіцієнтів здійснюється з позицій послідовного розв'язання задачі

аналітичного конструювання регуляторів для прискорення та швидкості, які обчислюються спостерігачем.

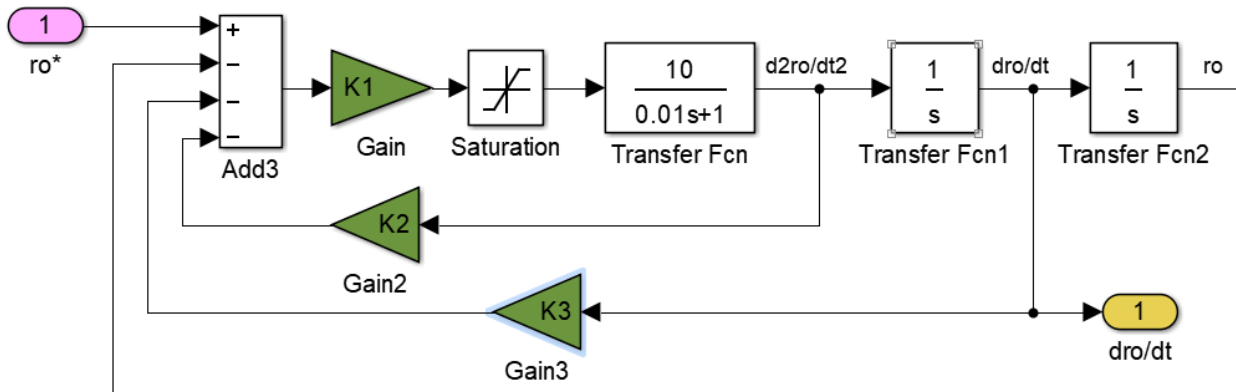


Рисунок 3.35 – Спостерігаючий пристрій для знаходження dr/dt

Така сама структура використовується для знаходження диференціальної складової кута повороту $d\psi/dt$.

За допомогою налаштування коефіцієнтів спостерігача можна досягти швидкодії та бажаних перехідних процесів оцінки вектору положення та її похідної, результати представлені на рис. 3.36 – рис. 3.39.

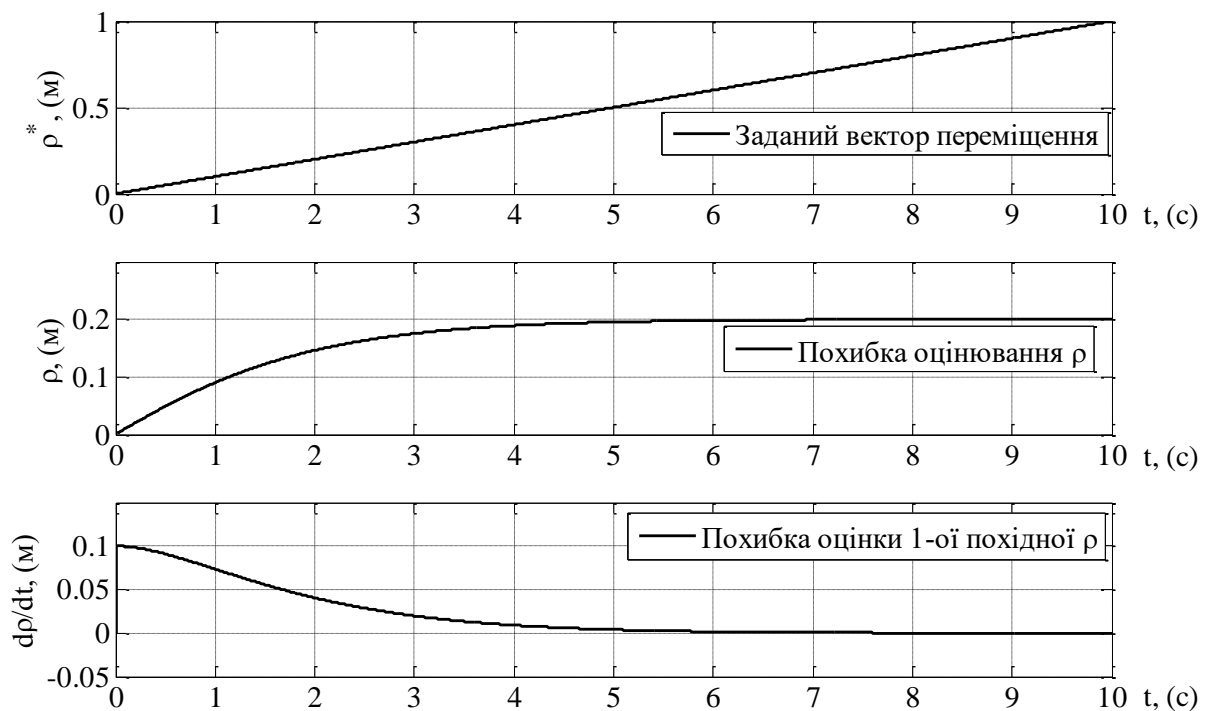


Рисунок 3.36 – Результати роботи спостерігача при коефіцієнтах налаштування

$$K_1 = 10, K_2 = 1, K_3 = 2$$

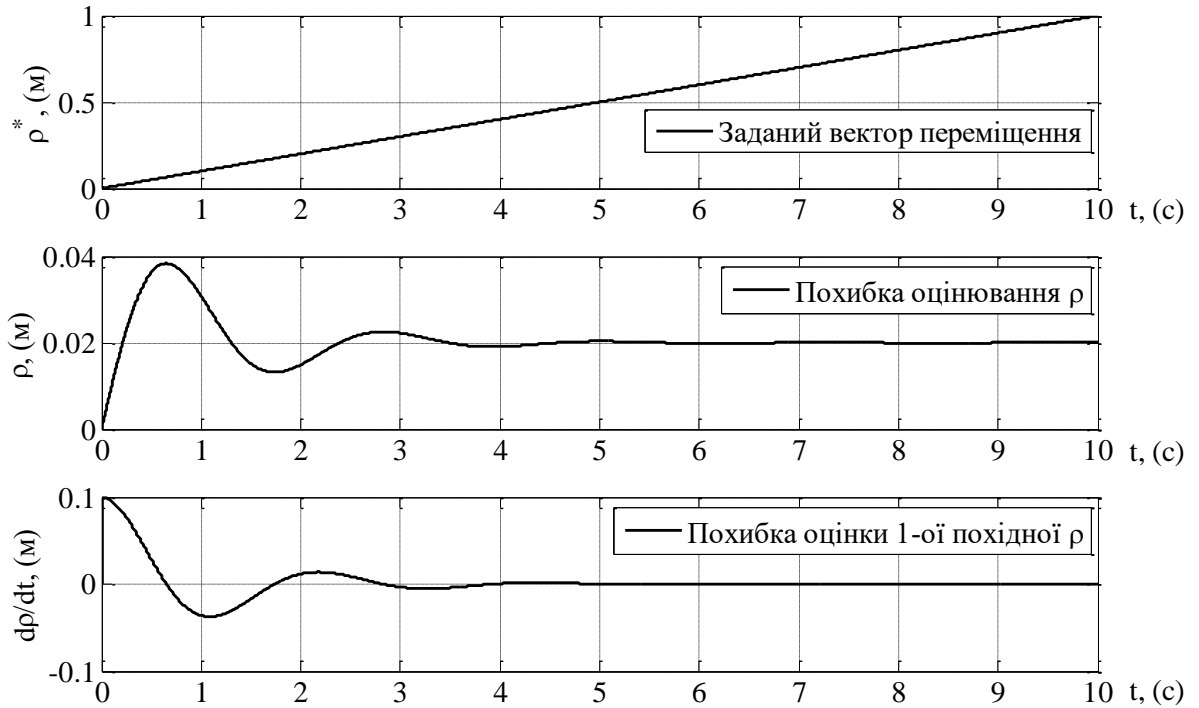


Рисунок 3.37 – Результати роботи спостерігача при коефіцієнтах налаштування

$$K_1 = 10, K_2 = 0.1, K_3 = 0.2$$

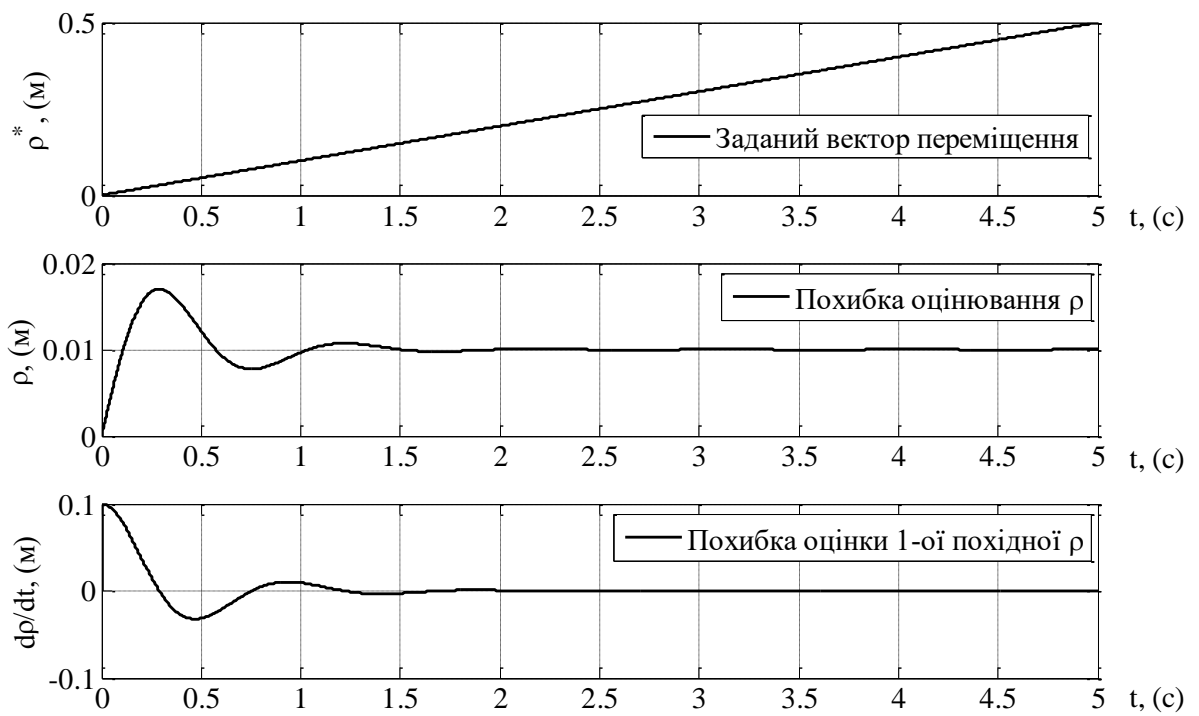


Рисунок 3.38 – Результати роботи спостерігача при коефіцієнтах налаштування

$$K_1 = 10, K_2 = 0.01, K_3 = 0.1$$

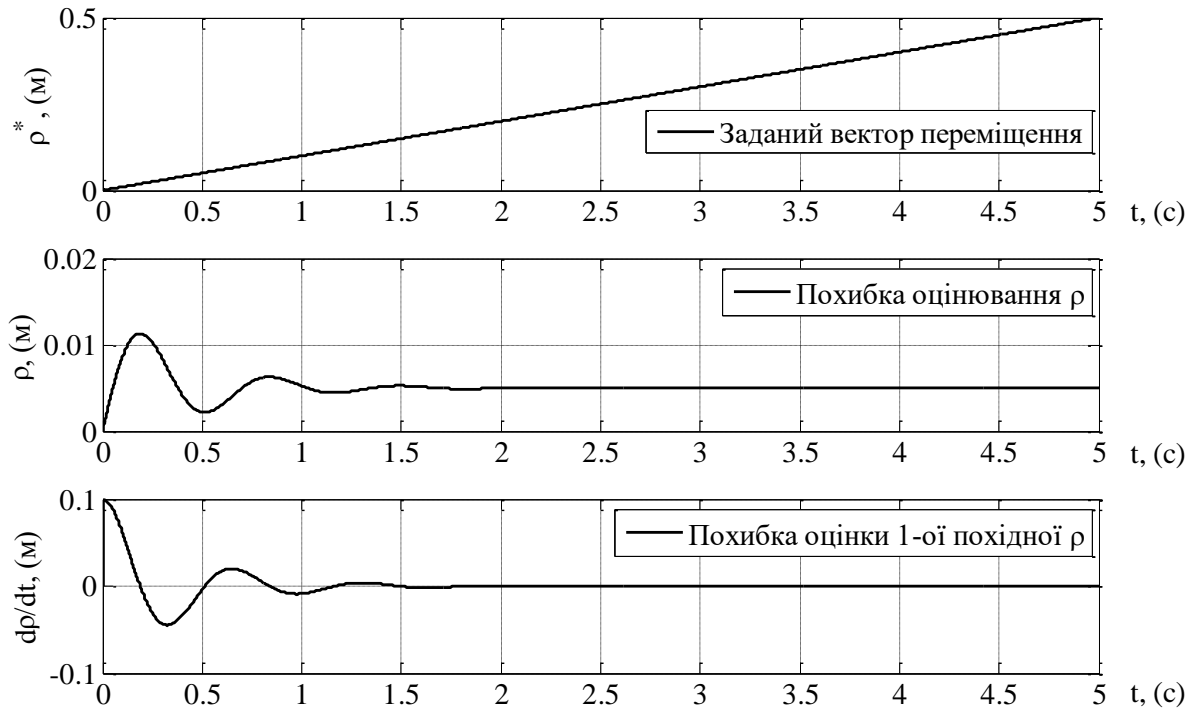


Рисунок 3.39 – Результати роботи спостерігача при коефіцієнтах налаштування

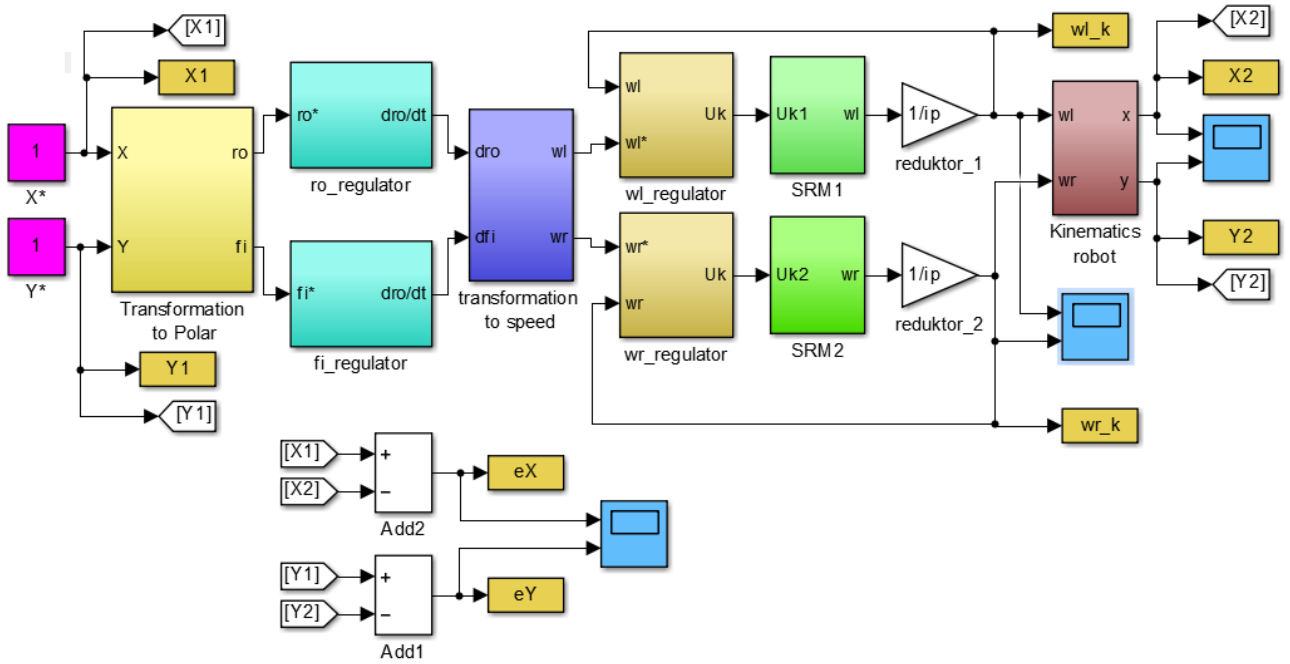
$$K_1 = 1000, K_2 = 0.01, K_3 = 0.05$$

3.4.4 Структурна схема математичної моделі системи керування роботом

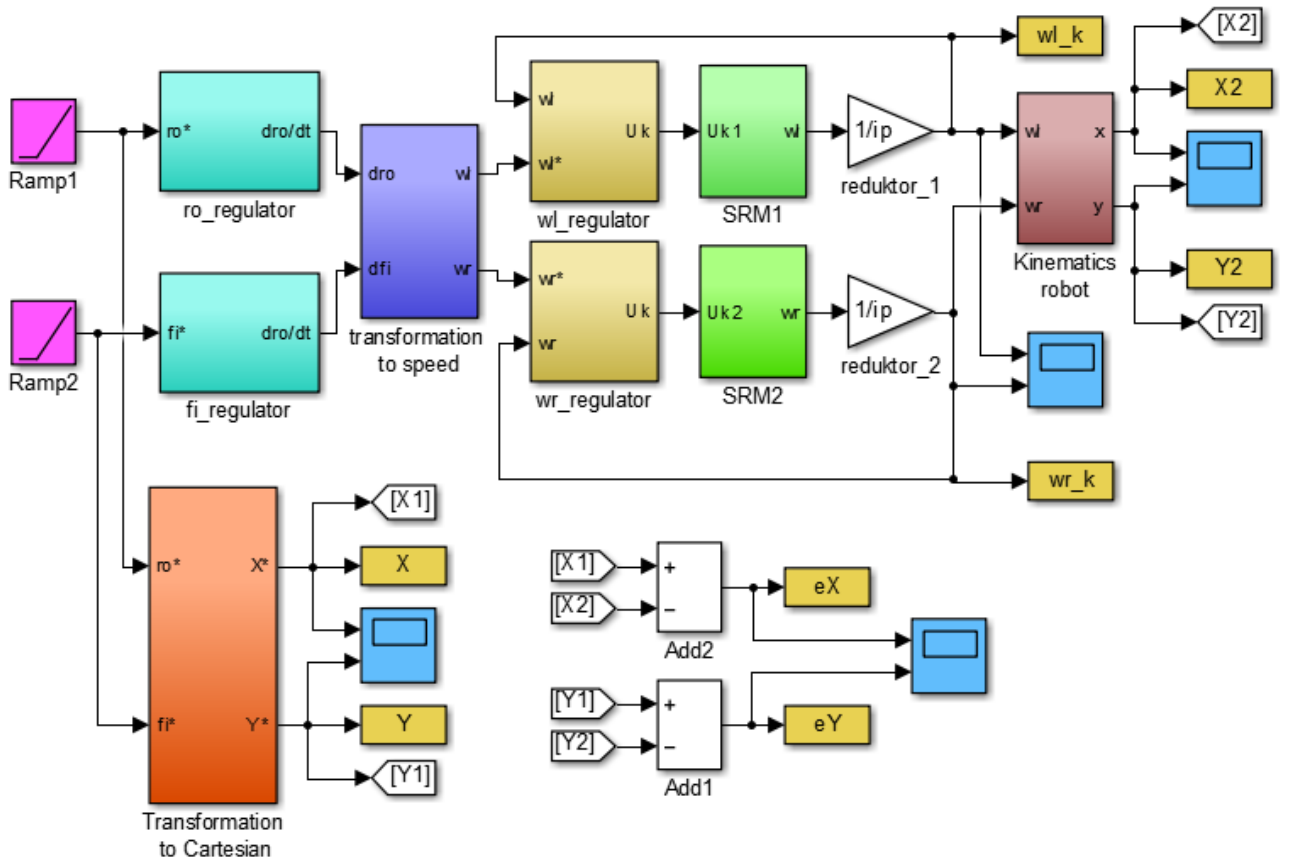
Повна модель керування робота може бути представлена у вигляді відпрацювання заданої траєкторії, як у декартових координатах (рис. 3.40 а), так і в полярних (рис. 3.40 б).

Для демонстрації коректної роботи системи керування проведемо тести. Спочатку робот має здійснити переміщення у задану точку з координатами [1,1] при заданих коефіцієнтах налаштування. Результати у графічному вигляді представлені на рис 3.41.

Інший випадок наведено при відпрацюванні бажаної складної траєкторії руху за формою спіралі. Завдання зручно подавати у полярних координатах. Графіки відпрацювання траєкторії при різних налаштуваннях регуляторів представлено на рис. 3.42 – рис. 3.45.



a)



б)

Рисунок 3.40 – Моделі системи керування робота з задаючою дією:

а) у декартових координатах; б) у полярних координатах

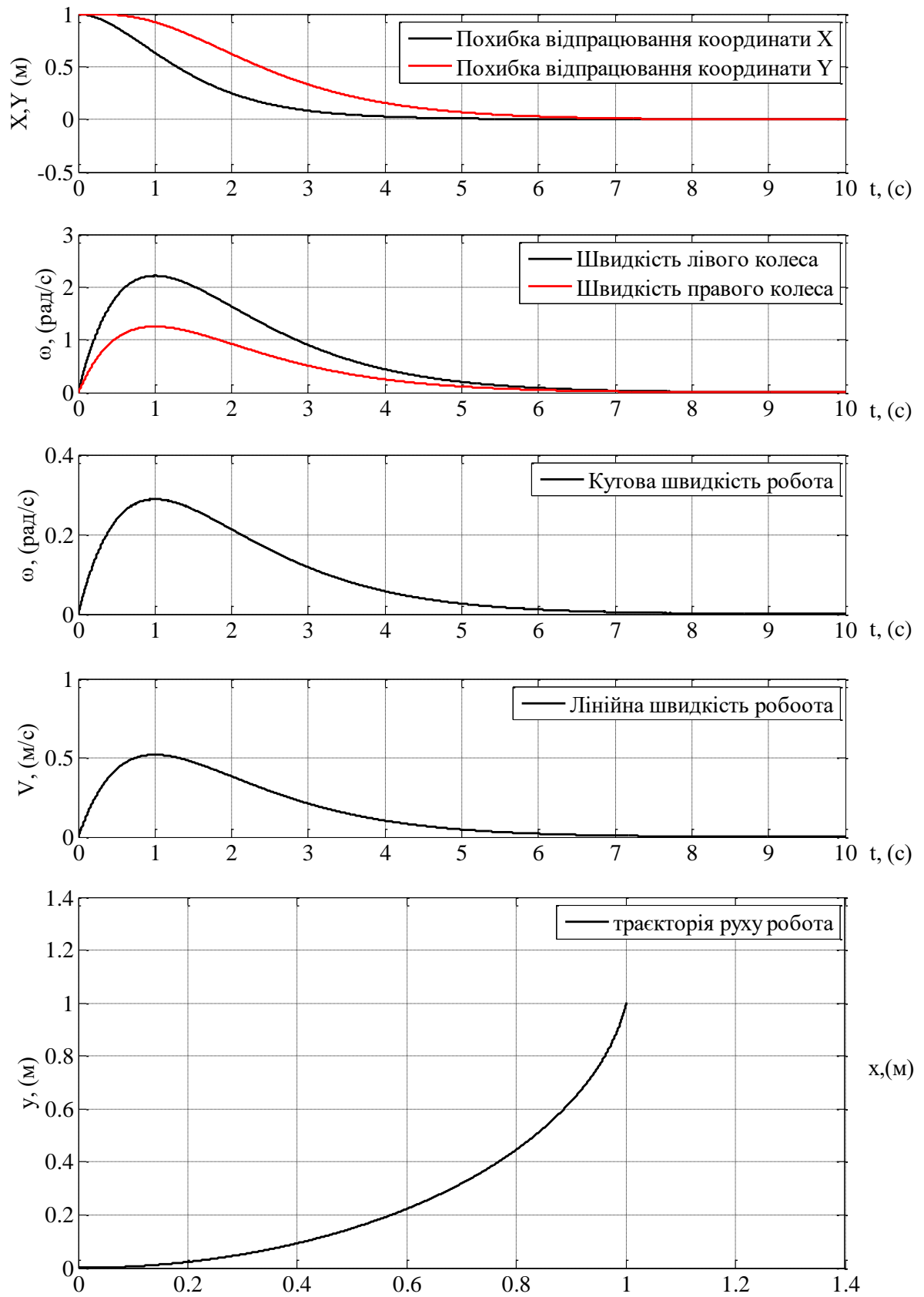


Рисунок 3.41 – Результати переміщення в задану точку при коефіцієнтах налаштування $K_d = 0.01$, $K_1 = 10$, $K_2 = 1$, $K_3 = 2$

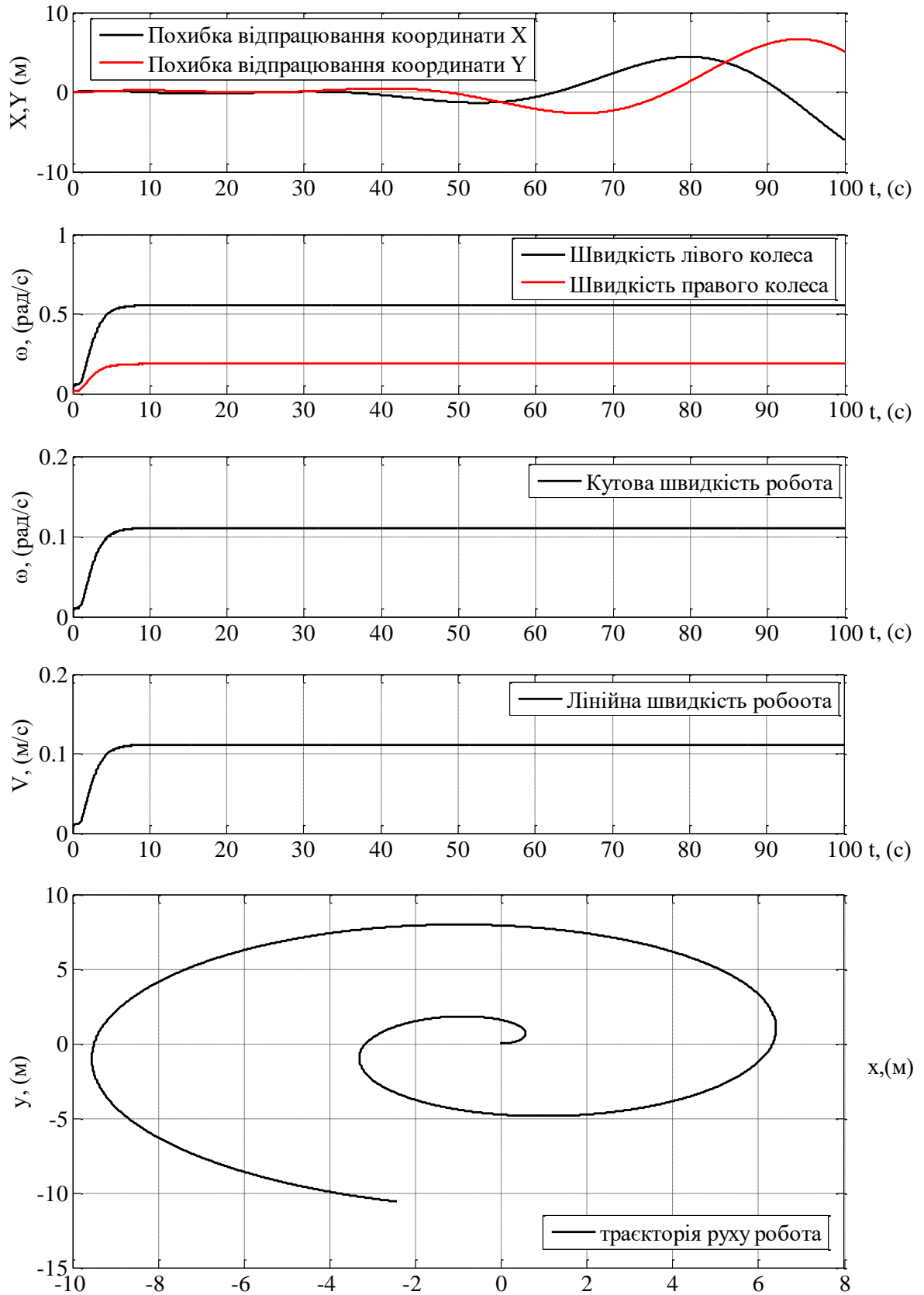


Рисунок 3.42 – Результати переміщення по заданій траєкторії руху при коефіцієнтах налаштування $K_d = 0.1$, $K_1 = 10$, $K_2 = 1$, $K_3 = 2$

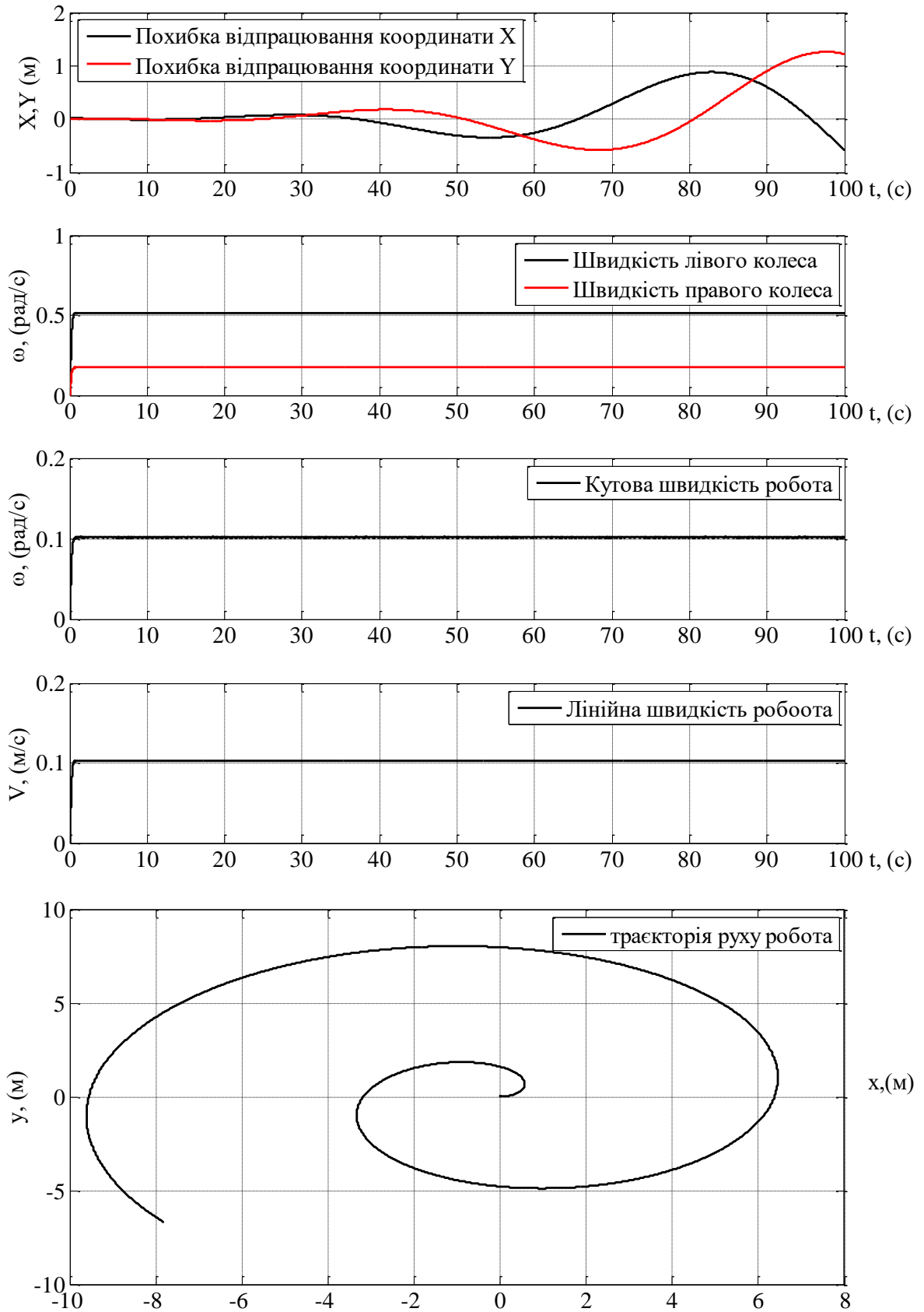


Рисунок 3.43 – Результати переміщення по заданій траєкторії руху при коефіцієнтах налаштування $K_d = 0.1$, $K_1 = 10$, $K_2 = 0.01$, $K_3 = 0.2$

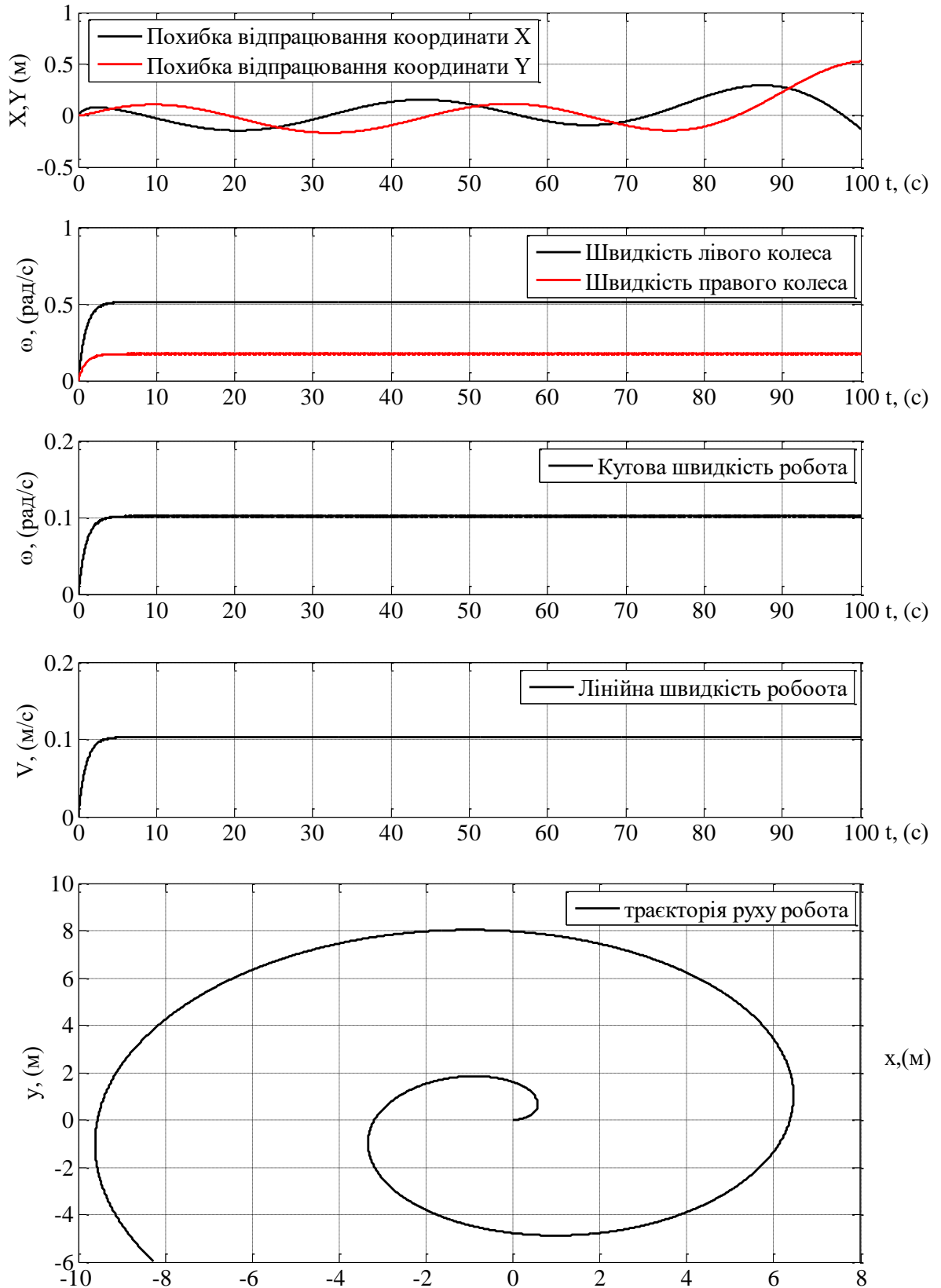


Рисунок 3.44 – Результати переміщення по заданій траєкторії руху при коефіцієнтах налаштування $K_d = 0.1$, $K_1 = 10$, $K_2 = 0.01$, $K_3 = 0.2$

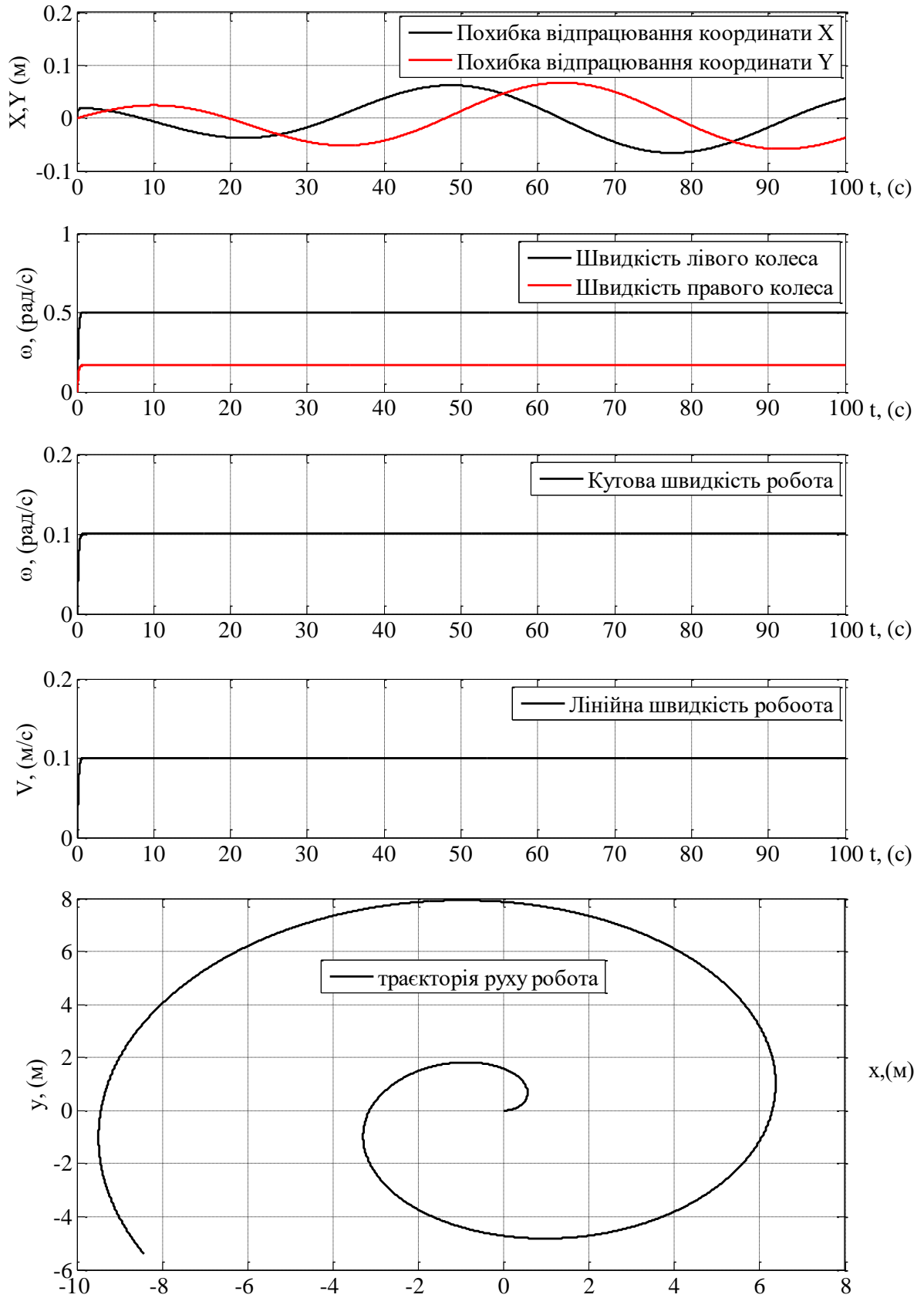


Рисунок 3.45 – Результати переміщення по заданій траєкторії руху при коефіцієнтах налаштування $K_d = 0.01$, $K_1 = 10$, $K_2 = 0.01$, $K_3 = 0.2$

Аналіз наведених графіків показує:

1. Створена система керування є асимптотично стійною, тому може бути застосована у різних відповідальних додатках при роботі в обмеженому просторі та за наявності обслуговуючого персоналу.
2. Робота системи керування в режимах позиціонування характеризується точним переміщенням у задану точку простору та нульовою усталеною похибкою за обома координатами. Траєкторії зміни цієї похибки визначаються налаштуванням відповідних регуляторів. В свою чергу, це формує швидкість та прискорення руху робота.
3. Відпрацювання складних траєкторій відбувається із похибками, які змінюються за гармонічними законами. Величини цих похибок є малими у порівнянні з траєкторіями які відтворюються та габаритами робота. Амплітуда похибок залежить від налаштувань системи керування та вхідного сигналу, а частота визначається траєкторією яка відпрацьовується.

3.5 Висновки до третього розділу

Наведена в даному розділі система керування є замкненою лише відносно швидкості двигунів. У той же час вона є розімкненою відносно координат робота, що може призвести до неточного відпрацювання бажаної траєкторії у випадку коли параметри, використовувані при налаштуванні системи керування відрізняються від реальних параметрів робота. Таке може статися внаслідок зміни умов роботи, впливу оточуючого середовища, тощо.

Усунути ці недоліки можна шляхом замикання системи керування за положенням робота. В якості датчиків положення платформи робота можуть використовуватися різного роду дальноміри та оптичні системи, побудовані на основі розпізнавання образів, якщо рух відбувається у відомому закритому приміщенні, або датчики системи GPS у випадку руху назовні. В останньому випадку необхідно потурбуватися про підвищення точності отримання сигналів позиціонування.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розроблена система керування може бути впроваджена компаніями, котрі займаються проектуванням та розробкою мобільних колісних роботів. Користування системою дозволить роботам відпрацьовувати задану траєкторію руху. В такому випадку, розроблений проект можна зробити комерційним. В даному розділі детально описано [63] етапи розробки стартап-проекту.

4.1 Опис ідеї проекту

Спочатку необхідно проаналізувати концепцію ідеї, в яких напрямках найбільш актуальна розробка, всі можливі переваги, які надаються користувачеві (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї розробленого проекту

Опис ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи керування колісним роботом	Використання розробленого алгоритму для впровадження в готові конструкції колісних роботів	Готовий робочий алгоритм для керування колісним роботом
	Використання теоретичного матеріалу розробниками чи студентами для покращення точності системи керування або створення нових побідних рішень	Наявність покрокового пояснення нової системи керування

Проаналізуємо потенційні техніко-економічні переваги даної розробки та виконаємо порівняння з можливими конкурентами (табл. 4.2) та (табл. 4.3).

Таблиця 4.2 – Техніко-економічні характеристики ідеї

№	Техніко-економічні характеристики
1.	Адаптований простий інтерфейс
2.	Наявність допоміжної документації створення системи керування
3.	Швидкий процес моделювання заданих параметрів
4.	Швидкий ввід необхідних заданих параметрів моделюючої системи
5.	Можливість зберегти у вигляді графічних зображень процесів моделювання заданого роботу

Таблиця 4.3 – Аналіз техніко-економічних переваг

Потенційні товари / концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
Система керування колісним роботом	Готові математично-розрахункові програми	Великі компанії, які мають великий штат розробників	Досить вузька специфікація, що вимагає кваліфікаційної підготовки	Для користування необхідний персональний комп'ютер з безкоштовним середовищем моделювання	Усі розрахунки реалізовані, тому необхідно лише підставити параметри розробляемого робота
					Розрахунки усі перевірені, тому гарантоване виключення наявності помилок
					В наявності уся супутня література з детальним описом системи керування

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведемо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (табл. 4.4). Необхідно лише програмне середовище для моделювання, яке в повній мірі доступне.

Таблиця 4.4 – Технологічне здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Створення системи керування колісним роботом з диференційним приводом	Теорія автоматичного керування. Моделююче середовище MatLAB Simulink	Наявна	Повністю доступна

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для вибору вектору розвитку проекту, спочатку необхідно визначити ринкові можливості та потенційні загрози. Потім проводиться аналіз потреб та пропозицій, що надають конкуренти.

Таблиця 4.5 – Попередня характеристика потенційного ринку

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3 (виробники, покупці, постачальники)
2.	Загальний обсяг продаж, ум.од	100
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідно ДСТУ
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	100 %

Таблиця 4.6 — Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Розвиток сфери робототехніки	Збільшення необхідних робочих платформ, зріст кваліфікаційного персоналу	Розробка систем для інших видів роботів
2.	Розширення функціоналу модуля	Створення більш досконалого додатку та більшої універсальності	Внесення змін до поточної програми, залучання більшого числа розробників, створення партнерських відносин з конкурентами

Таблиця 4.7 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Здійснювати розрахунки параметрів при проектуванні робота швидко та без помилок. Усунути витрати часу на розгляд та розбір методології розрахунку та розробки системи керування	Інженери що займаються розробкою, науковці та дослідники за для дослідження та поліпшення системи керування, студенти для освітнього процесу	Різні вимоги з погляду докладності та зрозумілості складових розрахунку. Різні вимоги до функціоналу, детальні для спеціалістів прості для студентів	Необхідно мати відповідну кваліфікацію для розуміння алгоритму та невеликі навички у моделюючій програмі

Таблиця 4.8 — Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Мала цільова аудиторія	Кількість спеціалістів дуже мала	Розробка систем керування для різних видів роботів
2.	Малий національний ринок	Розвиток робототехніки дуже незначний в Україні	Переклад пояснювальної записки на інші мови
3.	Вузькоспеціалізований додаток з малою впізнаваністю	Менша аудиторія гарантує менший прибуток	Залучення клієнтів за допомогою реклами

Таблиця 4.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика
1. тип конкуренції: монополія	Схожа продукція у конкурентів, але не ідентична
2. За рівнем конкурентної боротьби: інтернаціональний	За кордоном робототехнічна галузь більше розвинута
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Притаманна одному напрямку застосування

Таблиця 4.10 — Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Немає	Потенційними конкурентами може стати будь-яка компанія що специфікується на розробці роботів та систем керування для них	Моделююча програма MatLAB Simulink, нові оновлення.	Якщо клієнтам не сподобається продукт, то вони можуть скористатися іншими рішеннями	Конкурентність
Висновки	Боротьба з прямими конкурентами відсутня	Можливості входу на ринок вільні. Конкурентів не достатньо, щоб створити загрозу	Постачальник не диктує умови. Але може ускладнити роботу своїми діями (наприклад зробити програму платною)	Клієнти не диктують умови на ринку, але можуть відмовитись від продукту	Відсутня

4.4 Розробка ринкової стратегії

Таблиця 4.11 — Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Розробники	Висока	Високий	Низька	Висока
2.	Науковці	Низька	Низький	Низька	Висока
3.	Студенти	Низька	Низький	Низька	Висока

Таблиця 4.12 — Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрхідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Так	Пошук нових	Ні	Диференціації

Таблиця 4.13 — Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Новий метод, простий інтерфейс, детальний опис розробки	Стратегія диференціації	Новизна, керованість, зрозумілість	Якість, технологічність, підтримка

4.5 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі описано образ ідеї стартап-проекту, наведено усі його переваги та недоліки, виконано технологічний аудит можливостей ринку та потенційних клієнтів. Проведено аналіз з приводу конкурентів та розроблено ринкову стратегію. Створений продукт має унікальні властивості, на ринку присутній сегмент зацікавлених споживачів, тому була запропонована стратегія диференціації, як стратегія розвитку. З аналізу очевидно, що проект має право на існування та вихід на ринок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі вирішено актуальне питання розробки моделі для синтезу багатоканальної системи керування рухом робота, на основі високоформалізованої математичної моделі, триколісного мобільного робота з двома ведучими колесами, які приводяться до руху синхронними реактивними двигунами.

При цьому було отримано наступні результати:

1. На основі аналітичного огляду розглянуто загальні відомості про основні складові колісних мобільних роботів. Проаналізовано усі сильні та слабкі сторони різних концепцій, використовуваних електроприводів та систем керування.

2. Методом розкладання проекції усіх сил що діють на робота, описано алгоритм розрахунку приводних двигунів. Виконано підбір усіх необхідних силових елементів, що необхідні для управління двигунами.

3. Розглянуто кінематику робота, а саме рішення прямої та зворотної задачі з відповідними графічними результатами.

4. Значна частина існуючих математичних моделей СРМ побудована з певними припущеннями, що негативно впливають на результат моделювання, тим самим не дає змогу розробити коректну систему керування. Тому математичну модель синхронного реактивного двигуна побудовано на основі методу що використовує апроксимовані залежності індуктивності фазної обмотки статора від кута повороту ротора та струму в обмотці. Цей підхід допоміг максимально наблизитися до моделювання реальних перехідних процесів двигуна.

5. Систему керування переміщенням виконано у вигляді замкнутої системи відносно керування швидкістю приводних двигунів. Для цього було пристосовано релейний ПД регулятор. Регулятор, за допомогою давача положення, дізнається реальну швидкість двигуна, та вносить свої корекційні дії в процес формування необхідної напруги живлення електричних машин.

6. Розроблено спостерігач для надання інформації про диференційні складові бажаної лінійної та кутової швидкостей.

7. Побудовано систему керування переміщенням в задану точку та відпрацювання заданої траєкторії руху, при завданні як в декартових координатах, так і в полярних. В результаті система керування в режимах позиціонування характеризується точним переміщенням у задану точку простору та нульовою усталеною похибкою за обома координатами. Відпрацювання складних траєкторій відбувається із похибками, які змінюються за гармонічними законами.

8. Для мінімізації похибок відпрацювання бажаної траєкторії, проведено дослідження системи керування рухом при різних коефіцієнтах налаштування регуляторів. В результаті вдалось кардинально зменшити похибку за положенням до рівня $[\tilde{x}, \tilde{y}] \leq 0.05$ м.

Усі поставлені задачі виконано.

Підсумовуючи можна відзначити, що система керування за відпрацюванням руху до заданої координати здійснюється безпомилково. При відпрацюванні складної траєкторії, шляхом налаштування коефіцієнтів регуляторів, виникає похибка, яка є малою у порівнянні з траєкторіями які відтворюються та габаритами робота. Важливо відзначити, що система керування не має зворотного зв'язку за позиціонуванням, тому при виникненні непередбачуваної збурюючої дії, робот може не коректно відпрацьовувати бажане переміщення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. R. A. Orozco-Velázquez et al., "Ackerman Mobile Robot with Arm," 2016 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), Cuernavaca, 2016, pp. 55-60.
2. S. Yamada, S. Hirose, G. Endo, K. Suzumori and H. Nabae, "R-Crank: Amphibious all terrain mobile robot," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, 2016, pp. 1067-1072.
3. G. K. Dey, R. Hossen, M. S. Noor and K. T. Ahmmed, "Distance controlled rescue and security mobile robot," 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), Dhaka, 2013, pp. 1-6.
4. M. Przybyła, K. Łakomy and P. Herman, "Strategy for designing a control system for a target-approach task by a mobile robot," 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), Senigallia, 2014, pp. 1-6.
5. J. K. Parker, A. R. Khoogar and D. E. Goldberg, "Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms," Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, 1989, pp. 271-276 vol.1.
6. M. Bloch, M. Reyhanoglu, and N. H. McClamroch, "Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 37, no. 11, pp. 1746-1757, Nov. 1992.
7. D. Panagou, H. G. Tanner and K. J. Kyriakopoulos, "Control of nonholonomic systems using reference vector fields," 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, 2011, pp. 2831-2836.
8. S. Maniatopoulos, D. Panagou and K. J. Kyriakopoulos, "Model Predictive Control for the navigation of a nonholonomic vehicle with field-of-view constraints," 2013 American Control Conference, Washington, DC, 2013, pp. 3967-3972.

9. S. J. Buckley, "Fast motion planning for multiple moving robots," Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, 1989, pp. 322-326 vol.1.
10. P. Anjaly, A. Devanand and V. R. Jisha, "Moving target tracking by mobile robot," 2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON), Thrissur, 2014, pp. 1-6.
11. Міжнародний стандарт ISO 8373:2021 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en>
12. Класифікація // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://intellect.icu/klassifikatsiya-robotov-7794>
13. Класифікація та типи роботів // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.designtechproducts.com/articles/classification-of-robots>
14. Ступина Е.Е., Ступин А.А., Чупин Д.Ю., Каменев Р.В. "Основы робототехники: учебное пособие". — Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2019. — 160 с.
15. R. Silva Ortigoza *et al.*, "Wheeled Mobile Robots: A review," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 6, pp. 2209-2217, Dec. 2012, doi: 10.1109/TLA.2012.6418124.
16. G. Campion, G. Bastin and B. D'Andrea-Novell, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," [1993] *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, pp. 462-469 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.1993.292023.
17. Jigar J. Parmar, Chirag V. Savant, "Selection of Wheels in Robotics", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 10, October-2014.
18. R. Velázquez and A. Lay-Ekuakille, "A review of models and structures for wheeled mobile robots: Four case studies," *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2011, pp. 524-529, doi: 10.1109/ICAR.2011.6088568.

19. Колесо Илона // [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Колесо_Илона
20. K. Shabalina, A. Sagitov and E. Magid, "Comparative Analysis of Mobile Robot Wheels Design", *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2018, pp. 175-179, doi: 10.1109/DeSE.2018.00041.
21. JIAMIN WANG, Dr. Yuyi Lin, "RESEARCH & DEVELOPMENT OF Q-BALLER – A SPHERICAL WHEELED ROBOT", *A Thesis presented to the Faculty of the Graduate School at the University of Missouri-Columbia*, May 2017.
22. Hamed Navabi, Soroush Sadeghnejad, Sepehr Ramezani, Jacky Baltes, "Position Control of the Single Spherical Wheel Mobile Robot by Using the Fuzzy Sliding Mode Controller", *Article in Advances in Fuzzy Systems*, published January 2017, doi: 10.1155/2017/2651976.
23. Nava Rodriguez, Nestor & Cabás Ormaechea, Luis Maria & Cabás, Ramiro & Gonzalez, Angel & Ottaviano, Erika & JARDÓN HUETE, Alberto, "Advanced Mechanics in Robotic", January 2011, doi: 10.1007/978-0-85729-588-0.
24. Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh and Davide Scaramuzza, "Introduction to Autonomous Mobile Robots, Second Edition", *Intelligent Robotics and Autonomous Agents series*, February 18, 2011.
25. Kiattisin Kanjanawanishkul, "Omnidirectional wheeled mobile robots: wheel types and practical applications", *Int. J. Advanced Mechatronic Systems*, Vol. 6, No. 6, 2015, pp.289–302, doi:10.1504/ijamechs.2015.074788.
26. Y. -J. Ryoo, S. Park, Y. -J. Lee and K. S. Byun, "Active Steerable Driving Mechanism Using Two In-Wheel Motors for Omnidirectional Motion of Robotic Mobile Platform," *2016 Joint 8th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, 2016, pp. 382-385, doi: 10.1109/SCIS-ISIS.2016.0086.

- 27.M. Wada and S. Mori, "Holonomic and omnidirectional vehicle with conventional tires," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, pp. 3671-3676 vol.4, doi: 10.1109/ROBOT.1996.509272.
- 28.Активне самовстановлюване колесо // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.nsk.com/company/news/stories/2022/0704a.html>
- 29.Рульове керування Аккермана // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Géométrie_directionnelle_d%27Ackermann
- 30.Adria Fung, William Parker, "Enhanced Ackermann Steering Platform", *Worcester Polytechnic Institute*, April 30, 2015.
- 31.Woojin Chung and Guy Campion, "Springer Handbook of Robotics - Chapter 17. Wheeled Robots" Springer Verlag (in Heidelberg). ISBN: 978-3540239574. Book chapter. pp. 391-410. Jun. 2008.
- 32.D. M. Ball, C. F. Lehnert and G. F. Wyeth, "A practical implementation of a continuous isotropic spherical omnidirectional drive," *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 3775-3780, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509645.
- 33.Двигуни всередині промислових автономних роботів // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://islproducts.com/the-motors-inside-industrial-autonomous-robots/>
- 34.Колекторний двигун // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor
- 35.Безколекторний двигун // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
- 36.Pete Millett, Sr. Technical Marketing Engineer at MPS, "Brushless vs. Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other", MPS Proprietary Information, 2022.
- 37.Кроковий двигун // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor

38. Основи крокових двигунів: типи, використання та принципи роботи // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>
39. Асинхронний двигун // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
40. Асинхронний двигун: типи та принцип роботи // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.elprocus.com/induction-motor-types-advantages/>
41. Синхронний двигун з постійними магнітами // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_motor#Permanent-magnet_motors
42. Основи СПДМ: типи, використання та принципи роботи // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.elprocus.com/what-is-a-permanent-magnet-synchronous-motor-its-working/>
43. Синхронний реактивний двигун // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.elprocus.com/synchronous-reluctance-motor-working/>
44. B. Ban, S. Stipetić and M. Klanac, "Synchronous Reluctance Machines: Theory, Design and the Potential Use in Traction Applications," 2019 *International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, 2019, pp. 177-188, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883905.
45. Попович М.Г., Ковальчук О.В. / Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
46. Dušek, F., Honc, D., Rozsival, P.: "Mathematical Model of Differentially Steered Mobile Robot", Editors: Fikar, M., Kvasnica, M., *In Proceedings of the 18th International Conference on Process Control*, Tatranská Lomnica, Slovakia, 221–229, 2011.
47. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo, Kambiz M. Ebrahimi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles" Third Edition, 2018, p 546.
48. Синхронний реактивний двигун Oemer QSR – SincroSPE 100P // [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.oemerspa.com/download/catalogues/7.3.2_QSR.pdf

49. Планетарний редуктор SITI NRG 20 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://siti.com.ua/wp-content/uploads/2015/10/NRG.pdf>
50. Акумулятор LiFePO4 EVE Energy 3.2V 50Ah // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://probattery.com.ua/akkumulyatory/lifepo4/akkumulyator-lifepo4-eve-energy-32v-50ah>
51. IGBT модуль FF100R12RT4 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF100R12RT4-DS-v02_01-EN.pdf?fileId=db3a304327b8975001280601349b615b
52. Драйвер для IGBT ключів SKHI 21A R // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-driver/detail/skhi-21a-r-15012520.html>
53. DC/DC перетворювач TBA 1-2413 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tba1_datasheet.pdf
54. Конденсатор МКР1848С73280JY5 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Vishay-Roederstein/МКР1848С73280JY5?qs=sGAEpiMZZMsh%252B1woXyUXj%252BAjEZrMVGw%252Bzc1Vw9B%252Bdc4%3D>
55. Резистор HSA5010RJ // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-Holsworthy/HSA5010RJ?qs=sGAEpiMZZMtIubZbdhIBIBiJlqAHDdPFQZjGdMfZQs8%3D>
56. Давач струму LEM НОВ 100-Р // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.lem.com/en/hob-100p>
57. Датчик напруги LV-25P // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.lem.com/ru/lv-25p>
58. Резистор РТF5638K600ВYЕК // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Vishay-Dale/РТF5638K600ВYЕК?qs=DncPPdjkdc2MНk648wlpjg%3D%3D>

59. Gregory Dudek, Michael Jenkin, “Computational principles of mobile robotics. – 2nd ed”, *Cambridge University Press*, 2010.
60. Калюжный К.А., Волянский Р.С., Садовой О.В., “Математическое моделирование синхронной реактивной машины”, *Теоретические вопросы автоматизированного электропривода*, ст.44-45.
61. К.А. Калюжный, А.В. Садовой, Ю.В. Сохина, “Аппроксимация индуктивности фазы синхронной реактивной машины”, *Днепродзержинский государственный технический университет, Украина*.
62. А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина, под ред. А.В. Садвого, Системы оптимального управления прецизионными электроприводами, ИСИМО, Киев, 1996. – 298 с.
63. Круш П.В, Шевчук Н.А., Андрусъ О.І., Стартап-проект. Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту», *КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019р.* // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27914>

ДОДАТОК А

ЛІСТІНГ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО БЛОКУ “CONTROL VOLTAGES”

```

function [U1,U2,U3,U4,U5,U6] = fcn(U,t,tetta)

    U1=0;U2=0;U3=0;U4=0;U5=0;U6=0;
    if (tetta>=0) && (tetta<30)
        U1=U;U2=U;U3=U;U4=0;U5=0;U6=0;
    end
    if (tetta>=30) && (tetta<60)
        U1=U;U2=U;U3=0;U4=0;U5=0;U6=U;
    end
    if (tetta>=60) && (tetta<90)
        U1=U;U2=0;U3=0;U4=0;U5=U;U6=U;
    end
    if (tetta>=90) && (tetta<120)
        U1=0;U2=0;U3=0;U4=U;U5=U;U6=U;
    end
    if (tetta>=120) && (tetta<150)
        U1=0;U2=0;U3=U;U4=U;U5=U;U6=0;
    end
    if (tetta>=150) && (tetta<180)
        U1=0;U2=U;U3=U;U4=U;U5=0;U6=0;
    end
    if (tetta>=180) && (tetta<210)
        U1=U;U2=U;U3=U;U4=0;U5=0;U6=0;
    end
    if (tetta>=210) && (tetta<240)
        U1=U;U2=U;U3=0;U4=0;U5=0;U6=U;
    end
    if (tetta>=240) && (tetta<270)
        U1=U;U2=0;U3=0;U4=0;U5=U;U6=U;
    end
    if (tetta>=270) && (tetta<300)
        U1=0;U2=0;U3=0;U4=U;U5=U;U6=U;
    end
    if (tetta>=300) && (tetta<330)
        U1=0;U2=0;U3=U;U4=U;U5=U;U6=0;
    end
    if (tetta>=330) && (tetta<360)
        U1=0;U2=U;U3=U;U4=U;U5=0;U6=0;
    end
end
end

```

ЛІСТІНГ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО БЛОКУ “CONTROL VOLTAGES”

```
function [tetta1,tetta2,tetta3,tetta4,tetta5,tetta6]
= fcn(fi)
    tetta1=0;tetta2=0;tetta3=0;tetta4=0;tetta5=0;tetta6=0;
    tetta1= mod(fi,360);
    tetta2= mod(fi+30,360);
    tetta3= mod(fi+60,360);
    tetta4= mod(fi+90,360);
    tetta5= mod(fi+120,360);
    tetta6= mod(fi+150,360);
```