

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ С. М. Пересада  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**

**на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра**

**за напрямом підготовки 6.050702 – електромеханіка**

(код і назва)

на тему: Взаємозв'язана електромеханічна система транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс

Виконав: студент 4 курсу, групи \_\_\_\_\_ ЕП-51  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Сорока Павло Ігорович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Теряєв Віталій Іванович \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ доц., Чумак В.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

### ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
	A4	6.050702.5126.016.БР	Завдання на дипломний проект	2	
	A4	6.050702.5126.016.БР	Пояснювальна записка	75	
	A1	6.050702.5126.016.ДП	Схема моделі взаємозв'язаної електромеханічної системи	1	
	A1	6.050702.5126.016.ДП	Функціональна схема асинхронного електроприводу	1	
	A1	6.050702.5126.016.ДП	Графіки перехідних процесів	1	

				6.050702.5126.016.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Сорока П.І.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Теряєв В.І.				2	77
Консульт.					КПІ ім. І. Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -51	
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.					

## **Пояснювальна записка до дипломного проекту**

на тему: Взаємозв'язана електромеханічна система транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 6.050702 – електромеханіка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

С. М. Пересада

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Сорока Павло Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Взаємозв'язана електромеханічна система транспортного засобу з індивідуальним приводом колес

керівник проекту \_\_\_\_\_ д.т.н., доцент Теряєв Віталій Іванович,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2019 р.

3. Вихідні дані до проекту: повна маса електромобіля – 1450 кг; максимальна швидкість – 100 км/год; площа лобової частини – 1.8 м<sup>2</sup>; радіус коліс – 0.28 м, привод коліс – задній, індивідуальний.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Аналітичний огляд; 2. Вибір потужності тягових двигунів електромобіля; 3. Математична модель взаємозв'язаної електромеханічної системи; 4. Розробка алгоритмів керування індивідуальним

електроприводом; 5. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Схема моделі взаємозв'язаної електромеханічної системи; 2. Функціональна схема асинхронного електроприводу; 3. Графіки перехідних процесів; 4. Презентація

6. Консультанти розділів проекту\*

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

7. Дата видачі завдання

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд	22.04.19	
2	Вибір потужності тягових двигунів електромобіля	29.04.19	
3	Математична модель взаємозв'язаної електромеханічної системи	10.05.19	
4	Розробка алгоритмів керування індивідуальним електроприводом	13.05.19	
5	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи	20.05.19	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	5.06.19	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сорока П.І.

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_ (підпис)

Теряєв В.І.

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

\*Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на 77 сторінках та вміщує 29 рисунків, 2 таблиці та 3 плакати А1.

В даному дипломному проекті виконано аналіз існуючих систем приводу електромобілів, розроблена математична модель взаємозв'язаної електромеханічної системи, здійснено синтез системи керування транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс. Досліджено вплив перехресних зв'язків на динамічні та статичні характеристики електроприводу.

Методом математичного моделювання отримано графіки перехідних процесів при відпрацюванні заданих траєкторій швидкості, а також реакцію системи на зовнішнє збурення.

**ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

					6.050702.5126.016.БР		
		№ докум.	Підпис				
Розроб.	Сорока П.І.			<i>Взаємозв'язана електромеханічна система транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс</i> <i>Реферат</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Теряев В.І.					6	77
Н. Контр.					<i>НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -51</i>		
Затверд.	Пересада С. М.						

## SUMMARY

The diploma project is executed on 77 pages and contains 29 figures, 2 tables and 3 posters A1.

In this diploma project an analysis of existing electric vehicle drives is performed, a mathematical model of the interconnected electromechanical system is developed, and a synthesis of the control system of a vehicle with an individual wheel drive is carried out. The influence of cross-links on the dynamic and static characteristics of the electric drive is investigated.

Graphs of transient processes and reaction of the system to external perturbation were obtained via mathematical modeling method.

ELECTROCAR, INDIVIDUAL ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY  
CONTROL, MATHEMATICAL MODEL, RESEARCH, DYNAMIC  
CHARACTERISTICS

					6.050702.5126.016.BW			
		№ of doc.	Sign					
Devel.		Soroka P.I.			<i>Interconnected electromechanical system of a vehicle with an individual wheel drive Summary</i>	L.	Page	Pages
Checked		Teriaev V.I.					7	77
N. Contr.						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA		
Approved		S. Peresada						

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ .....	12
1.1 Типові технічні рішення тягового електроприводу транспортних засобів .....	12
1.2 Системи індивідуального електроприводу коліс електромобілів .....	18
1.3.Математичне моделювання електромобіля як об'єкта системи керування.....	22
1.4 Формулювання вимог до електроприводу і системи автоматичного керування.....	25
Висновки до розділу 1.....	27
2 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	28
Висновки до розділу 2.....	36
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	37
Висновки до розділу 3.....	42
4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ .....	43
4.1 Розімкнений частотний алгоритм.....	43
4.2 Частотний алгоритм замкненого керування з регулятором швидкості .....	45

4.3 Непряме векторне керування .....	50
Висновки до розділу 4.....	54
<b>5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....</b>	<b>55</b>
5.1 Частотне розімкнене керування.....	55
5.2 Частотне керування з регулятором швидкості .....	60
5.3 Непряме векторне керування швидкістю .....	65
Висновки до розділу 5.....	72
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>73</b>

## ВСТУП

Останнім часом зростає необхідність у транспортних засобах з низьким рівнем викидів у навколишнє середовище. Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння є досить значним джерелом забруднення повітря через викиди парникових газів, монооксиду вуглецю та інших токсинів. Маючи значно менший вплив на навколишнє середовище, електромобілі є рішенням проблеми створення транспортного засобу з низьким рівнем забруднення природи. Крім цього, за попередні роки були удосконалені енергоефективність та керованість електричних наземних транспортних засобів за рахунок використання сучасних технологій та розробок.

Більшість пасажирських автомобілів, представлених на ринку, використовують один приводний двигун, який розподіляє потужність на два або чотири колеса через коробку передач і диференціали. Електричні наземні транспортні засоби можуть використовувати різні конфігурації, що можуть значно впливати на характеристики автомобіля та його ефективність. Одна з конфігурацій, що показала поліпшені результати в характеристиках роботи транспортного засобу, полягає у використанні індивідуально керованих двигунів (безпосередній або редукторний привід). Така концепція дозволяє покращити керованість транспортного засобу, підвищити точність вимірювання характеристик транспортного засобу, оскільки кожен двигун може використовуватися як вимірювальний прилад для визначення швидкості кожного колеса. Основним напрямком покращення параметрів функціонування електромобілів є точна та швидка генерація крутного моменту як в прямому, так і в зворотному напрямках. Це дозволяє проводити більш точні вимірювання та оцінки динаміки транспортного засобу при різних умовах дорожнього покриття для регулювання крутного моменту електромобіля, що покращує продуктивність та керованість.

Переваги індивідуального приводу коліс, описані вище, можуть бути застосовані при розробці систем з розподілом крутного моменту між ведучими колесами електричного транспортного засобу, так звані електронні диференціали. За рахунок вимірювання кута повороту машини, система керування розподіляє крутний момент у необхідному співвідношенні між ведучими колесами, що є ефективним засобом поліпшення динамічних характеристик електромобіля. Використання індивідуального приводу коліс в поєднанні системами оцінки кута повороту автомобіля є зростаючою областю як в наукових, так і комерційних дослідженнях та розробках.

Метою даного дипломного проекту є розробка та дослідження взаємозв'язаної електромеханічної системи транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Вибір тягового електроприводу транспортного засобу є важливим кроком у розробці загальної системи керування, адже необхідно враховувати багато критеріїв, такі як: ефективність, вартість, надійність, щільність потужності, керованість тощо. Найбільш поширеними двигунами, що використовуються в гібридних електричних транспортних засобах і електромобілях, є: двигуни постійного струму, асинхронні двигуни, синхронні з постійними магнітами, вентильні реактивні та безколекторні двигуни постійного струму [1].

## 1.1 Типові технічні рішення тягового електроприводу транспортних засобів

На даний час існує шість основних типових конфігурацій електроприводу електричних транспортних засобів [2], які зображені на рис. 1.1. Ці конфігурації розглядаються з переднім приводом коліс, але можливі варіанти як і з задніми ведучими колесами, так і з повним приводом.

Перші три типи фактично є різними модифікаціями однієї системи електроприводу (рис. 1.1,а,б,в). Тип а) безпосередньо походить від звичайного автомобіля з ДВС і складається з електричного двигуна, зчеплення, коробки передач і диференціала. Використання коробки передач в поєднанні зі зчепленням дає можливість контролювати крутний момент, прикладений до коліс. Диференціал дозволяє колесам обертатися на різних швидкостях під час поворотів. Так як така схема є напряду переробленим автомобілем з ДВС, її практична реалізація є дуже легкою. Але використання коробки передач є недоцільним, бо з електричні двигуни мають здатність створювати момент при

нульовій швидкості та можуть ефективно працювати у широкому діапазоні швидкостей.

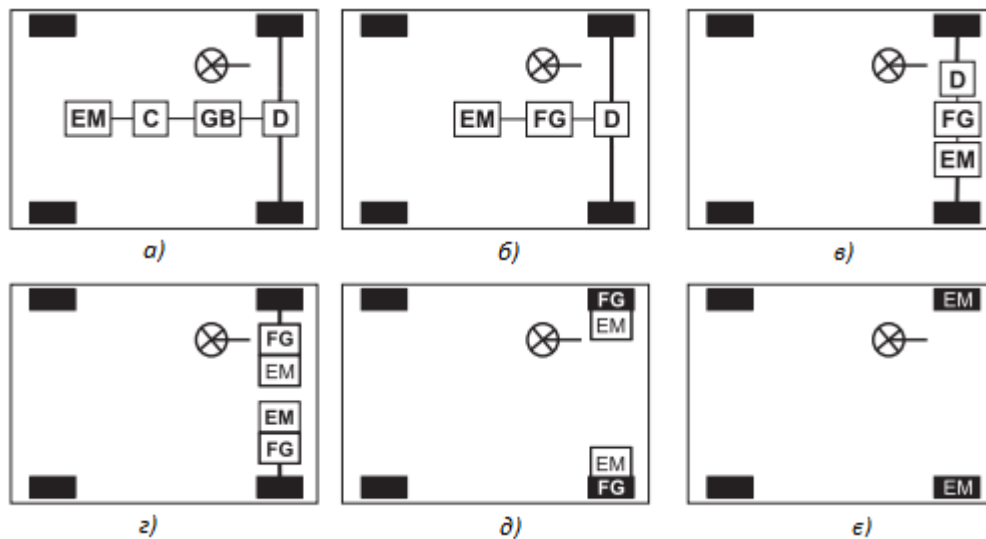


Рисунок 1.1 – Типові конфігурації електромобілів

Для відповідності високій швидкості обертання двигуна зі швидкістю коліс достатньо і однієї передачі. Це враховується у конфігурації б), яка складається тільки з електродвигуна, редуктора і диференціала. Інтеграція електродвигуна, редуктора і диференціала в єдину збірку дозволяє створити більш компактну конфігурацію в), забезпечуючи можливість для більш гнучкої розробки решти елементів електромобілю. Ця конфігурація нагадує поперечну систему переднього приводу транспортного засобу з ДВС [3].

Системи типу в) є більш надійними, міцними, легкими, дешевими і забезпечують більш якісну передачу моменту, ніж відповідні конфігурації а) і б). Ці переваги призводять до того, що більшість електричних транспортних засобів використовують інтегровані системи приводу, що містять двигун, редуктор та диференціал у єдиному модулі. Наприклад, Tesla Roadster і Mini-Cooper E використовують асинхронний двигун змінного струму в поєднанні з редуктором для приводу задніх та передніх коліс відповідно [5, 6]. Mitsubishi i-MiEV використовує систему зі синхронним двигуном з постійними магнітами та

диференціал для передачі крутного моменту до задніх коліс. Honda оснащує електромобіль Honda FCX Clarity Fuel Vehicle компактним СДПМ потужністю 100 кВт.

У конфігурації г) диференціал знімається і замінюється системою, в якій кожне привідне колесо керується окремим двигуном. Механічний диференціал замінюється так званим електронним, в якому кожний двигун отримує власне завдання моменту або швидкості, що призводить до більшої загальної ефективності. Проте надійність електронного диференціала менша в порівнянні з чисто механічною конструкцією, хоча вона значно покращується з кожним роком [4]. Ця конфігурація, наприклад, використовується у [5]. Машина приводилась в рух за допомогою двох СДПМ, підресорених до несучої рами.

Конфігурації д) та є) – так звані мотор-колеса з непрямым і прямим приводами (в прямому приводі відсутній редуктор). Мотор-колеса з редуктором використовується в комбінації з високошвидкісним СДПМ, а конфігурація з прямим приводом створюється на базі низькошвидкісного синхронного двигуна з постійними магнітами оберненого типу. Використання двигуна з внутрішнім ротором дозволяє двигуну працювати на значно вищих швидкостях. Оскільки для більш високих швидкостей необхідний низький крутний момент, двигун має менший розмір, меншу вагу та меншу вартість. Швидкість обертання двигуна з зовнішнім ротором дорівнює швидкості обертання коліс, що призводить до збільшення розміру і ваги двигуна. Однак відсутність редуктора знижує складність системи, підвищує загальну надійність і підвищує ККД за рахунок відсутності передаточних втрат [6]. Як приклад, остання конфігурація використовується у високоефективному електромобілі IZA [7].

Вдосконалені технології управління рухом, реалізовані в електричних транспортних засобах (ЕП) з декількома трансмісіями, можуть сприяти підвищенню екологічності, ефективності руху та активної безпеки, як це попередньо продемонстрували експериментальні результати в різних наукових та

промислових дослідженнях [8]. Індивідуальне управління крутним моментом колеса може бути реалізовано за допомогою наступних електричних архітектур трансмісії: 1) мотор-колеса з прямим приводом; 2) мотор-колеса з механічними коробками передач; 3) бортові двигуни з трансмісіями; 4) єдиний бортовий двигун для кожної осі з механічною передачею, включаючи диференціал. Останні дослідження показують, що варіанти 1) та 2) особливо придатні для автомобілів малих і середніх розмірів. Висока динаміка мотор-коліс дозволяє створювати безперервні регулятори ковзання коліс для антиблокувального гальмування та контролю тяги, з точним показником відхилення ковзання, на відміну від контролерів на основі фрикційного гальма і приводу двигуна внутрішнього згоряння, зазвичай встановлених у пасажирських автомобілях. Варіанти 3) і 4), тобто схеми з бортовою установкою електродвигунів, представляють особливий інтерес для великих пасажирських вагонів, легких комерційних автомобілів і автобусів через більш гнучкі можливості паркування. Тим не менш, вони пропонуються також для легких ЕМ.

Двигуни змінного струму мають певні переваги над двигунами постійного струму, такі як: вищий ККД, більш висока питома потужність, ефективний режим рекуперативного гальмування, надійність і менші витрати на обслуговування [9]. Двигуни постійного струму на сьогоднішній день практично не використовуються, поступаючись місцем вентильним реактивним двигунам, які все одно застосовуються рідше, ніж основні три види двигунів: асинхронний, синхронний з постійними магнітами та безколекторний двигун постійного струму. Розглянемо окремо кожний вид двигунів, визначивши їх переваги та недоліки.

**Двигуни постійного струму** використовувались в перших електромобілях (ще на початку ХХ століття), забезпечуючи простоту керування, розв'язку електричних і механічних процесів. Однак значна кількість недоліків, таких як наявність щітково-колекторного вузла, висока вага, низький ККД та необхідність

постійного обслуговування призвели до недоцільності їх використання після розвитку векторного керування двигунами змінного струму.

Звичайно, двигуни постійного струму все ще можуть використовуватись у малопотужних системах, що дозволяє зробити електропривод більш простим та дешевим. Так, наприклад, французька компанія Peugeot представила електромобіль під назвою "Dynavolt", в якому ДВС використовується як тяговий.

**Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором** – доволі розповсюджений варіант через їх надійність, менші витрати на обслуговування та можливість працювати у більш агресивних середовищах. Векторно-керовані АД дозволяють розв'язати електричні та механічні процеси, розширити діапазон швидкостей за рахунок можливості послаблення магнітного потоку. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором при роботі від статичного перетворювача частоти-напруги поєднує переваги найбільш простої тягової електричної машини змінного струму з гарними пусковими і регульовальними властивостями двигуна постійного струму. Для цього він повинен бути спроектований з дотриманням всіх вимог, що пред'являються тяговим електричним машинам: захист від впливу навколишнього середовища, використання сучасних підшипників, що не вимагає заміни або додавання мастила протягом 30000-50000 годин. Асинхронний двигун дозволяє практично повністю виключити технічне обслуговування протягом призначеного ресурсу автомобіля. АД мають більшу масу, порівняно з СДПМ, але це не служить перешкодою при проектуванні електропривода електромобіля, так як маса двигуна зазвичай не перевищує 2-5% повної маси електромобіля і незрівнянно менше маси акумуляторної батареї; а також нижчу енергоефективність, але ККД нових серій тягових двигунів підвищують за рахунок збільшення витрати міді і сталі в тому ж обсязі, зменшення повітряного зазору в системі ротор-статор, підвищення коефіцієнта заповнення пазів якоря міддю. Подальше вдосконалення тягового електроприводу дозволить значно

поліпшити техніко-експлуатаційні характеристики електромобілів і забезпечить їх широке поширення.

**Синхронні двигуни з постійними магнітами** є найсерйознішим конкурентом асинхронних двигунів у системах тяги. Насправді, багато виробників автомобілів (таких як Toyota, Honda і Nissan) вже використовували ці двигуни в своїх автомобілях. Ці мотори мають кілька переваг: більш висока питома потужність, більш висока ефективність і більш ефективна віддача тепла в навколишнє середовище. Однак ці двигуни мають власне вузьку область постійної потужності. Щоб розширити діапазон швидкостей і збільшити ефективність, кут провідності перетворювача потужності можна регулювати при швидкостях, що перевищують базову швидкість. Діапазон швидкості може бути розширений до трьох - чотирьох разів більше базової швидкості. Недоліком цих двигунів є те, що вони можуть бути розмагнічується внаслідок нагрівання або реакції якоря.

**Вентильним реактивним двигунам** приділяється все більше уваги з кожним днем. Серед переваг цих двигунів: проста і жорстка конструкція, відмовостійкість, простота керування і гарна характеристика крутного моменту. Електродвигун здатний працювати в широкому діапазоні постійної потужності. Проте даному двигуну також властиві деякі недоліки, такі як високий рівень шуму, висока пульсація крутного моменту [10]. Як переваги, так і недоліки цього двигуна важливі при його виборі та використанні в системі електромобіля.

**Безколекторні двигуни** за останні роки також застосовуються все частіше у верстатах з ЧПК, сервосистемах, побутовій техніці та електромобілях. Концептуально ці двигуни є оберненими машинами постійного струму з постійними магнітами та живленням прямокутними хвилями, на відміну від двигунів, які живляться синусоїдальними хвилями. Основні причини зростання популярності використання безколекторних двигунів полягають у наступному [11]: висока ефективність та питома потужність, високий пусковий момент,

широкий діапазон регулювання швидкості, лінійні характеристики крутного моменту і швидкості, низький рівень необхідності обслуговування та можливість роботи в будь-яких умовах. Поєднуючи у собі механічну структуру асинхронних двигунів (відсутність колектору та щіток) та електричну характеристику двигунів постійного струму, ці двигуни мають переваги над обома згаданими видами двигунів.

## **1.2 Системи індивідуального електроприводу коліс електромобілів**

На сьогоднішній день були зроблені численні спроби зменшити масу електричного транспортного засобу (EV), включаючи оптимізацію структури і форми, використання алюмінієвих деталей тощо [12]. Завдяки розвитку технологій розробки та керування двигунів, у сучасних конфігураціях починають застосовуватись моторизовані колеса, що означає, що двигуни вбудовуються в колеса електромобілів [13]. Звичайна конфігурація електроавтомобілів має лише один тяговий двигун, який керує двома колесами за допомогою диференціалу. Проте важка і громіздка система механічного диференціалу може бути замінена електронним диференціалом, що стає все більш популярним рішенням для обчислення заданої швидкості у електричних транспортних засобах з індивідуальним приводом коліс.

З таким підходом зменшується не тільки загальна маса, але і значно покращується керованість автомобіля завдяки швидкому часу відгуку електричних двигунів. Електронний диференціал може контролювати швидкість кожного колеса, щоб отримати необхідні параметри траєкторії руху.

Кроком вперед у розвитку систем електромобілів є використання технології на базі електродвигунів, безпосередньо підключених до коліс (також відомих як мотор-колеса). Для отримання швидкої реакції від двигунів і забезпечення

незалежного керування крутним моментом кожного колеса, двигуни встановлюються безпосередньо на колеса (рис.1.2).



Рисунок 1.2 – Будова мотор-колеса

Мотор-колесо являє собою комплексну систему, що об'єднує в собі колесо, що складається з металевого диска і гумової покриття, з вбудованим в нього тяговим електродвигуном, силову передачу і гальмівну систему. Таким чином, в системі мотор-колесо реалізований індивідуальний привід.

Найбільш підходящий клас електродвигунів для включення в колісні диски – безколекторні двигуни постійного струму, завдяки їх компактності, малій вазі, великому крутному моменту на одиницю маси, а також максимальної швидкості. У таких системах без необхідності будь-яких трансмісійних валів, тяга може бути переміщена з передньої на задню вісь майже довільно, у результаті чого досить легко досягається повний привід. Більш того, так як двигуни керуються окремо, то забезпечуються високі динамічні показники без наявності складних коробок передач і механічних диференціалів. Платою за це є підвищена складність алгоритмів проектування, враховуючи також негативний вплив збільшеної маси на динаміку транспортного засобу.

Інша конфігурація використовує кілька двигунів (наприклад, асинхронних), встановлених у корпусі автомобіля поряд з приводними колесами (найчастіше

дводвигунні варіанти). Отже, на відміну від мотор-коліс, де безколекторні машини постійного струму вбудовувались безпосередньо у колеса, дані системи вміщують двигуни у кузові транспортного засобу. Схематично це зображено на рис. 1.3.

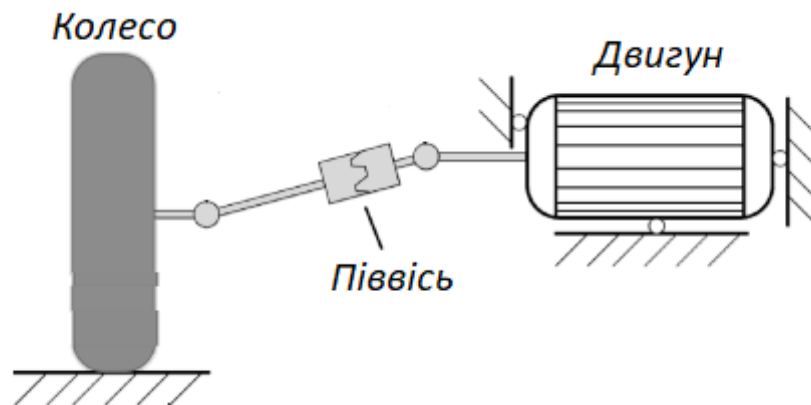


Рисунок 1.3 – Індивідуальний привід з розташуванням двигуна всередині автомобіля

Системи такого типу використовують два асинхронні двигуни, два інвертори та технологію електронного диференціалу для необхідного розподілення крутного моменту між приводними колесами (рис.1.4). Однак алгоритм електронного диференціалу ускладнений через нелінійність динаміки транспортного засобу. З одного боку, система повинна гарантувати, що приводні колеса обертаються з однаковою швидкістю, коли машина рухається по прямій лінії, з іншого – повинна регулювати крутний момент для запобігання проковзування коліс при кутах повороту, відмінних від нуля, або коли коефіцієнти зчеплення коліс різні. Тому складність управління стала однією з основних перешкод розвитку систем з двома приводними колесами [14].

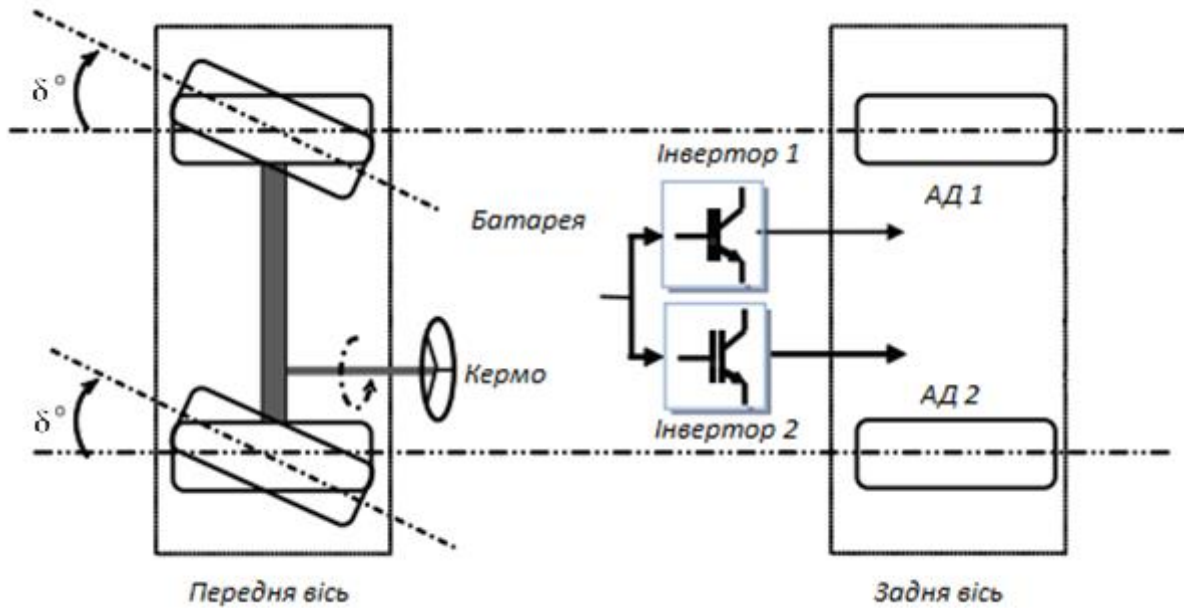


Рисунок 1.4 – Електромобіль з двома незалежними приводами коліс

Основне призначення електронного диференціалу (ЕД) полягає в тому, щоб замінити механічний диференціал в системах з декількома приводами, забезпечуючи необхідний крутний момент і швидкість для кожного робочого колеса. Лінійна швидкість кожного колеса задається

$$\begin{aligned} V_1 &= \omega_v (R - d / 2), \\ V_2 &= \omega_v (R + d / 2). \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $R = L / \tan \delta$ , а  $\alpha$  – кут повороту (коли  $\delta = 0$ , автомобіль рухається по прямій),  $d$  – ширина машини. Кутові швидкості при повороті дорівнюють:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{L - (d / 2) \tan \delta}{L} \omega_v, \\ \omega_2 &= \frac{L + (d / 2) \tan \delta}{L} \omega_v. \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $L$  – довжина автомобіля. Кутова швидкість центру мас при повороті дорівнює:

$$\omega_v = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (1.3)$$

Схема електронного диференціалу зображена на рис.1.5. Слід зазначити, що  $\omega_{1ref}$  та  $\omega_{2ref}$  є вихідними швидкостями, що прикладаються до коліс.

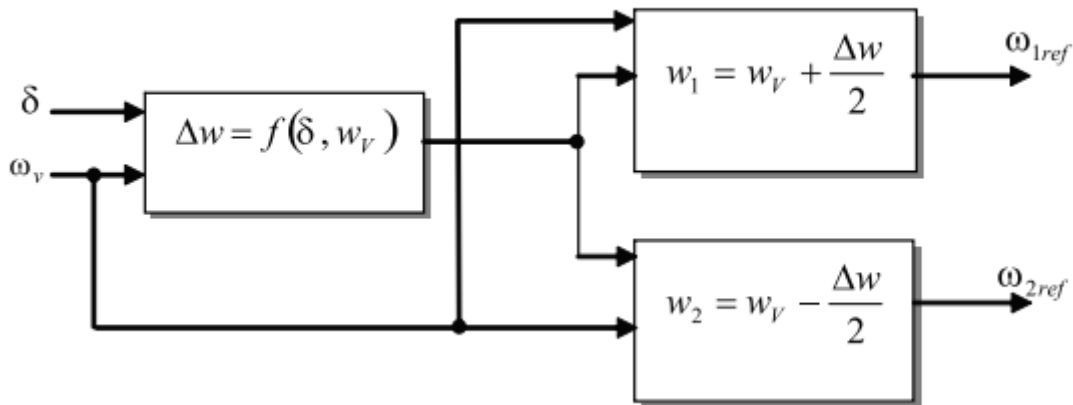


Рисунок 1.5 – Схема електронного диференціалу

### 1.3 Математичне моделювання електромобіля як об'єкта системи керування

На сьогодні при розробці будь-яких складних технічних пристроїв та систем необхідно створювати їх математичну модель, адже вона необхідна для перевірки та дослідження параметрів. Електромобіль не є винятком. Переміщення транспортного засобу розглядається як плоско-паралельний рух твердого тіла. Це припущення зроблено для спрощення системи рівнянь, що описують рух. Рух транспортного засобу можна описати за допомогою наступних системних диференціальних рівнянь [15]:

$$\begin{cases} \vec{a} = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^4 \vec{P}_{fi} + \sum_{i=1}^4 \vec{R}_i + \vec{P}_w \right), \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^4 M_{nki} + \sum_{i=1}^4 M(\vec{R}_i) + \sum_{i=1}^4 M(\vec{P}_{fi}). \end{cases} \quad (1.4)$$

де  $\vec{a}$  - прискорення центру мас,  $m$  - маса автомобіля,  $\vec{P}_{fi}$  - сила опору колеса,  $\vec{R}_i$  - сила тертя між колесом та землею,  $\vec{P}_w$  - сила аеродинамічного опору,  $J_z$  - момент інерції автомобіля,  $M_{nki}$  - момент опору обертанню.

Схематично це зображено на рис.1.6

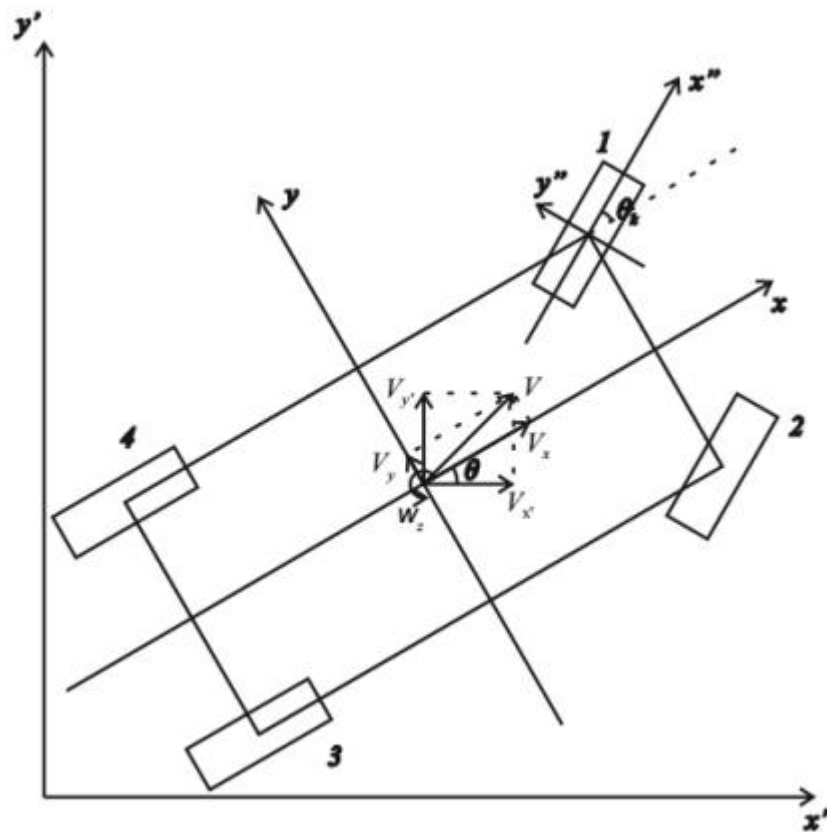


Рисунок 1.6 – Схема моделі транспортного засобу

де  $x, y, z$  - рухома система координат,  $x', y', z'$  - стаціонарна система координат,  $\theta$  - кут обертання автомобіля,  $\vec{V}$  - вектор швидкості центру мас автомобіля,  $\omega_z$  - кутова швидкість повороту автомобіля.

Прискорення в плоскопаралельному переміщенні дорівнює

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} + \omega_z \vec{V} \quad (1.5)$$

де  $dV/dt$  – похідна відносної швидкості центру мас транспортного засобу.

Для рисунку 1 проєкції швидкості на координатні осі  $x', y', z'$ :

$$\begin{cases} V_{x'} = \frac{dy'}{dt} = V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \\ V_{y'} = \frac{dx'}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \end{cases} \quad (1.6)$$

Беручи до уваги, що

$$\omega_z = d\theta / dt \quad (1.7)$$

та об'єднавши попередні рівняння, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt} - \omega_z V_y = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^4 P_{fxi} + \sum_{i=1}^4 R_{xi} + P_{wx} \right), \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x = \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^4 P_{fyi} + \sum_{i=1}^4 R_{yi} + P_{wy} \right), \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^4 M_{nki} + \sum_{i=1}^4 M(\vec{R}_i) + \sum_{i=1}^4 M(\vec{P}_{fi}), \\ V_{x'} = \frac{dy'}{dt} = V_x \cos \theta - V_y \sin \theta, \\ V_{y'} = \frac{dx'}{dt} = V_x \sin \theta + V_y \cos \theta, \\ \omega_z = d\theta / dt. \end{cases} \quad (1.8)$$

де  $a_x, a_y$  - проєкції прискорення центру мас автомобіля в системі координат  $x, y, z$ ,  $P_{fxi}, P_{fyi}, R_{xi}, R_{yi}, P_{wx}, P_{wy}$  - проєкції сил, діючих на транспортний засіб в системі координат  $x, y, z$ .

Індивідуальний привід кожного колеса дозволяє повністю реалізувати переваги електроприводу. Для живлення електродвигунів можуть бути використані перетворювачі, як описано в [16]. Ця трансмісія дозволяє індивідуально керувати моментом кожного колеса. Це дозволяє сформувати оптимальний режим роботи, мінімізувати проковзування коліс і досягти швидкого відгуку системи.

Розроблена математична модель дає можливість синтезувати систему прямого контролю крутного моменту кожного колеса, системи активної безпеки та круїз-контролю і протестувати їх поведінку.

#### **1.4 Формулювання вимог до електроприводу і системи автоматичного керування**

Вибір схеми і елементів системи тягового електроприводу виконується таким чином, щоб забезпечити необхідні швидкісні властивості з урахуванням властивостей елементів: показники потужності, рід струму, характеристики електроустановок, особливості поповнення запасу енергії, специфіки фізичних процесів перетворення і передачі енергії в силовому ланцюзі, регулювальних властивостей електродвигунів тощо. Також необхідно врахувати швидкісний режим руху: розгін, рух з постійною швидкістю, гальмування, а в міських умовах - часті зупинки. З метою підвищення ККД системи ТЕП необхідно передбачити можливість рекуперації накопиченої кінетичної енергії при гальмуванні, і при цьому прагнути рекуперувати її повністю. Джерело енергії необхідно вибирати виходячи з критерію питомої енергії, що забезпечить мінімальну масу силової установки і максимальний ККД при русі з усталеною швидкістю. Використання рекуперованої енергії забезпечить необхідні динамічні і економічні показники [17].

Загалом, для тягових електроприводів електромобілів на даний час можна сформулювати наступні вимоги, які можна поділити на 4 групи: функціональні, конструктивні, експлуатаційні та економічні [18].

**Функціональні** вимоги потребують плавного регулювання швидкості. Для забезпечення енергетично вигідного руху в межах міста стабільність автоматичного підтримування швидкості має бути не менше 10%, система повинна передбачати плавне керування моментом при зрушенні з місця та плавне керування гальмівним моментом при швидкості більше 15 км/год. Максимальні момент та потужність мають обмежуватись автоматично на заданому рівні. Також електропривод має обмежувати зарядний струм батареї, максимально використовувати можливості рекуперації енергії при гальмуванні або русі під уклон, повинен мати можливість руху в режимі вибігу та здійснювати реверс електродвигуна тільки після зупинки автомобіля.

**Конструктивні** вимоги потребують, щоб маса тягового електроприводу була не більше 5–6 % від загальної маси електромобіля, вузли та агрегати електроприводу повинні виконуватися у вигляді конструктивно закінчених модулів. Агрегати електроприводу повинні мати захист від потрапляння сторонніх предметів та води, також необхідно передбачити захист від помилкових дій водія.

**Експлуатаційні** вимоги: працездатність електроприводу повинна забезпечуватися при температурі навколишнього середовища від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , наявність бортової системи діагностування роботи електроприводу.

**Економічні вимоги** наступні: вартість електроприводу має становити не більше 15–20 % від вартості електромобіля, а витрати на технічне обслуговування – не більше 30–40 % від загальної трудомісткості технічного обслуговування [19].

## Висновки до розділу 1

З присутніх на даний час конфігурацій електроприводу найбільш поширеною є система електродвигун-редуктор-диференціал, однак завдяки новим технологіям та розробкам найбільш перспективними є системи індивідуального приводу коліс.

Завдяки заміні звичного механічного диференціалу на електронний зменшується вага всієї системи електроприводу, покращується керованість та загальна енергоефективність, але така конфігурація вимагає більш складної системи керування.

Сучасний електропривод електричного транспортного засобу має задовольняти наступні основні вимоги: плавне регулювання швидкості, стабільність підтримання швидкості не менше 10%, автоматичне обмеження моменту та потужності на заданому рівні, маса тягового електроприводу має становити не більше 5–6 % від загальної маси електромобіля, працездатність при температурі навколишнього середовища від  $-40$  °C до  $+40$  °C, вартість електроприводу має становити не більше 15–20 % від вартості електромобіля.

## 2 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

За основу візьмемо електромобіль, спроектований і досліджений компанією [20]. Для застосування конфігурації з двома приводними двигунами необхідно провести перерахунок потужності. Дані, необхідні для розрахунку тягових двигунів електромобіля, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри транспортного засобу

Маса автомобіля	$m = 1450$ кг
Площа лобової частини	$S = 1.8$ м <sup>2</sup>
Коефіцієнт тертя-ковзання	$f = 0.01$
Коефіцієнт аеродинамічного опору	$C_x = 0.013$
Радіус коліс	$R = 0.28$ м

Максимальна бажана швидкість електромобіля 100 км/год, що дорівнює  $v_{\max} = 27$  м/с. Нехай час розгону до максимальної швидкості дорівнює 15 с, тоді

$$a = \frac{27}{15} = 1.8 \frac{м}{с^2} \quad (2.1)$$

Розрахуємо максимальну кутову швидкість обертання колеса

$$v_{\max} = \omega_w \cdot R_w, \quad (2.2)$$

$$\omega_w = \frac{v_{\max}}{R_w} = \frac{27}{0.28} = 96.4 \frac{рад}{с}, \quad (2.3)$$

$$n_w = 96.4 \cdot \frac{30}{\pi} = 921 \frac{об}{хв} \quad (2.4)$$

де  $\omega_w$  – кутова швидкість коліс.

Як вже було розглянуто раніше, низькошвидкісні системи індивідуального електроприводу за рахунок відсутності редуктора мають менш складну кінематичну схему, підвищені загальну надійність і ККД за рахунок відсутності передаточних втрат, тому для подальшого дослідження обираємо систему такого виду. Для отримання необхідної швидкості обертання обираємо двигуни із синхронною швидкістю 1000 об/хв.

Формула необхідного зусилля для приведення електромобіля в рух, що враховує як статичні, так і динамічні складові, має вигляд:

$$F_{\Sigma} = F_{mk} + F_{ao} + F_{дин}, \quad (2.5)$$

де  $F_{mk}$  – сила опору тертя-кочення,  $F_{ao}$  – сила аеродинамічного опору,  $F_{дин}$  – динамічне зусилля,  $F_{\Sigma}$  є повним тяговим зусиллям, яке вихідний момент електродвигуна має подолати, щоби привести автомобіль у рух.

**Сила опору тертя кочення**, яка виникає через контакт шин з дорогою, обчислюється за формулою:

$$F_k = fmg, \quad (2.6)$$

де  $f$  – коефіцієнт опору кочення,  $m$  – маса електромобіля в кг,  $g$  – прискорення вільного падіння  $9.81 \text{ м/с}^2$ .

Для випадку, який розглядається у цьому проекті,  $f = 0.01$ ,  $m = 1450$  кг. Тому

$$F_{mk} = fmg = 0.01 \cdot 1450 \cdot 9.81 = 151 \text{ Н} \quad (2.7)$$

**Сила аеродинамічного (лобового) опору** – в'язка сила, що діє на автомобіль. Дуже сильно залежить від форми транспортного засобу, швидкості і розраховується за формулою:

$$F_{ao} = 0.5C_x S \rho v^2 \quad (2.8)$$

$$F_{ao} = 0.5C_x S \rho v^2 = 0.05 \cdot 0.013 \cdot 1.8 \cdot 1.29 \cdot 100^2 = 150 \text{ H} \quad (2.9)$$

Динамічне зусилля розрахуємо за формулою:

$$F_{дин} = ma = 1540 \cdot 1.8 = 2772 \text{ H} \quad (2.10)$$

Отже, необхідне зусилля для приведення електромобіля в рух дорівнює:

$$F_{\Sigma} = F_{mk} + F_{ao} + F_{дин} = 151 + 150 + 2772 = 3073 \text{ H} \quad (2.11)$$

Розрахунок еквівалентного зусилля проведемо, задавшись наступною діаграмою циклу руху автомобіля (рис. 2.1).

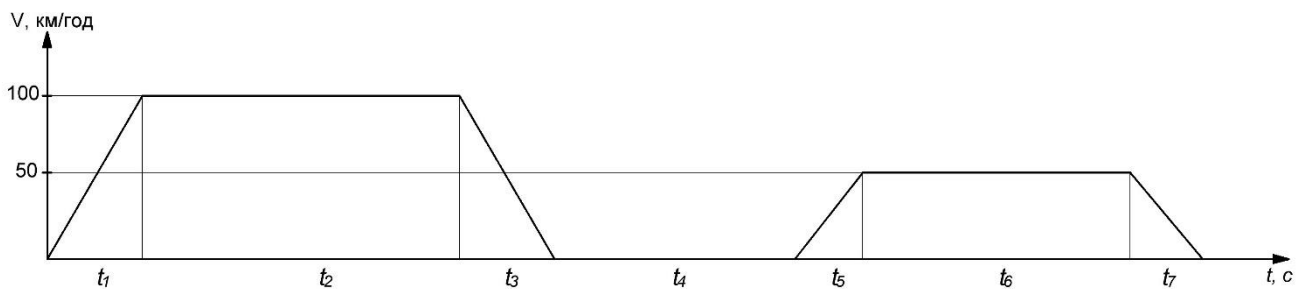


Рисунок 2.1 – Цикл руху електромобіля

Як було зазначено вище, час розгону до максимальної швидкості складає 15 с. Обираємо час руху в усталеному режимі і гальмування  $t_{ум1} = 30 \text{ с}$  та  $t_{21} = 15 \text{ с}$  відповідно. Час паузи становить 40 с. У другій половині робочого циклу автомобіль буде рухатись зі швидкістю, меншою за номінальну, а саме 60 км/год, або 16.6 м/с. Час розгону дорівнює:

$$t_{p2} = \frac{16.6}{1.8} = 9 \text{ c} \quad (2.12)$$

Час руху в усталеному режимі вибираємо рівним  $t_{yсм2} = 20 \text{ c}$ , а час гальмування  $t_{22} = 9 \text{ c}$ .

Еквівалентне зусилля знайдемо за формулою:

$$F_{екв} = \sqrt{\frac{F_1^2 \cdot t_1 + F_2^2 \cdot t_2 + F_3^2 \cdot t_3 + F_4^2 \cdot t_4 + F_5^2 \cdot t_5 + F_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3073^2 \cdot 15 + 300^2 \cdot 30 + 2472^2 \cdot 15 + 3073^2 \cdot 9 + 300^2 \cdot 20 + 2472^2 \cdot 9}{15 + 30 + 15 + 40 + 9 + 20 + 9}} = 1603 \text{ H}$$

Розрахуємо необхідну потужність двигуна. Так як автомобіль не може весь час рухатись з максимальною швидкістю у потоці, крім того, максимальна дозволена швидкість руху транспортних засобів у місті становить 50 км/год, маємо:

$$P_{\Sigma} = F_{екв} \cdot v = 1603 \cdot 13.8 = 23110 \text{ Вт} \quad (2.13)$$

На основі проведених розрахунків з каталогу обираємо 2 двигуни з наступними характеристиками (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Паспортні дані двигуна 4A160S6У3

Номінальна потужність	$P_{2H} = 11000 \text{ Вт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1H} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 3$
Момент інерції	$J_d = 0.14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.86$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.86$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.1$
Номінальне ковзання	$S_{\text{ном}} = 0.027$
Критичне ковзання	$S_k = 0.15$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
<b>Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)</b>	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1 = 0.11$
Активний опір статора	$\bar{R}_1 = 0.073$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2 = 0.15$
Приведений Активний опір ротора	$\bar{R}_2 = 0.03$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_\mu = 3.0$

Проведемо розрахунок на основі методики, яка описана в [21] і вміщує наступні кроки.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_0 = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.14)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{2\pi f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{3} = 104.72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.15)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - s_n) = 104.72(1 - 0.027) = 101.9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.16)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{11 \cdot 10^3}{101.9} = 107.9 \text{ Нм}. \quad (2.17)$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = \lambda M_n = 2.1 \cdot 107.9 = 226.71 \text{ Нм}. \quad (2.18)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (2.19)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{\sqrt{3}U_n\eta\cos(\varphi)} = \frac{11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.86} = 22.6 \text{ А}. \quad (2.20)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_m = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В}, \quad (2.21)$$

$$I_m = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 22.6 = 31.9 \text{ А}. \quad (2.22)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при  $R_1=0$  дорівнює:

$$\psi_1 = \frac{U_m}{\omega_0} = \frac{311}{314.2} = 0.98 \text{ Вб.} \quad (2.23)$$

Проведемо перерахунок параметрів з Г-подібної схеми (рис. 2.2) в Т-подібну (рис. 2.3).

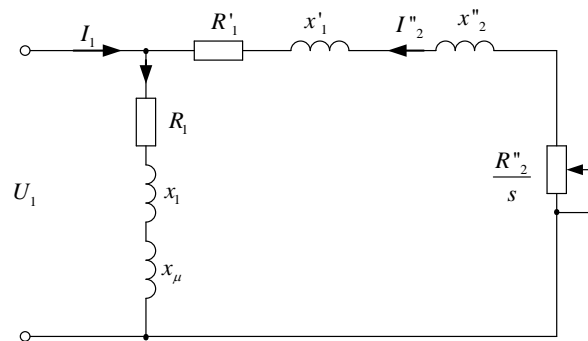


Рисунок 2.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

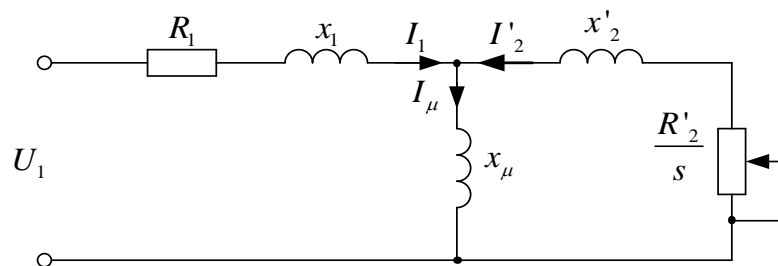


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення дорівнює

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{3.0 + \sqrt{3.0^2 + 4 \cdot 0.11 \cdot 3.0}}{2 \cdot 3.0} = 1.035. \quad (2.24)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.11}{1.035} = 0.106; \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.073}{1.035} = 0.07, \quad (2.25)$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.15}{1.035^2} = 0.14; \quad \bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.03}{1.035^2} = 0.028, \quad (2.26)$$

де  $\bar{x}_1, \bar{R}_1$  – індуктивний та активний опори статора,  $\bar{x}'_2, \bar{R}'_2$  – приведені індуктивний та активний опори ротора.

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.106 \cdot \frac{220}{31.9} = 1.034 \text{ Ом}, \quad (2.27)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.07 \cdot \frac{220}{31.9} = 0.686 \text{ Ом}, \quad (2.28)$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.14 \cdot \frac{220}{31.9} = 1.362 \text{ Ом}, \quad (2.29)$$

$$R'_2 = \bar{R}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.028 \cdot \frac{220}{31.9} = 0.272 \text{ Ом}, \quad (2.30)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 3.0 \cdot \frac{220}{31.9} = 29.2 \text{ Ом}, \quad (2.31)$$

де  $x_1, R_1$  – індуктивний та активний опори статора,  $x'_2, R'_2$  – приведені індуктивний та активний опори ротора,  $x_\mu$  – індуктивний опір намагнічуючого контуру.

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{1.034}{314} = 0.00329 \text{ Гн}, \quad (2.32)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{1.362}{314} = 0.00434 \text{ Гн.} \quad (2.33)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{29.2}{314} = 0.093 \text{ Гн.} \quad (2.34)$$

Індуктивність статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.053 + 0.00271 = 0.096 \text{ Гн,} \quad (2.35)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.053 + 0.00337 = 0.097 \text{ Гн.} \quad (2.36)$$

## Висновки до розділу 2

Для конфігурації електромобіля з індивідуальним приводом задніх коліс було розраховано тягове зусилля, подолання якого необхідне для зрушення машини з місця  $F_\Sigma = 3073 \text{ Н}$ .

На основі вихідних даних, розрахованого зусилля та обраного циклу руху транспортного засобу було розраховано і вибрано два тягових асинхронних двигуни потужністю 11 кВт кожен.

Розраховані параметри тягових двигунів дозволяють перейти до розробки системи керування та моделювання.

### 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Рух автомобіля в площині дороги можна розглядати, як плоско-паралельний, тобто такий, в якому всі точки тіла переміщуються в площинах, паралельних якійсь площині, яку називають основною [22]. Прийmemo, що автомобіль знаходиться в тривимірній системі координат (рис.3.1) та є прямокутним твердим тілом. Оскільки сили тяги електродвигунів діють вздовж траєкторії руху машини, представляє інтерес розгляд рівнянь динаміки тільки для проєкцій горизонтальних складових зовнішніх сил на вісь  $Y$ .

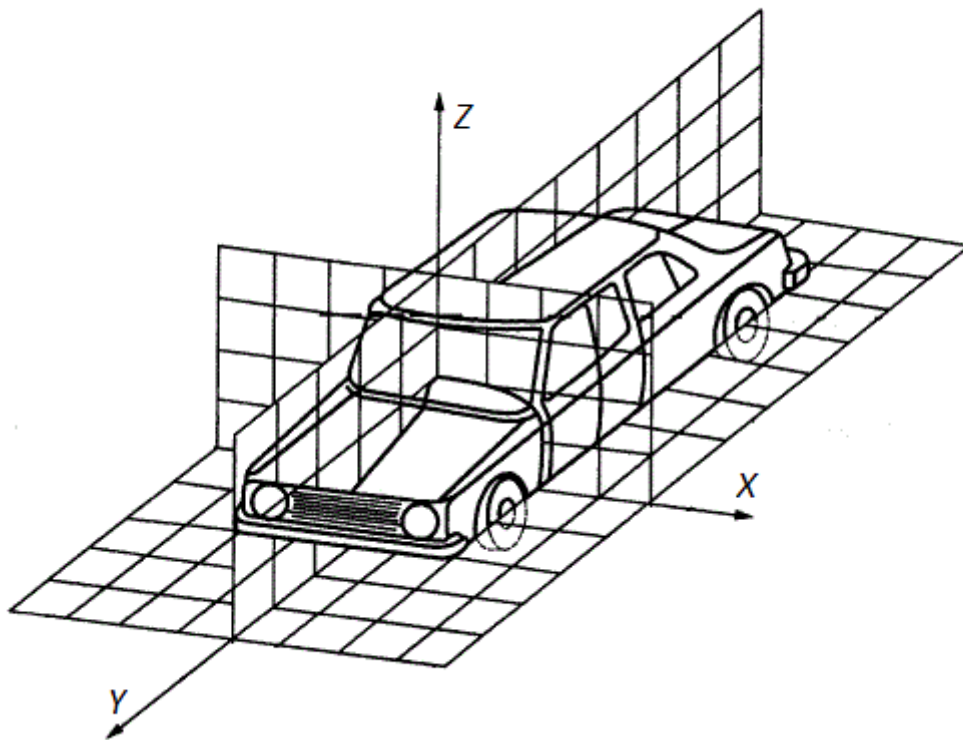


Рисунок 3.1 – Представлення електромобіля в тривимірній системі координат

Плоско-паралельний рух можна розкласти на поступальний та обертальний, тому справедливим буде твердження, що швидкість будь-якої точки твердого тіла,

що здійснює плоско-паралельний рух, дорівнює геометричній (векторній) сумі швидкості полюса і лінійної швидкості цієї точки в її обертанні навколо полюса [23]. Полюс – довільна точка, яка зв'язана з рухомою точкою і приймається за центр повороту, тому в нашому випадку полюс співпадає з центром мас автомобіля. Обертальна частина руху не залежить від обрання полюса, а поступальна залежить.

Кожне з привідних коліс прикладає до транспортного засобу силу тяги, яка призводить до приросту координати по осі  $Y$  (переміщення) за рахунок абсолютного переміщення та обертання навколо центру мас (рис.3.2).

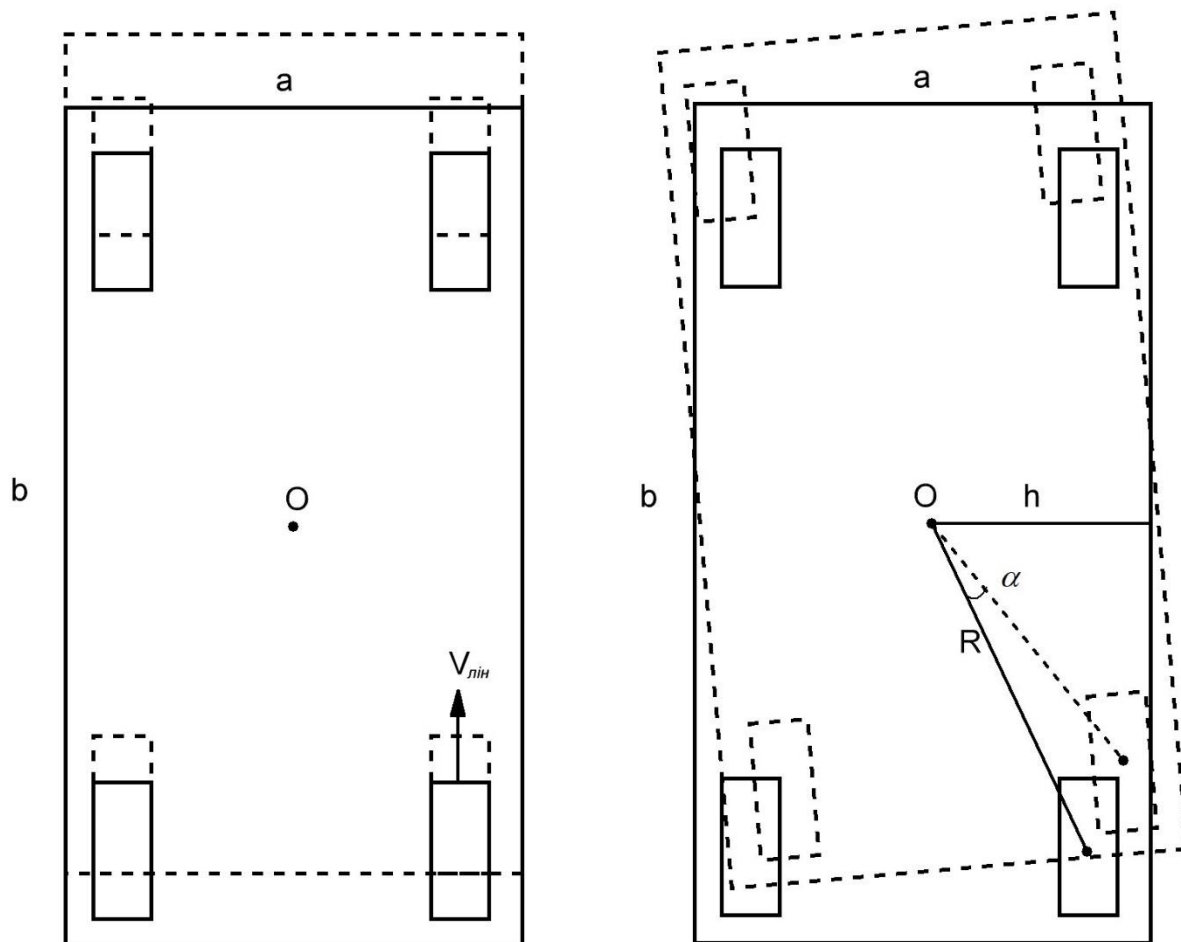


Рисунок 3.2 – Вплив тягового двигуна на переміщення автомобіля

Як бачимо, двигун змушує рухатись автомобіль разом з центром мас вперед та одночасно обертатись навколо нього. Нехай  $\alpha$  – кут повороту,  $a$  і  $b$  – відповідно ширина та довжина автомобіля. Тоді

$$h = \frac{a}{2}; R = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \quad (3.1)$$

Рівняння динаміки автомобіля для плоско-паралельного руху можуть бути записані у вигляді:

$$m \frac{d^2 Y_c}{dt^2} = \sum N_{iY}^l; \quad (3.2)$$

$$J_Z \frac{d\omega_Z}{dt} = M_Z^l = \sum N_{iY}^l h_i, \quad (3.3)$$

де  $N_{iY}^l$  – сили тяги електродвигунів в напрямку  $Y$  і проекції збурюючих сил, прикладених в «і»-й точці платформи на вісь  $Y$ ;

$h_i$  – плечі сил  $N_{iY}^l$  відносно центра мас атомобіля;

$J_Z$  – момент інерції автомобіля відносно осі  $Z$ .

Для переходу від приросту кута  $\Delta\alpha$  до приростів координат «к»-х точок машини  $\Delta Y_k^\alpha$ , скористаємося співвідношенням.

$$\Delta Y_k^\alpha = l_{kZ} \Delta\alpha \cos\alpha_{k0}, \quad (3.4)$$

де  $l_{kZ}$  – відстань «к»-ї точки до осі  $Z$ ;

$\alpha_{k0}$  – кут між віссю  $X$  і прямою  $l_{kZ}$ .

З врахуванням (3.4), рівняння (3.3) може бути записане для приросту координати  $\Delta Y_k^\alpha$  у вигляді:

$$J_Z \frac{d^2 \Delta Y_k^\alpha}{dt^2} = \Delta N_{iY}^l h_i l_{kZ} \cos\alpha_{k0}. \quad (3.5)$$

Повний приріст координати «к»-ї точки в операторній формі для платформи довільного вигляду отримуємо, розв'язуючи сукупно (3.2) і (3.5).

$$\Delta Y_{\kappa} = \Delta Y_c + \Delta Y_{\kappa}^{\alpha} = \frac{1}{p^2} \Delta N_{iY} \left( \frac{1}{m} + \frac{h_i l_{\kappa Z} \cos \alpha_{\kappa 0}}{J_Z} \right). \quad (3.6)$$

При рівномірно розподіленому навантаженні рівняння (3.5) може бути перетворене наступним чином:

$$\Delta Y_{\kappa} = \frac{1}{mp^2} \left( 1 \pm \frac{3h_i l_{\kappa Z} \cos \alpha_{\kappa 0}}{l^2} \right), \quad (3.7)$$

де  $J_Z = \frac{m(a^2+b^2)}{3} = \frac{ml^2}{3}$  – момент інерції прямокутного тіла відносно осі Z, l – половина діагоналі платформи.

Схематично це зображено на рис. 3.3. Бачимо, що сума тягових зусиль обох двигунів змушує рухатись автомобіль у заданому напрямку (абсолютне переміщення), і разом з цим кожен двигун створює обертове зусилля, яке в свою чергу створює додатній приріст координати переміщення відповідного привідного колеса і від'ємний приріст для іншого, що безпосередньо і є перехресними зв'язками.

Структурна схема механічної частини дводвигунного незалежного електроприводу з урахуванням перехресних зв'язків представлена на рис. 3.3.

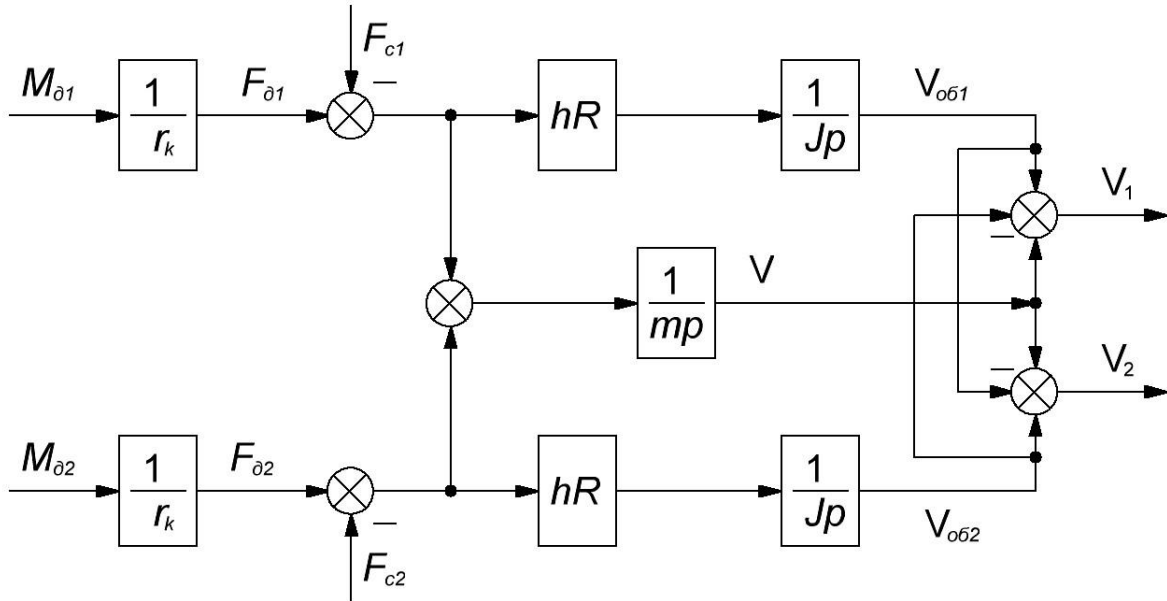


Рисунок 3.3 – Структурна схема перехресних зв'язків електроприводу

Визначимо коефіцієнти даних перехресних зв'язків. Було прийнято, що автомобіль є прямокутним твердим тілом. Тоді його момент інерції навколо осі, що проходить через центр мас, дорівнює:

$$J = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \quad (3.8)$$

Об'єднавши формули (3.1) та (3.8), маємо;

$$\frac{h \cdot R}{J} = \frac{a\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot 2 \cdot m(a^2 + b^2)} = \frac{3a\sqrt{a^2 + b^2}}{m(\sqrt{a^2 + b^2})^2} = \frac{3a}{m\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.9)$$

Знаючи масу, довжину і ширину автомобіля, отримаємо наступні коефіцієнти перехресних зв'язків:

$$k = \frac{3a}{m\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{1}{m\sqrt{\frac{1}{9} + \frac{b^2}{9a^2}}} = \frac{1}{m\sqrt{\frac{1}{9} + \frac{4.2^2}{9 \cdot 1.8^2}}} = \frac{1}{0.74mp} \quad (3.10)$$

Спрощена структурна схема, яку отримано після перенесення зв'язків на вхід і обчислення коефіцієнтів перехресних зв'язків двох тягових двигунів, зображена на рис.3.4.

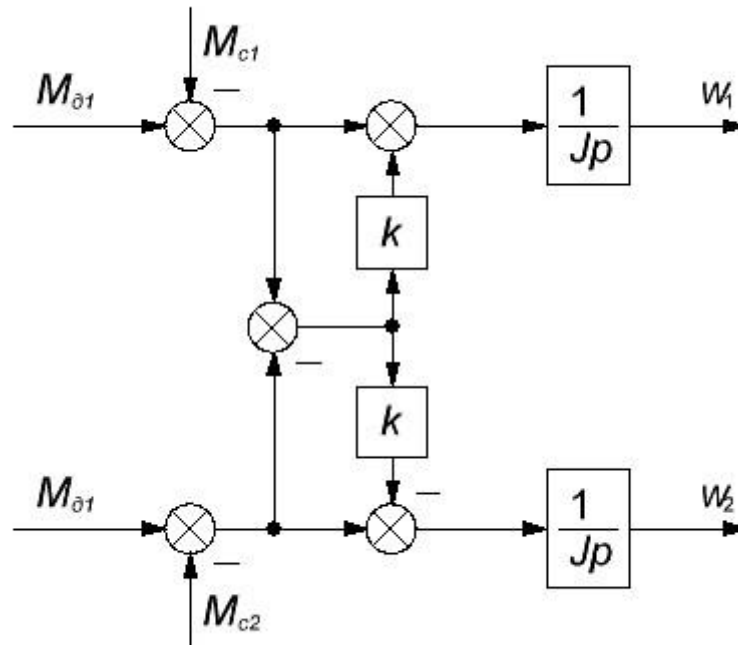


Рисунок 3.4 – Приведена структурна схема

### Висновки до розділу 3

В даному розділі на основі аналізу законів руху транспортного засобу як вільного твердого тіла отримано математичну модель взаємозв'язаної механічної системи для дводвигунного індивідуального електроприводу транспортного засобу, обчислено коефіцієнти перехресних зв'язків та створено структурну схему, що дає можливість безпосередньо перейти до моделювання статичних та динамічних режимів.

## **4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Останніми роками однією з основних задач керування електромобілем є підтримання заданої швидкості (так звані системи круїз-контролю). Система керування електродвигуна постійно підлаштовує момент, прикладений до тягових двигунів, тим самим підтримуючи задану швидкість. Використання таких систем дозволяє раціональніше використовувати заряд батареї, що покращує показники енергоефективності електроприводу [24].

Вплив перехресних зв'язків на характер руху проведемо для системи регулювання швидкості дводвигунного тягового електроприводу на прикладі трьох різних систем керування локальними приводами: розімкненого частотного керування, замкненого частотного керування з контуром регулювання швидкості і непрямого векторного керування швидкістю.

### **4.1 Розімкнений частотний алгоритм**

Найпростішим способом керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором є частотне керування, створене Костенко М.П. (крім того, він розглядався як основний до появи векторних методів). Незважаючи на певні недоліки, такі як відсутність можливості незалежного регулювання координат електроприводу з заданими динамічними та статичними характеристиками, присутність некерованих складових у процесах регулювання кутової швидкості і моменту, має декілька принципових переваг: простота реалізації та запуску в роботу, можливість використання для налаштування номінальних параметрів АД або таких, що легко визначаються, відсутність необхідності вимірювання кутової швидкості та струмів статора. Класичне

частотне керування ґрунтується на отриманих з усталених режимів роботи АД залежностях.

Якщо знехтувати падінням напруги в колі статора, то критичний момент двигуна стає залежним у квадраті від напруги та частоти статора [25].

$$M_k = K \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (4.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

З цього рівняння отримуємо основний закон керування швидкістю асинхронного двигуна.

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = const. \quad (4.2)$$

Згідно до нього частота змінюється пропорційно зміні напруги. Це забезпечує незмінне значення критичного моменту та незмінний номінальний магнітний потік при широкому діапазоні керування швидкістю практично від нуля і до максимальної. Найчастіше в якості максимальної виступає номінальна швидкість, якій відповідає номінальна напруга статора. Підвищення напруги вище номінальної обмежується електричною стійкістю ізоляції обмотки.

Фізичні напруги, які прикладаються до обмоток АД, дорівнюють [26]:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin \theta_0(t) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$\dot{\theta}_0 = \omega^* p_n$$

Відмітимо, що для практичної реалізації алгоритму частотного керування необхідно знати параметр  $\alpha_1 = R_1 / L_1$ , який легко визначається на основі стандартних тестів. Потреби у вимірюванні струмів статора та кутової швидкості для реалізації алгоритму немає.

Для встановлення зв'язку алгоритму частотного керування з наведеними в технічній літературі, запишемо вирази для модуля напруги статора:

$$U_{1m} = (u_{1d}^2 + u_{1q}^2)^{\frac{1}{2}} = \psi^* \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2} \quad (4.4)$$

Якщо сформулювати  $\psi^* = \psi_0^* + \psi_1^*(\omega^*)$ , то можливе отримання різних регульованих характеристик  $U / f$ . Схематично алгоритм частотного керування зображено на рис.4.1.

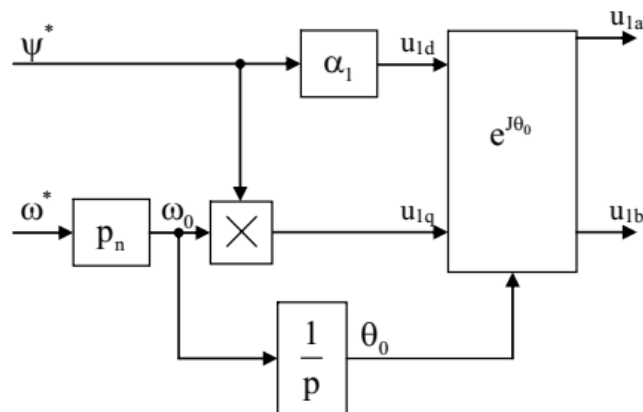


Рисунок 4.1 – Структурна схема алгоритму частотного керування

## 4.2 Частотний алгоритм замкненого керування з регулятором швидкості

За умови ненасиченості магнітного кола двигуна, симетричності фаз тощо найчастіше використовують еквівалентну двофазну модель двигуна у векторній формі. Але найбільш спрощену модель можна отримати при лінеаризації робочої

ділянки механічної характеристики [27]. При цьому передатна функція регульованого двигуна може бути записана у вигляді аперіодичної ланки:

$$W(p) = \frac{M_D}{\omega_0 - \omega} = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1}, \quad (4.5)$$

де  $\beta$  - модуль жорсткості,  $T_E$  - електромагнітна стала часу двигуна.

В даному випадку вихідною координатою є момент на валу двигуна, тобто двигун розглядається в якості джерела моменту. У цьому випадку момент інерції самого двигуна доцільно віднести до передавального пристрою ЕП. Це дозволяє забезпечити зручність в узгодженні математичної моделі двигуна і технологічного об'єкта, особливо для багатомасового ЕМС.

Якщо доповнити передаточну функцію двигуна ланкою, яка пов'язує керуючий вплив, в нашому випадку, частоту, з різницею швидкостей, а також передатну функцію механічної частини у вигляді одномасової системи, то отримаємо структурну схему асинхронного двигуна. При доповненні цієї схеми передатною функцією перетворювача частоти, яка може бути представлена у вигляді:

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_{\mu} \cdot p + 1}, \quad (4.6)$$

отримаємо наступну структурну схему об'єкта регулювання контуру швидкості (див. рис. 4.2)

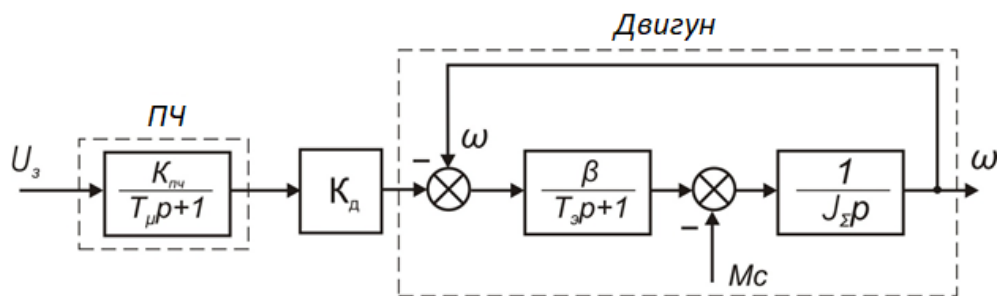


Рисунок 4.2 – Структурна схема об'єкта регулювання контуру швидкості

Розрахуємо параметри передатних функцій даної структурної схеми.

Передатна функція ПЧ :

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{5}{0,01 \cdot p + 1}, \quad (4.7)$$

де  $K_{ПЧ} = \frac{f_H}{U_3} = \frac{50}{10} = 5$  - коефіцієнт підсилення ПЧ;

$U_3$  - напруга завдання;

$T_{\mu} = 0,01$  с - некомпенсована стала часу ПЧ.

Інші параметри схеми:

$\omega_{0H}$  - номінальна швидкість ідеального холостого ходу;

$p_n$  - число пар полюсів обмотки статора;

$T_E$  - електромагнітна стала часу двигуна;

$\omega_H$  - номінальна швидкість двигуна;

$M_H$  - номінальний момент двигуна;

$\beta$  - модуль статичної жорсткості;

$J_M$  - момент інерції механізму;

$T_M$  - електромеханічна стала двигуна;

$M_C$  - момент навантаження;

$k_D$  - коефіцієнт передачі двигуна.

Параметри передаточних функцій ланок структурної схеми (рис. 4.2) визначимо за наступними співвідношеннями:

$$K_D = \frac{2\pi}{p_n}; \quad T_E = \frac{1}{\omega_{0эл.н} \cdot s_{к.н}}; \quad \beta = \frac{M_H}{\omega_{0H} - \omega_H}; \quad J_{\Sigma} = J_D + \frac{J_M^2}{i^2}, \quad (4.8)$$

Визначимо параметри структурної схеми по наступних співвідношеннях:

$$T_E = \frac{1}{\omega_{0эл.н} \cdot s_{к.н}} = \frac{1}{314 \cdot 0.15} = 0.021с; \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{M_n}{\omega_{xx} - \omega_n} = \frac{107.95}{104.72 - 101.9} = 38.28 \text{ Нм} \cdot \text{с}; \quad (4.10)$$

Згідно з технічним завданням

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= 2J_d + 2J_w \frac{1}{i_{fg}^2} + m \frac{R_w^2}{i_{fg}^2} = J_d + 2 \frac{m_w R_w^2}{2i_{fg}^2} + m \frac{R_w^2}{i_{fg}^2} = \\ &= 2 \cdot 0.14 + 2 \frac{15 \cdot 0.28^2}{2} + 1450 \frac{0.28^2}{1} = 115.31 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Звідки електромеханічна стала часу та коефіцієнт передачі двигуна дорівнюють

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{115}{38.28} = 3 \text{ с}; \quad (4.12)$$

$$K_D = \frac{2 \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 3,14}{3} = 2.1. \quad (4.13)$$

З метою отримання необхідних динамічних властивостей системи використовуємо контур регулювання із зворотним зв'язком по швидкості.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$K_{\omega} = \frac{U_3}{1,3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1,3 \cdot 101.9} = 0.075 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (4.14)$$

Таким чином, узагальнена структурна схема частотного регулювання (рисунок 4.3) буде мати такий вигляд:

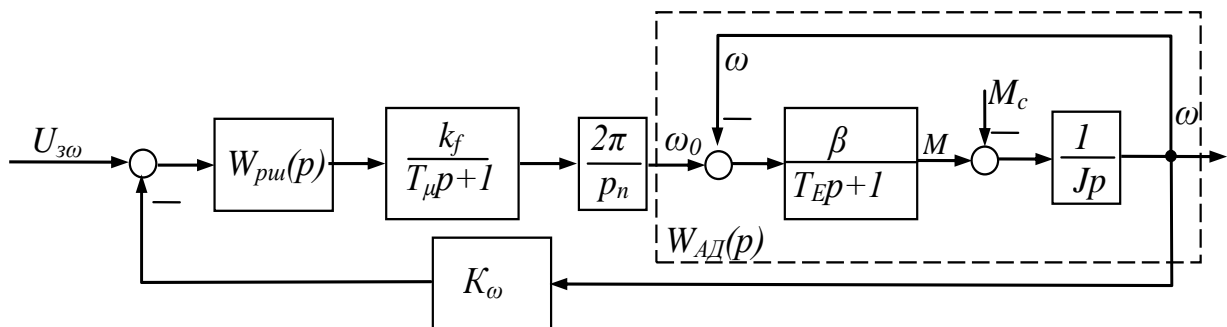


Рисунок 4.3 – Структурна схема електроприводу при частотному керуванні

Передаточна функція двигуна

$$\begin{aligned}
 W_D(p) &= \frac{\frac{\beta \cdot K_D}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_E \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_E \cdot p + 1)}} = \frac{\beta \cdot K_D}{J_\Sigma \cdot T_E \cdot p^2 + J_\Sigma \cdot p + \beta} = \frac{K_D}{T_M \cdot T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{2.1}{3 \cdot 0.021 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1} = \frac{2.1}{0.063 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1}.
 \end{aligned}$$

Структурна схема контуру регулювання швидкості представлена на рис. 4.4.

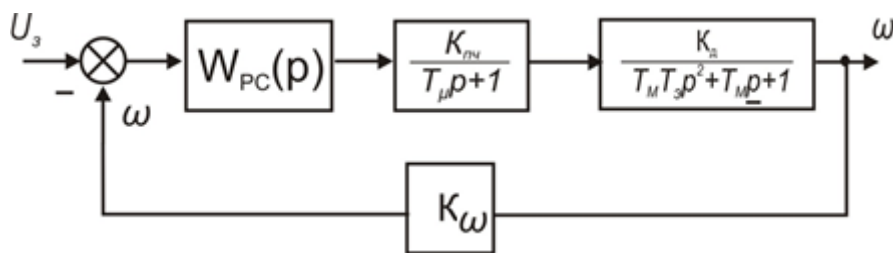


Рисунок 4.4 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Звідси передатна функція об'єкта регулювання за швидкості буде:

$$\begin{aligned}
 W_{ОРШ}(p) &= \frac{K_{ПЧ} \cdot K_D}{(T_\mu \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{5 \cdot 2.1}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (3 \cdot 0.021 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1)} = \frac{10.5}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (0.063 p^2 + 3 \cdot p + 1)}.
 \end{aligned}$$

Визначимо передаточну функцію регулятора швидкості

$$W_{РШ}(p) = \frac{W_{РОЗ.Ш}(p)}{W_{ОРШ}(p)} = \frac{T_M \cdot T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \frac{0.063 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1}{4.725 \cdot p}$$

$$\text{де } T_U = a_c \cdot K_\omega \cdot K_{ПЧ} \cdot K_D \cdot T_M = 2 \cdot 0.075 \cdot 5 \cdot 2.1 \cdot 68.5 = 4.725 \text{ с},$$

$a = 2$  - коефіцієнт демпфування контуру швидкості; дане значення відповідає оптимальному за швидкодією перехідному процесу.

Після перетворень отримуємо передаточну функцію ПІД-регулятора швидкості:

$$W_{PШ}(p) = 0.013 \cdot p + 0.63 + \frac{1}{4.725p}. \quad (4.15)$$

### 4.3 Непряме векторне керування

Системи векторного керування забезпечують майже ідеальне відпрацювання заданої траєкторії, але є складнішими в реалізації через необхідність більшої кількості датчиків, підвищеної точності вимірювань і значної кількості обчислень в реальному часі. До того ж ці системи є дуже чутливими до параметричних збурень АД. Однак, вищеперераховані недоліки повністю перекриваються перевагами, а саме: висока точність регулювання швидкості; плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот; швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження практично не відбувається зміни швидкості; збільшений діапазон управління і точність регулювання; знижуються втрати на нагрів і намагнічування, підвищується ККД електродвигуна.

На основі математичної моделі, записаної в стаціонарній системі координат (a – b) [28], виконаємо моделювання системи непрямого векторного керування АД:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, & M &= \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора,  $(i_{1a}, i_{1b})^T$  – компоненти вектора струму статора в системі координат  $(a-b)$ ,  $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$  – компоненти вектора потокозчеплень ротора,  $(u_{1a}, u_{1b})^T$  – компоненти вектора напруги статора,  $M_c$  – момент навантаження,  $\nu$  – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб

$$\sigma = L_1 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \gamma = \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right),$$

де  $J$  – повний момент інерції ротора,  $R_1, R_2, L_1, L_2$  – опори й індуктивності статора і ротора відповідно,  $L_m$  – індуктивність намагнічуючого контуру,  $p_n$  – число пар полюсів.

Для проектування алгоритму векторного керування АД використаємо синхронну систему координат  $(d-q)$ , яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю  $\omega_0$  (див. рис.4.5).

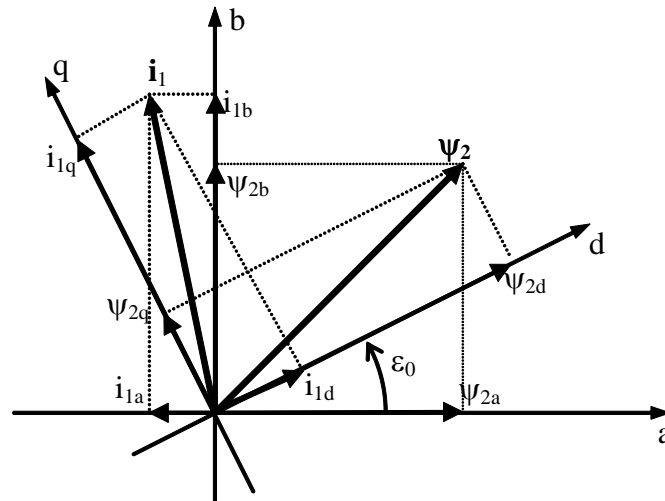


Рисунок 4.5 – Розташування векторів АД

Перетворення координат визначаються:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab} \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{J\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq} \end{aligned} \quad \text{де} \quad \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & \sin\varepsilon_0 \\ -\sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

де  $\mathbf{x}_{yz}$  позначає двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора,  $\varepsilon_0$  – кутове положення системи координат  $(d-q)$  відносно стаціонарної  $(a-b)$ .

Для відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості та потокозчеплення необхідно, щоб для моделі АД, заданої (4.16), виконувались наступні положення:

A.1. Кутова швидкість ротора, струми статора доступні для вимірювання.

A2. Параметри АД відомі і незмінні.

A3. Момент навантаження  $M_c$  невідомий, постійний та обмежений.

A4. Задані траєкторії кутової швидкості  $\omega^*$  і потокозчеплення  $\psi^* > 0$  є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритму непрямого векторного керування, який забезпечує:

O1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (4.18)$$

при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних.

O2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0 \quad (4.19)$$

O3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

O4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Отже, структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

- розімкнутий регулятор модуля вектору потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (4.20)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (4.21)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi, \quad (4.22)$$

де  $\psi^*$ ,  $\dot{\psi}^*$ ,  $\ddot{\psi}^*$  – задане значення модуля вектору потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно,  $\phi$  – робастифікуючий зв'язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку  $\phi = 0$ .

- регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left( \gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (4.23)$$

де  $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$  – похибка відпрацювання струму по осі (d),  $u_{1d}$  – компонента вектору напруги статора по осі (d),  $(k_i, k_{ii}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

- регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[ -k_\omega \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (4.25)$$

де  $\omega^*$ ,  $\dot{\omega}^*$ ,  $\ddot{\omega}^*$  – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно,  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$  – похибка відпрацювання кутової швидкості,  $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості.

- регулятор струму по осі (q) (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left( \gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (4.26)$$

де  $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$  – похибка відпрацювання струму по осі (q),  $u_{1q}$  – компонента вектора напруги статора по осі (q).

## Висновки до розділу 4

В даному розділі обрано і розроблено три алгоритми керування асинхронним двигуном, на основі яких будуть проводитись дослідження взаємозв'язаної електромеханічної системи транспортного засобу:

1. Частотне керування АД за методикою Костенка М.П., яка не дозволяє незалежно регулювати координати електропривода із заданими динамічними та статичними характеристиками і використовується у дипломному проекті для порівняння з більш сучасними і ефективними методами управління.
2. Частотний алгоритм зі зворотнім зв'язком за швидкістю за рахунок наявності регулятора, який повинен забезпечувати відпрацювання заданої траєкторії швидкості.
3. Система непрямого векторного керування, що має забезпечувати високу точність регулювання швидкості, плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот, швидко реакцію на зміну навантаження.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Методом математичного моделювання виконаємо дослідження статичних та динамічних характеристик взаємозв'язаної електромеханічної системи, використовуючи математичну моделі частотного розімкненого керування, частотного керування з регулятором швидкості та непрямого векторного керування швидкістю. Дослідження впливу перехресних зв'язків проведемо за рахунок накидання і скидання через  $0.5c$  половини номінального моменту на перший двигун в усталеному режимі роботи.

Досліджувані система зібрані у програмному середовищі MATLAB «Simulink». Результатом моделювання маємо побудовані статичні і динамічні характеристики роботи взаємозв'язаної електромеханічної системи.

Методика проведення тесту однакова для всіх трьох типів керування і включає в себе збудження двигуна за  $0.1(c)$  від початкових умов  $\psi_0 = 0.02 (Вб)$  до значення потокозчеплення  $\psi = 0.97 (Вб)$ , яке буде підтримуватись протягом усього тесту; розгін до  $\omega = 50 (рад / c)$  за час  $t = 10(c)$  з моментом опору  $M_{on} = 20 (Нм)$ , накидання навантажувального моменту  $M_c = 50 (Нм)$  у  $14(c)$  та його скидання у  $14.5(c)$ , потім гальмування двигуна за час  $t = 10(c)$ , рівний часу розгону. На основі отриманих даних будується залежність вимірюваних величин від часу.

### 5.1 Частотне розімкнене керування

На основі алгоритму, описаного у п. 4.1, проведено дослідження поведінки системи за методикою, описаною вище. Результати моделювання зображено на рис. 5.1 та рис. 5.2.

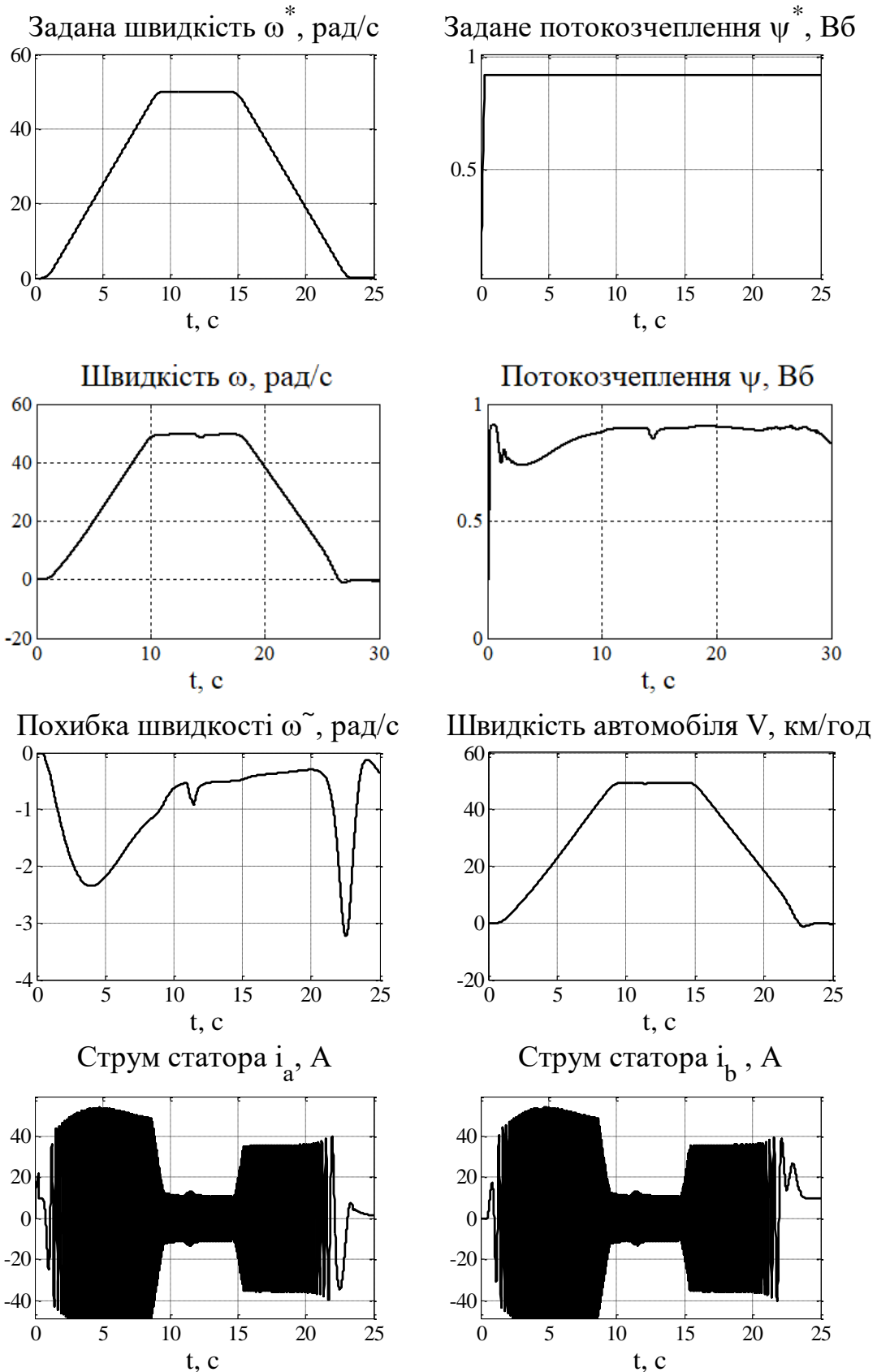


Рисунок 5.1,а – Результати моделювання розімкнутого частотного алгоритму для першого двигуна

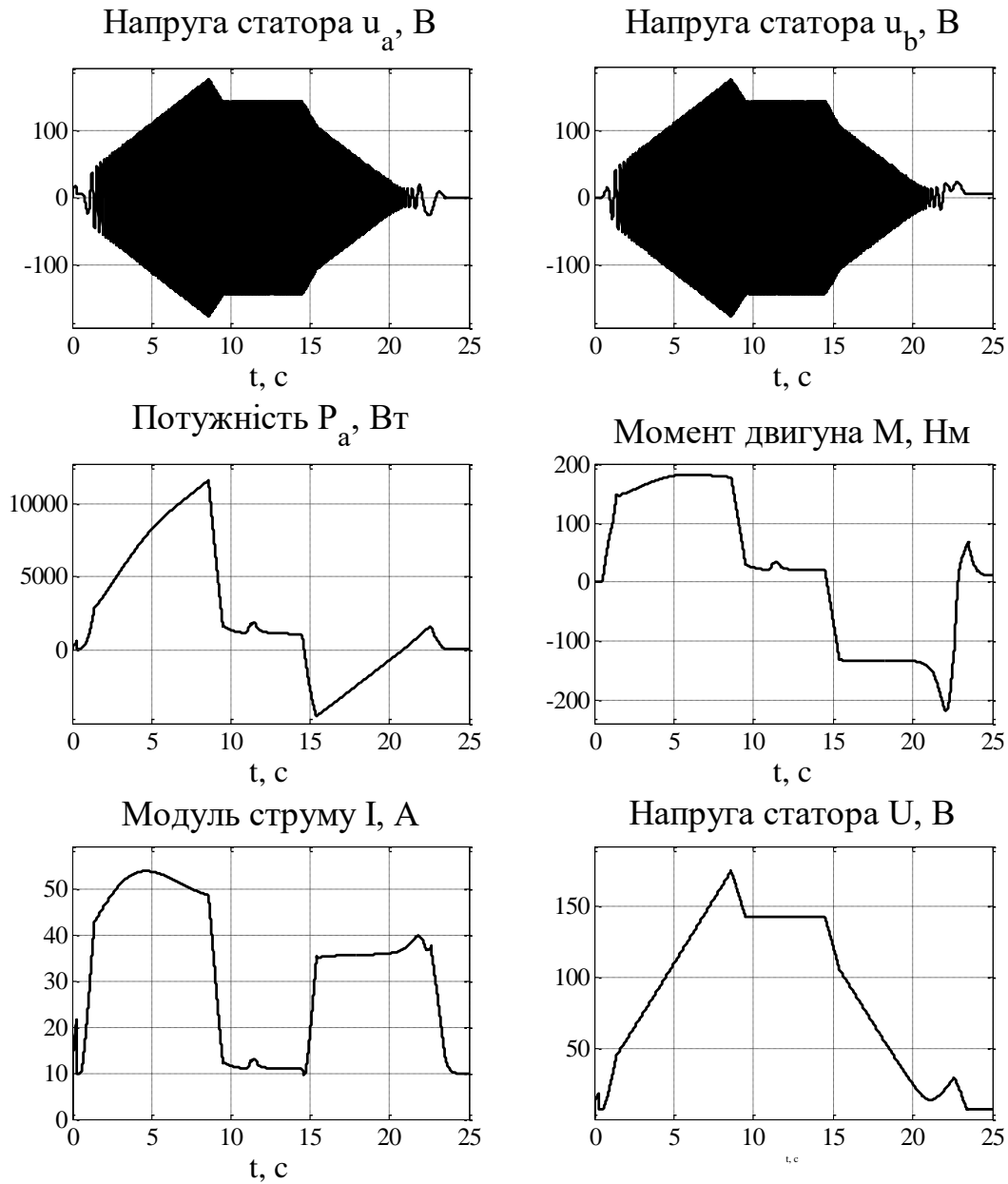


Рисунок 5.1,б – Результати моделювання розімкнутого частотного алгоритму для першого двигуна

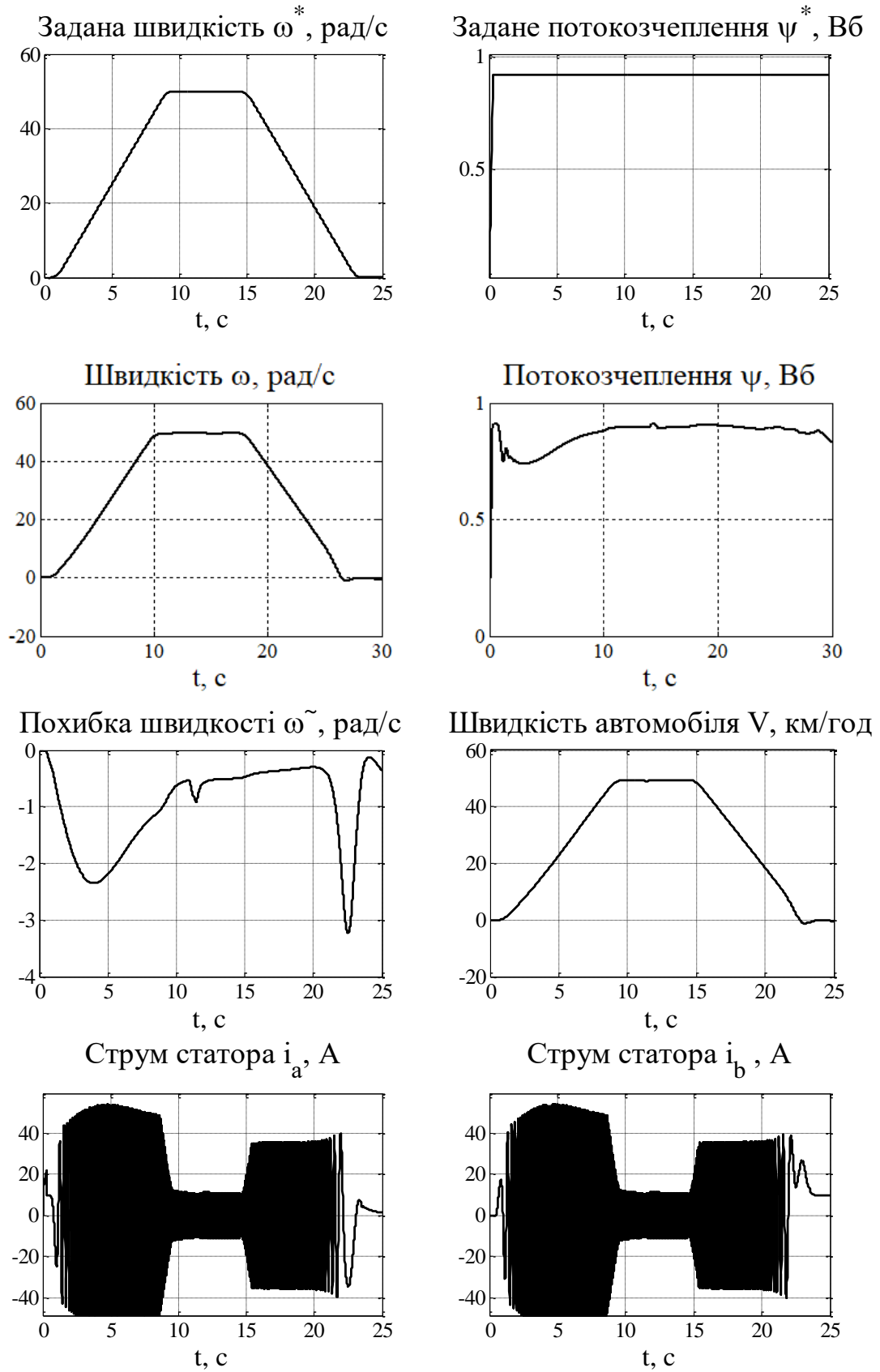


Рисунок 5.2,а – Результати моделювання розімкнутого частотного алгоритму для другого двигуна

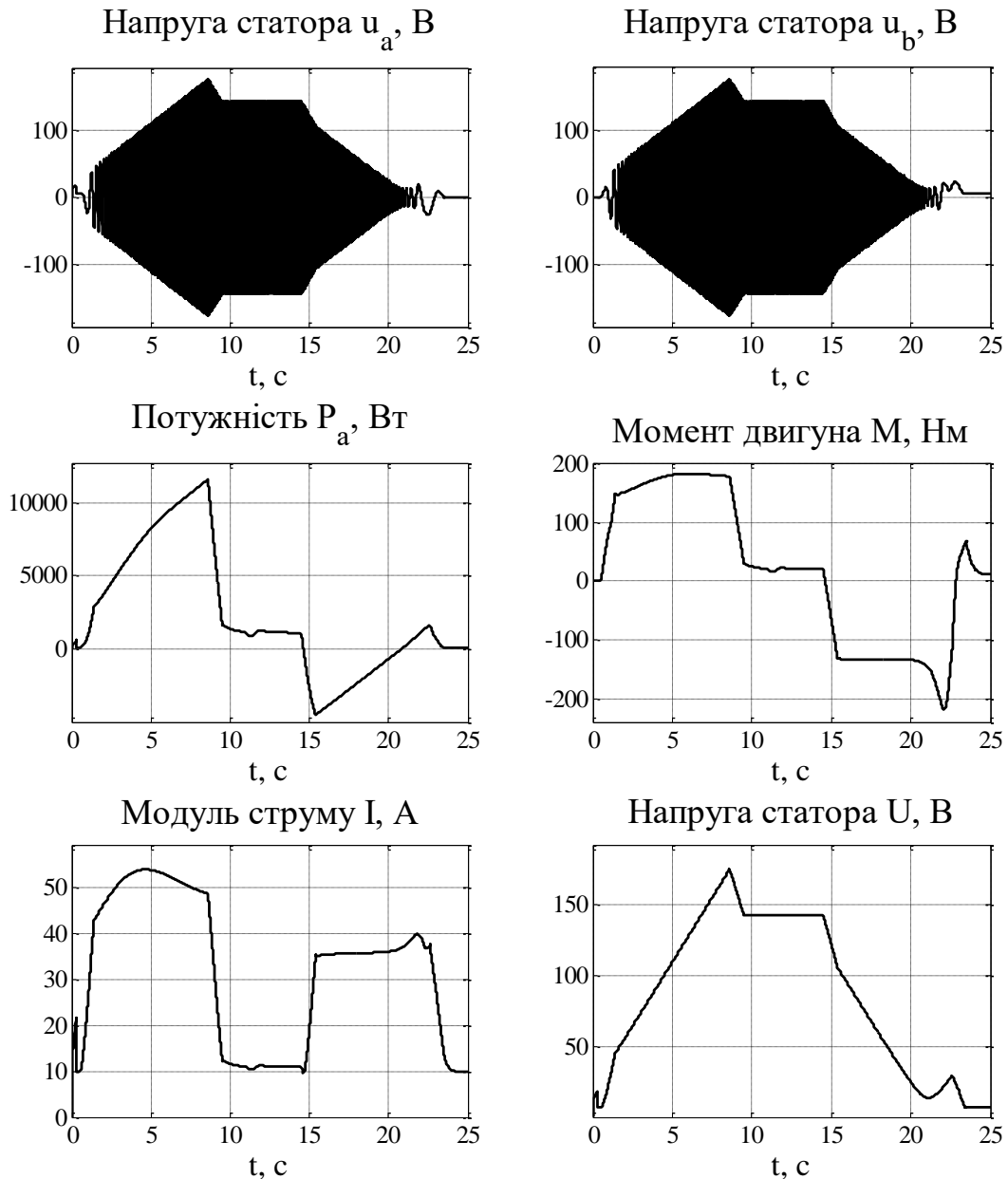


Рисунок 5.2,б – Результати моделювання розімкнутого частотного алгоритму для другого двигуна

З отриманих графіків (рис. 5.1 та рис. 5.2) видно, що задана траєкторія швидкості відпрацьована обома двигунами. Значення струмів не перевищують критичне значення при динамічному та усталеному режимах, показники напруги також відповідають допустимим значенням двигуна. Активна потужність, споживана двигуном, зростає до номінального значення при розгоні. Вплив

перехресних зв'язків розглянемо більш детально на графіку моментів 1 та 2 двигуна (рис. 5.3).

Бачимо, що момент 1 двигуна зростає до значення 50 Нм за рахунок додатного зв'язку (момент навантаження була прикладений до цього двигуна) з великою інерційністю за рахунок низької швидкодії алгоритму керування, а момент 2 двигуна зменшується на 10 Нм за рахунок від'ємного перехресного зв'язку з першим. Після скидання статичного моменту різниця навантажувальних моментів стає рівною нулеві, тому і перехресний зв'язок стає нульовим і моменти обох двигунів починають повертатись до вихідного стану, але досить повільно.

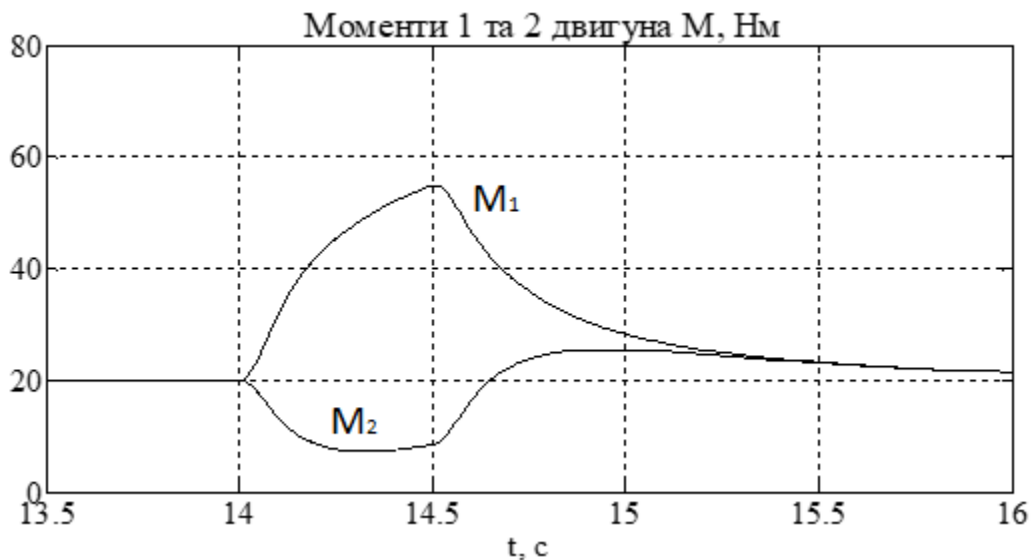


Рисунок 5.3 – Графік відпрацювання навантажувального моменту при розімкненому частотному керуванні обома двигунами

## 5.2 Частотне керування з регулятором швидкості

На основі алгоритму, описаного у п. 4.2, проведено дослідження поведінки системи за методикою, описаною вище. Результати моделювання зображено на рис. 5.4. та рис. 5.5.

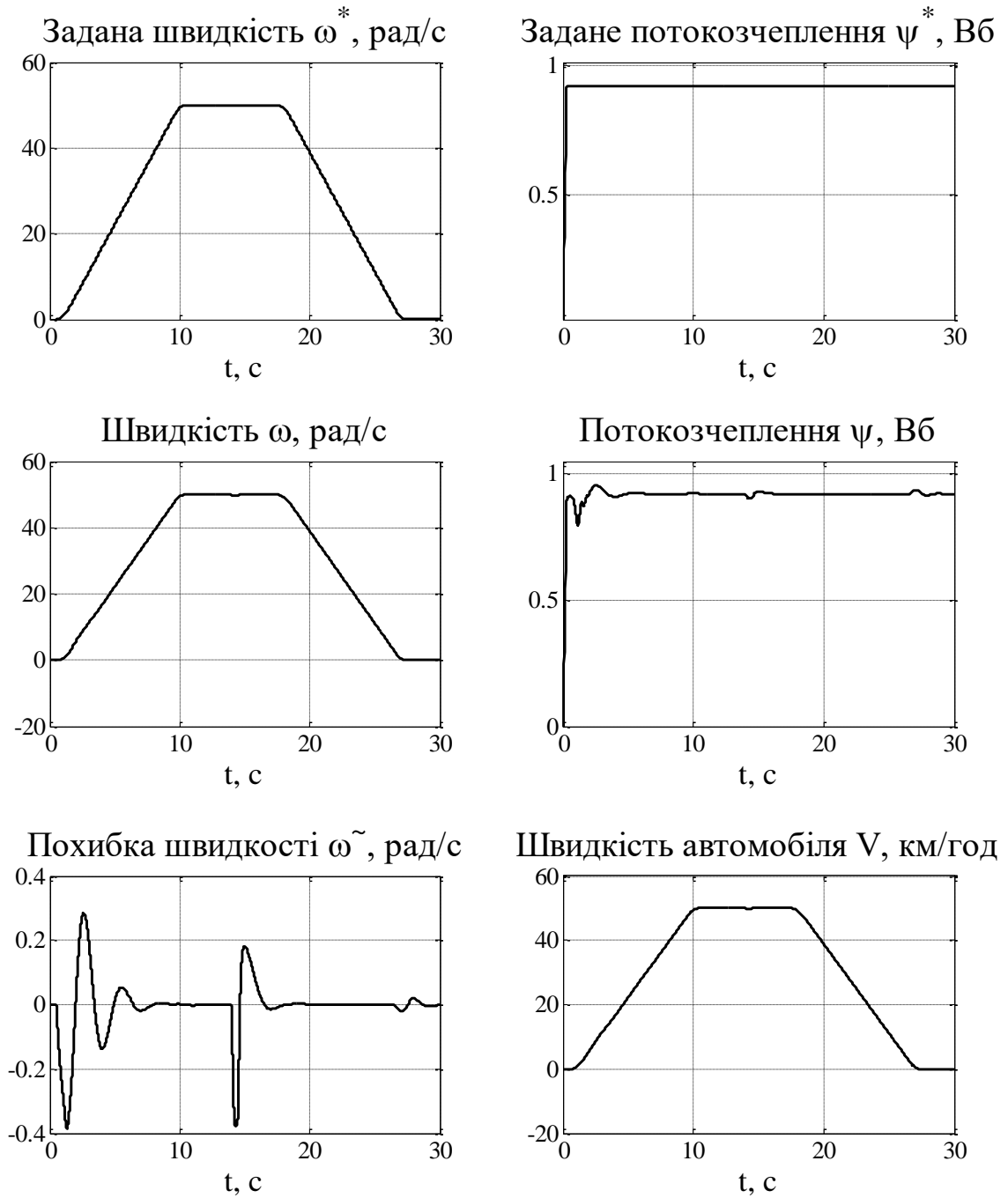


Рисунок 5.4,а – Результати моделювання частотного керування з регулятором швидкості для першого двигуна

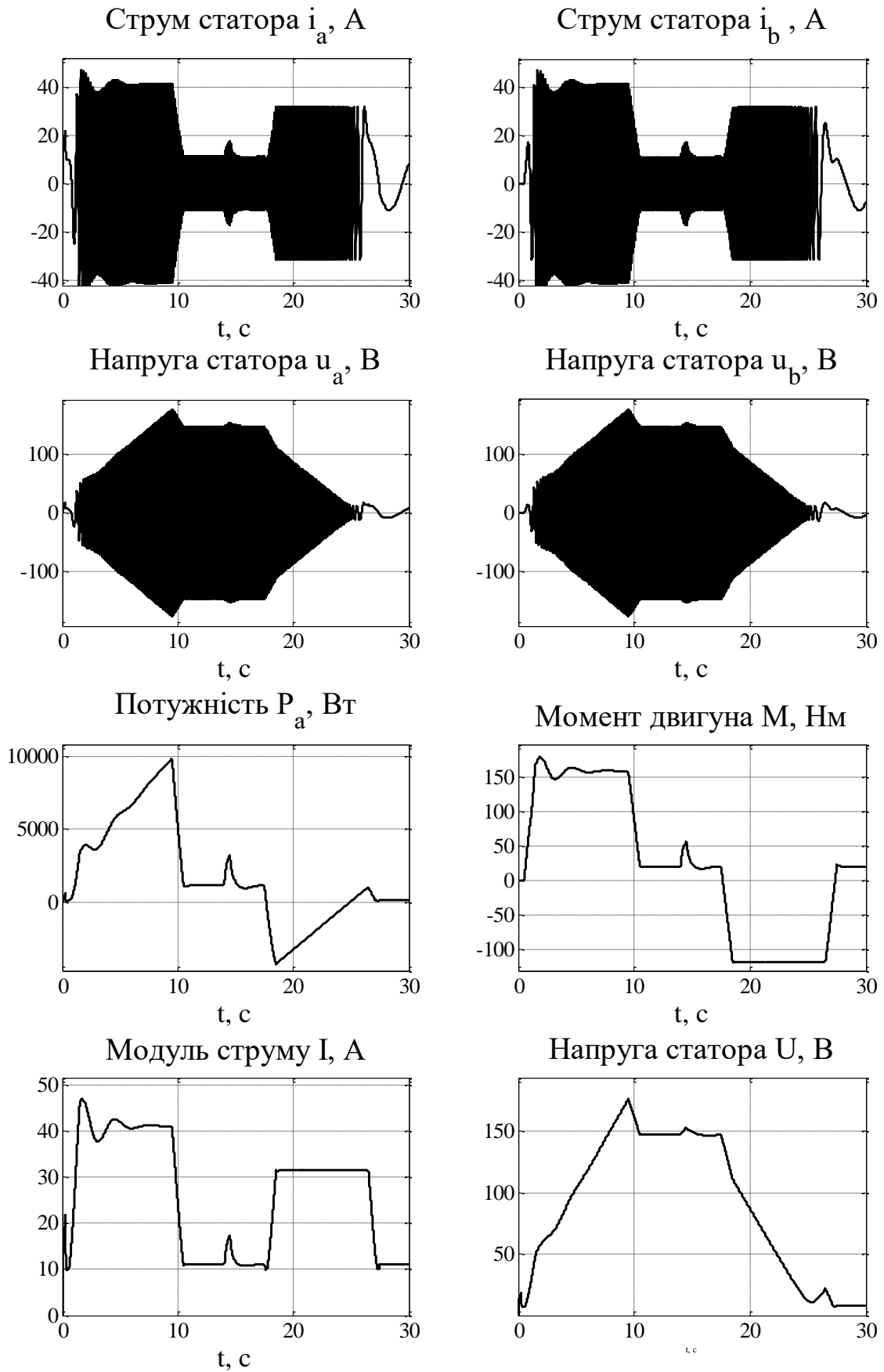


Рисунок 5.4,б – Результати моделювання частотного керування з регулятором швидкості для першого двигуна

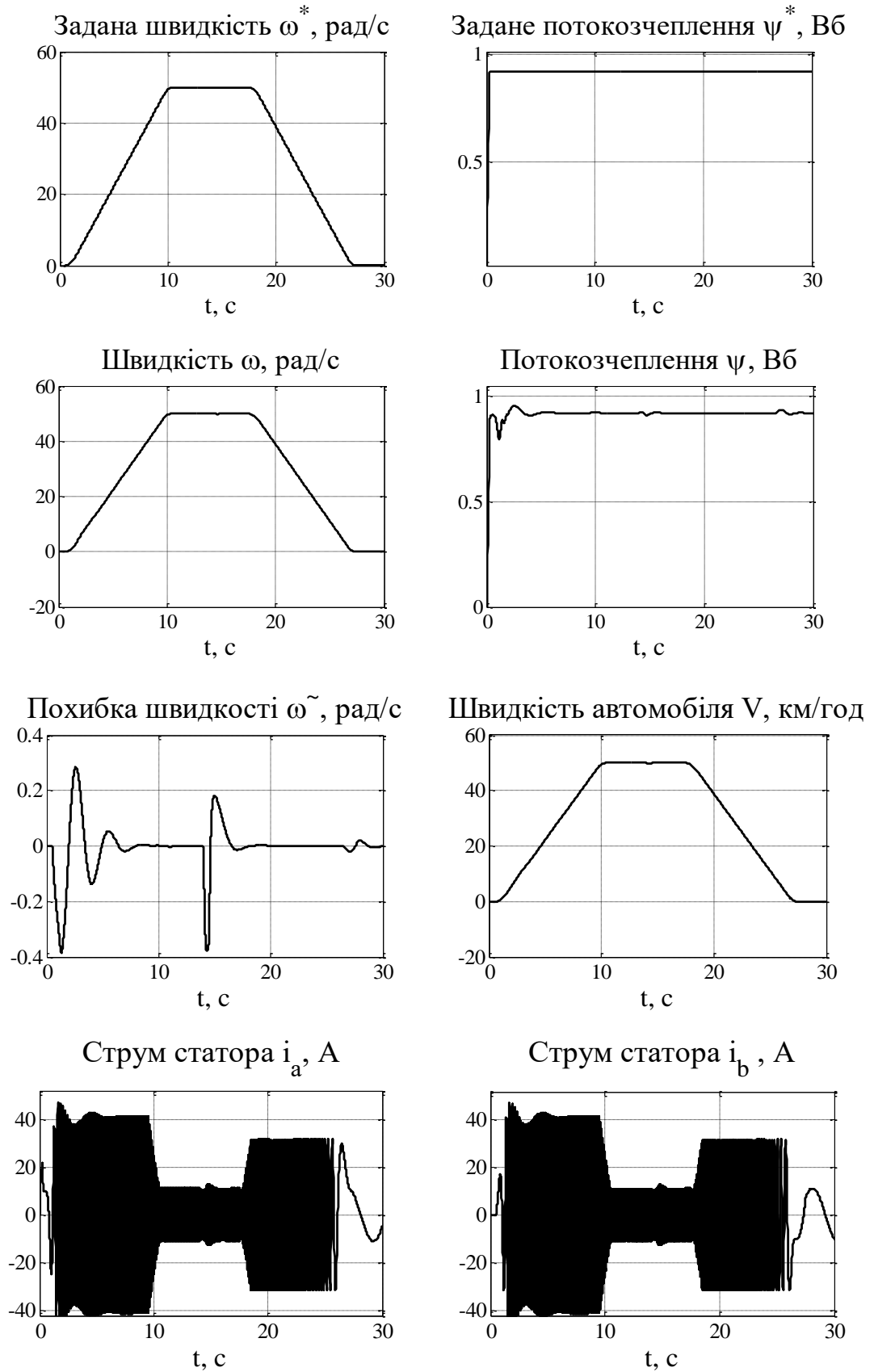


Рисунок 5.5,а – Результати моделювання частотного керування з регулятором швидкості для другого двигуна

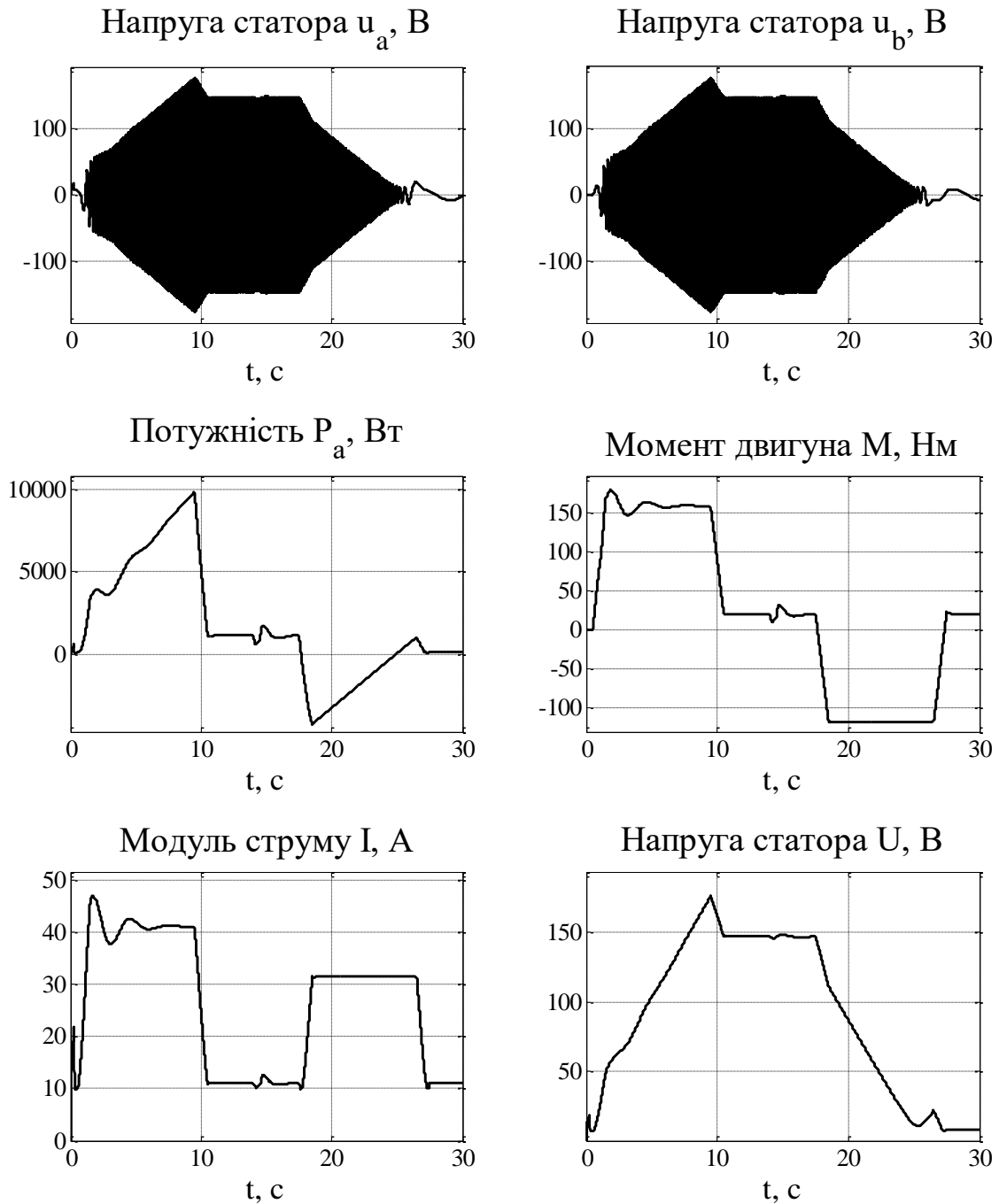


Рисунок 5.5,б – Результати моделювання частотного керування з регулятором швидкості для другого двигуна

З отриманих графіків (рис. 5.4 та рис. 5.5) видно, що задана траєкторія швидкості відпрацьована обома двигунами. Значення струмів не перевищують критичне значення при динамічному та усталеному режимах, показники напруги також відповідають допустимим значенням двигуна. Активна потужність, споживана двигуном, зростає до номінального значення при розгоні. Вплив

перехресних зв'язків розглянемо більш детально на графіку моментів 1 та 2 двигуна (рис. 5.6).

Бачимо, що момент 1 двигуна зростає до значення 70 Нм за рахунок додатного зв'язку (момент навантаження бува прикладений до цього двигуна) швидше, ніж у попередньому досліді, причому присутнє перерегулювання та коливальні перехідні процеси, що є характерним для частотного керування. Момент 2 двигуна зменшується на 10 Нм за рахунок від'ємного перехресного зв'язку з першим, але досить швидко за рахунок системи керування зводиться до попереднього значення 20 Нм. Після скидання статичного моменту значення динамічного моменту повертається до усталеного і стає рівним 20 Нм.

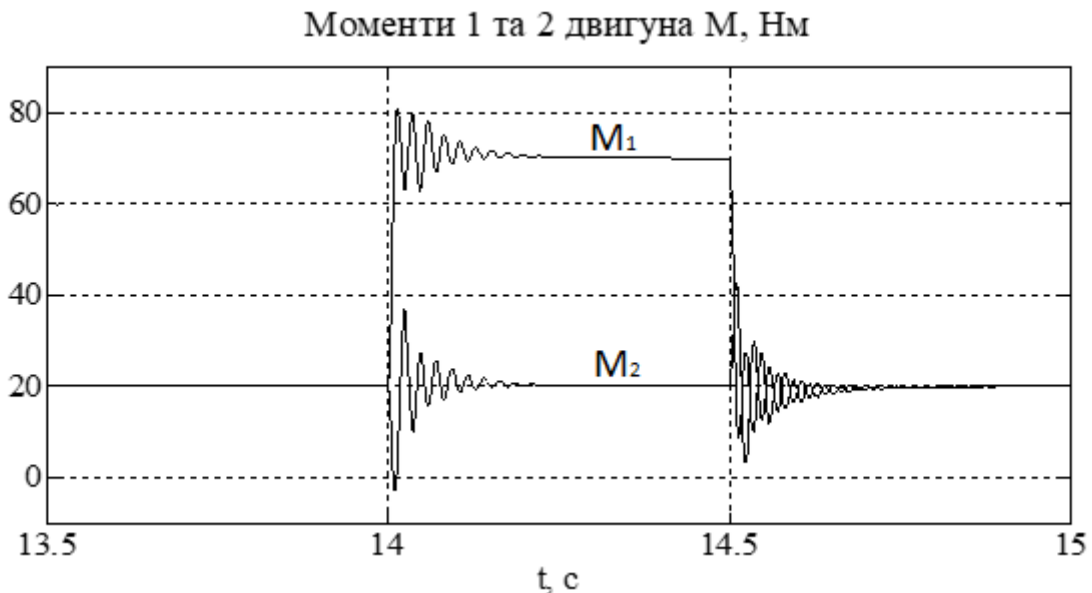


Рисунок 5.6 – Графік відпрацювання навантажувального моменту при частотному керуванні з регулятором швидкості обома двигунами

### 5.3 Непряме векторне керування швидкістю

На основі алгоритму, описаного у п. 4.3, проведено дослідження поведінки системи за методикою, описаною вище. Результати моделювання зображено на рис. 5.7. та рис. 5.8.

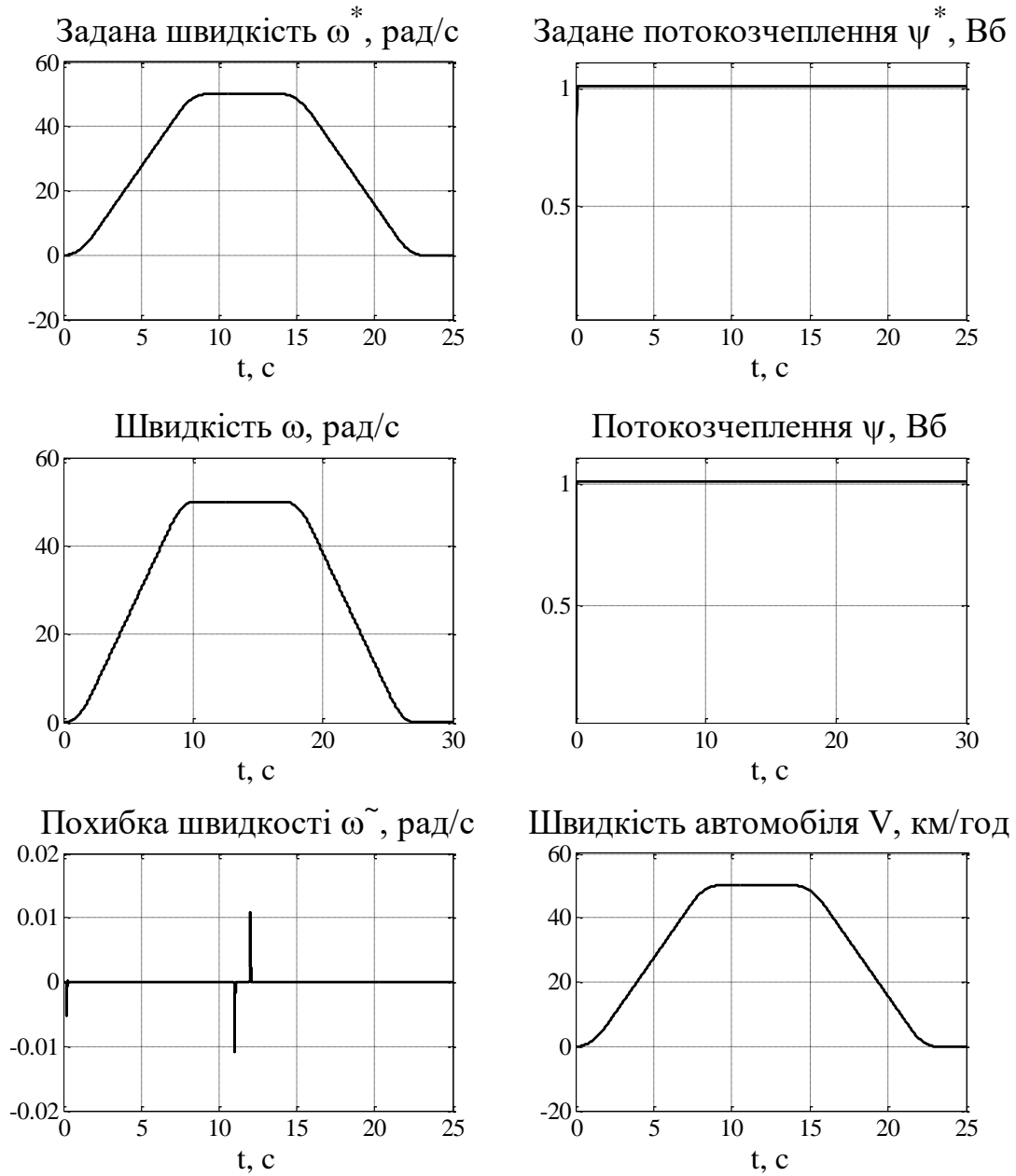


Рисунок 5.7,а – Результати моделювання алгоритму непрямого векторного керування для першого двигуна

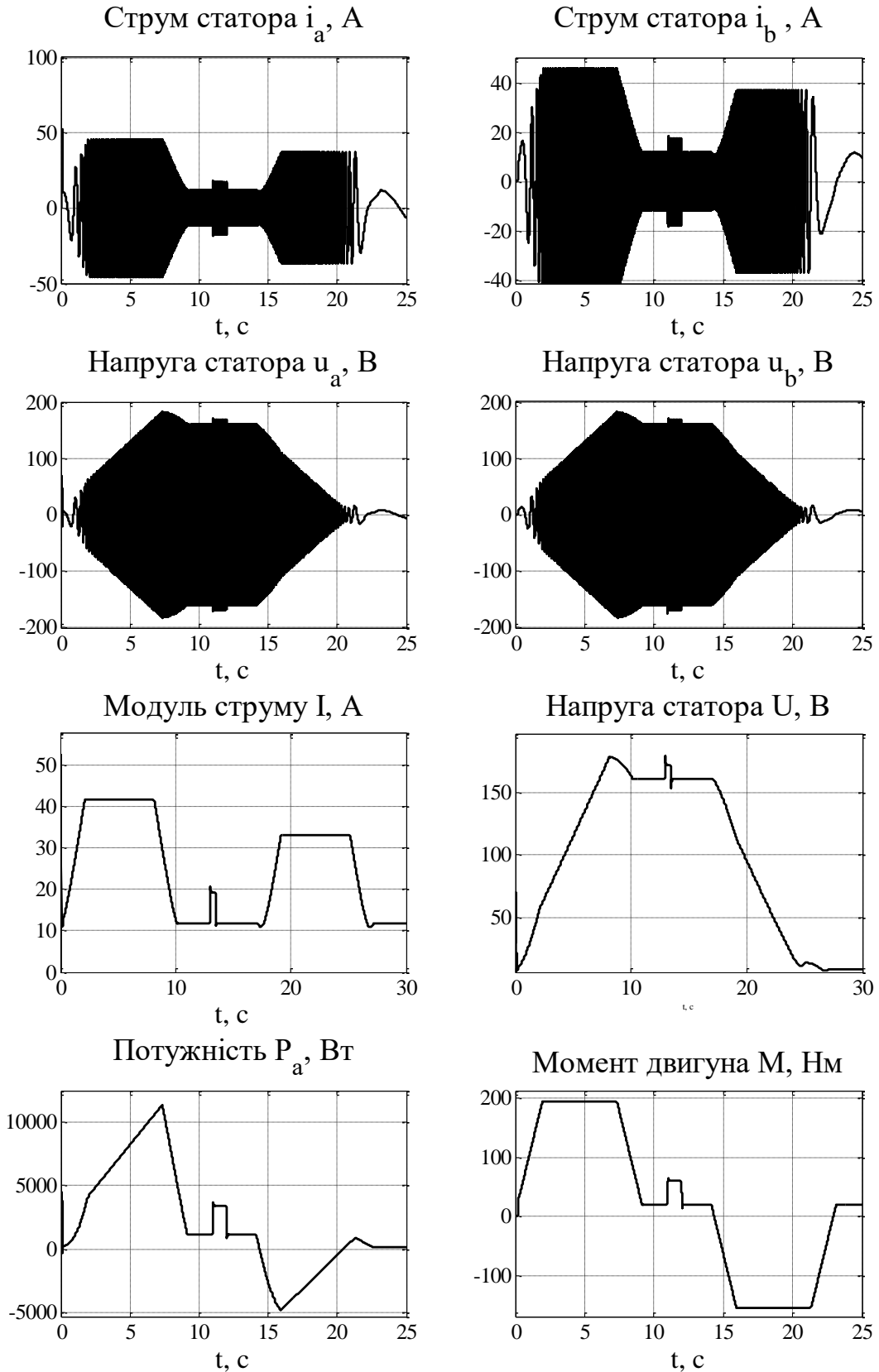


Рисунок 5.7,б – Результати моделювання алгоритму непрямого векторного керування для першого двигуна

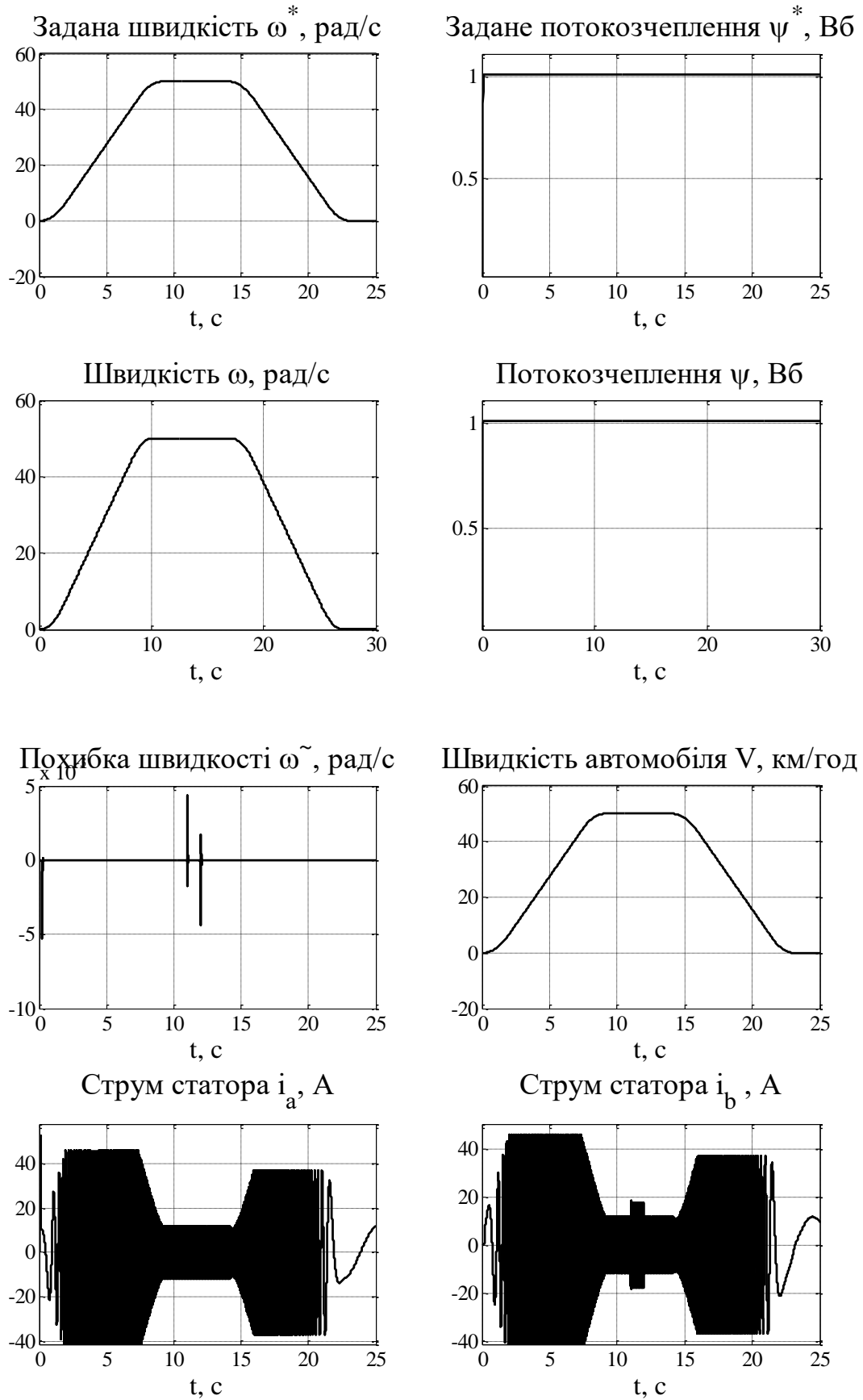


Рисунок 5.8,а – Результати моделювання алгоритму непрямого векторного керування для другого двигуна

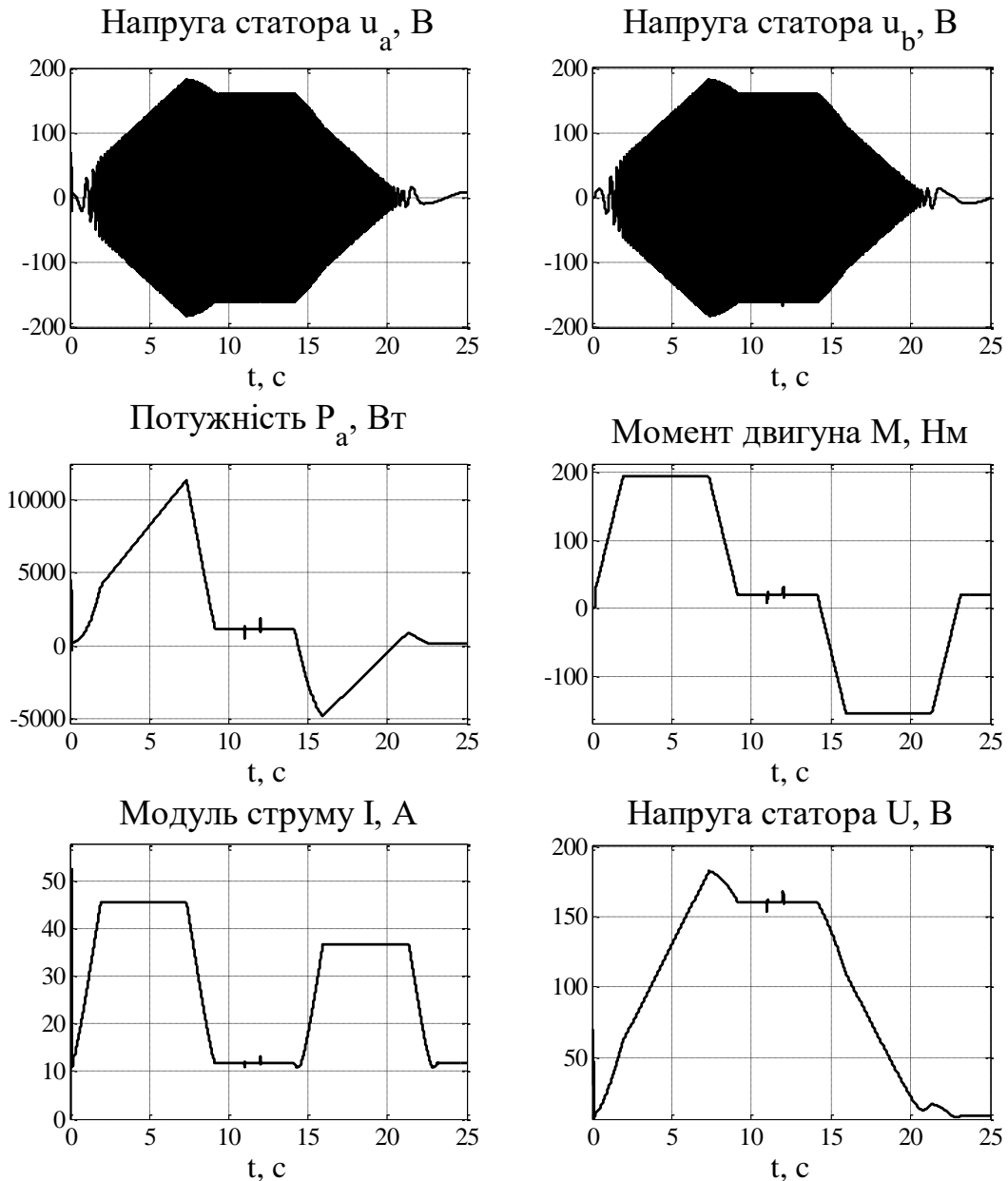


Рисунок 5.8,б – Результати моделювання алгоритму непрямого векторного керування для другого двигуна

З отриманих графіків (рис. 5.7 та рис. 5.8) видно, що задана траєкторія швидкості відпрацьовується ідеально при розгоні та гальмуванні. Значення струмів не перевищують критичне значення при динамічному та усталеному режимах, показники напруги також не відповідають допустимим значенням двигуна. Активна потужність, споживана двигуном, зростає до номінального значення при розгоні.

Розглянемо більш детально графік моментів 1 та 2 двигуна при накиданні моменту навантаження (рис. 5.9). Бачимо, що момент 1 двигуна зростає до значення 70 Нм за рахунок додатного зв'язку (момент навантаження була прикладений до цього двигуна), а момент 2 двигуна зменшується за рахунок від'ємного перехресного зв'язку. Через високу швидкодію та точність векторного керування, перехідні процеси при накиданні та скиданні навантаження проходять за 0.1с. Після скидання статичного моменту різниця навантажувальних моментів стає рівною нулеві, тому і перехресний зв'язок стає нульовим і моменти обох двигунів стаю рівними 20 Нм.

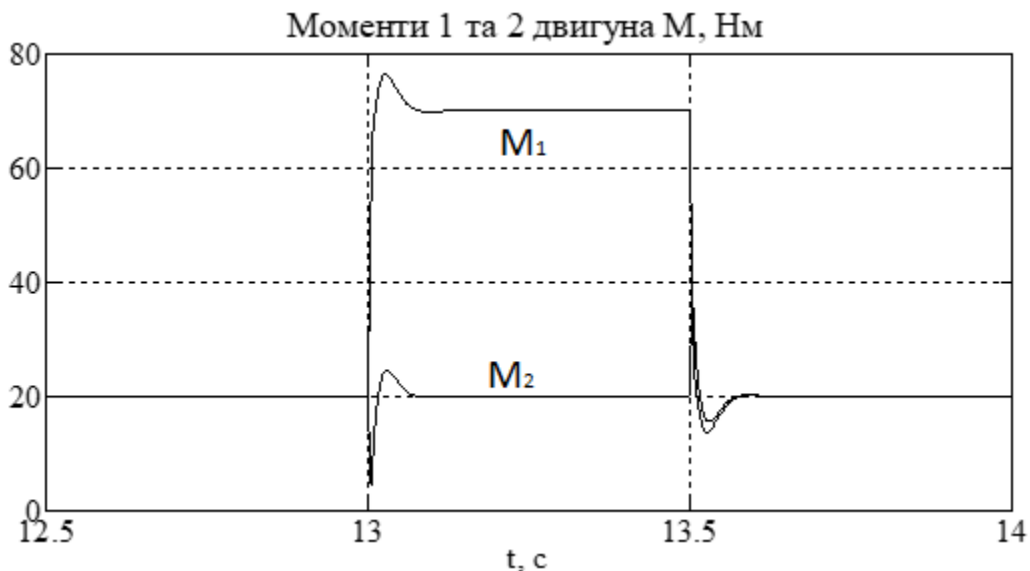


Рисунок 5.9 – Графік відпрацювання навантажувального моменту при векторному керуванні обома двигунами

Порівняємо графіки моментів двигунів при різних типах керування (див. рис. 5.10). Як бачимо, розімкнене частотне керування має високу інерційність і не здатне забезпечити необхідне відпрацювання навантажувального моменту. Частотне керування з регулятором та непряме векторне мають набагато кращу швидкодію і повністю задовольняють вимогам, однак показники векторного керування дещо кращі (менше перерегулювання і відсутність коливальних перехідних процесів). Можна зробити висновок, що при відсутності системи керування зміна динамічного моменту одного з двигунів суттєво впливає

на інший, що призводить до виникнення похибки відпрацювання заданої траєкторії швидкості і не може застосовуватись в електроприводах автомобілів. В свою чергу, за рахунок регуляторів, системи, описані в п. 4.2 та п. 4.3, задовольняють вимогам і здатні забезпечити незалежне функціонування тягових двигунів взаємозв'язаної електромеханічної системи, адже при прикладанні навантажувального моменту до одного з двигунів, інший через короткий перехідний процес повертається до усталеного значення, тому можна вважати, що кожен двигун керується індивідуально.

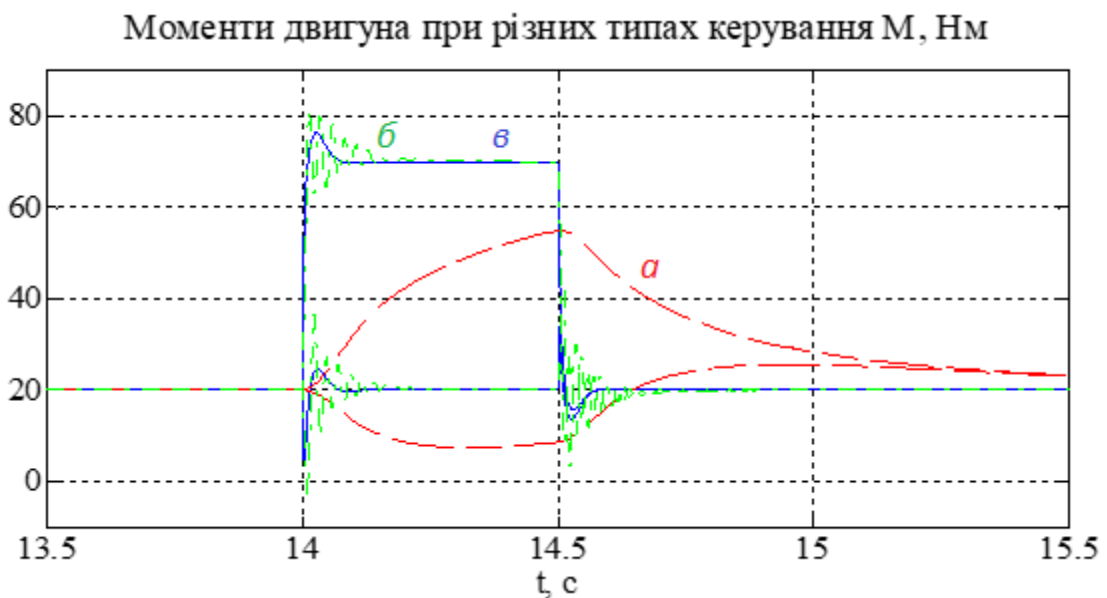


Рисунок 5.10 – Порівняння моментів двигунів при різних типах керування

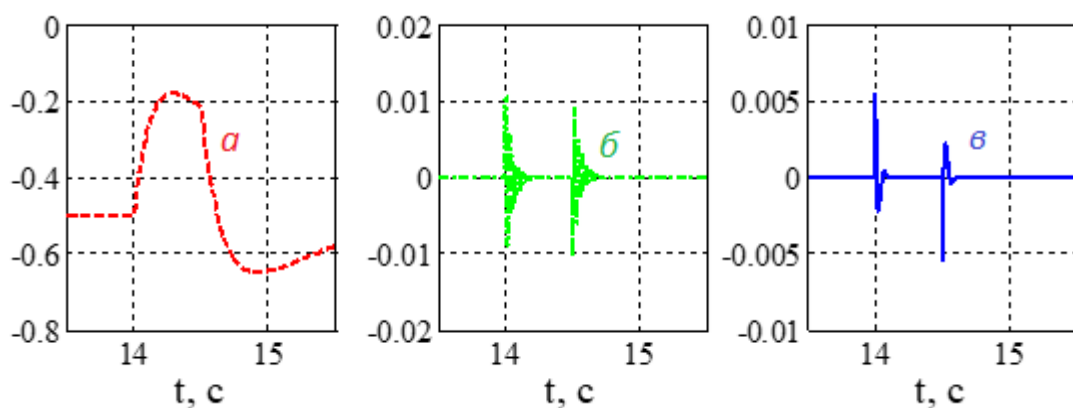


Рисунок 5.11 – Похибки швидкості других двигунів при різних типах керування

де  $a$  – розімкнене частотне керування,  $b$  – частотне керування,  $v$  – непряме векторне керування.

Порівняємо похибки відпрацювання заданих траєкторій швидкостей других двигунів (рис. 5.11), так як саме на ці двигуни впливають від'ємні перехресні зв'язки. Бачимо, що замкнені системи мають значно меншу похибку і більш швидкі перехідні процеси, ніж розімкнена. Це, знову ж таки свідчить про те, що замкнені системи є придатними для використання у взаємозв'язаних електромеханічних системах, адже різниця в швидкостях обертання тягових двигунів призводить до дестабілізації автомобіля і створює аварійну ситуацію.

### **Висновки до розділу 5**

Методами математичного моделювання було отримано динамічні та статичні характеристики взаємозв'язаної електромеханічної системи, на основі яких можна зробити наступні висновки:

1. Розімкнене частотне керування має низьку швидкодію і не забезпечує необхідне відпрацювання навантажувального моменту, що робить нераціональним його застосування в електроприводах автомобілів.
2. Частотне керування з регулятором швидкості має набагато кращі динамічні та статичні характеристики, більш високу швидкодію, але його недоліками є наявність перерегулювання та коливальність у перехідних процесах.
3. Серед усіх досліджених алгоритмів керування, непряме векторне забезпечує найкращі показники відпрацювання заданої траєкторії швидкості, найбільшу швидкодію та відсутність коливальних перехідних процесів.
4. Використання замкнених систем керування здатне забезпечити автономне керування тяговими електродвигунами, що робить їх придатними для застосування у взаємозв'язаних електромеханічних системах транспортних засобів з індивідуальним приводом коліс.

## ВИСНОВКИ

В дипломному проекті розглянуто і проаналізовано системи індивідуального електроприводу автомобілів, на основі чого досліджено взаємозв'язану систему транспортного засобу. Отримано наступні результати.

1. Завдяки новим технологіям та розробкам, системи індивідуального приводу коліс є дуже перспективними. При заміні звичного механічного диференціалу на електронний зменшується вага всієї системи електроприводу, покращується керованість та загальна енергоефективність, але така конфігурація вимагає більш складної системи керування.
2. Для синтезу системи керування було розглянуто математичну модель автомобіля при плоско-паралельному русі, на основі якої виявлено та досліджено перехресні зв'язки у взаємозв'язаній електромеханічній системі.
3. В даному проекті було обрано і досліджено три алгоритми керування асинхронним двигуном (розімкнений частотний, замкнений частотний з регулятором швидкості та непрямий векторний), за допомогою яких проведені дослідження взаємозв'язаної електромеханічної системи транспортного засобу
4. Використання замкнених систем керування здатне забезпечити незалежне функціонування тягових двигунів, що робить їх придатними для використання у взаємозв'язаних електромеханічних системах транспортних засобів з індивідуальним приводом коліс.

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering (IJEREEE) Vol 4, Issue 3, March 2018
2. C.C. Chan and K.T. Chau. Modern electric vehicle technology. Oxford University press, Oxford, 1st edition, 2001.
3. Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles, R. Vos D&C 2010.041.
4. I. Husain. *Electric and Hybrid Vehicles*. CRC Press LLC, Florida, 1st edition, 2003.
5. F. Tahami, R. Kazemi, and S. Farhanghi. A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 52(3):683 – 692, 2003.
6. W. Fei, P.C.K. Luk, and K. Jinupun. A new axial flux permanent magnet segmented-armature-torus machine for in-wheel direct drive applications. Power electronics specialists conference (pesc2008), Cranfield University, 2008.
7. M. Terashima, T. Ashikaga, T. Mizuno, K. Natori, N. Fujiwara, and M. Yada. Novel motors and controllers for high-performance electric vehicle with four in-wheel motors. *IEEE transactions on industrial electronics*, 44(1), 1997.
8. McTrusty, Sean Christifor, Modelling and control of electric vehicles with individually actuated in-wheel motors, Master of Philosophy thesis, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, 2016.
9. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles, Nasser Hashernia and Behzad Asaei, 2008.
10. M. Zeraouila, M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo. "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study". 5 Vehicle Power and Propulsion. 200S IEEE Conference. Volume. Issue. 7-9 Sept. 200S. pp. 8 -I S.

11. Gaurav Nanda and Narayan C. Kar. "A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles". Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2006.
12. J. Larminie, J. Lowry: *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, England, 2003.
13. Y.E. Zhao, J.W. Zhang, X.Q. Guan: Modeling and Simulation of Electronic Differential System for an Electric Vehicle with Two-Motor-Wheel Drive, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Xian, Shaanxi, China, 3 – 5 June 2009, pp. 1209 – 1214.
14. A Novel Multi-Drive Electric Vehicle System Control Based on Multi-Input Multi-Output PID Controller, Brahim Gasbaoui<sup>1</sup>, Abdelfatah Nasri<sup>2</sup>, 2012.
15. International Conference on Industrial Engineering Mathematical model of the vehicle in MATLAB Simulink Radionova L.V., Chernyshev A.D., *South Ural State University, 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation*
16. A.A. Radionov, A.S. Maklakov, E.A. Karyakina, New control method of back to back converter, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings, (2015).
17. ВИБОР ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В. Д. Мигаль, проф., д.т.н., В. Я. Двадненко, доц., к.т.н., Харьковський національний автомобільно-дорожній університет, 2016
18. РОЗРОБКА ЕНЕРГОМЕХАНІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЯГИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ © Д. Ю. Зубенко, А. В. Коваленко, О. М. Петренко, В. М. Шавкун, М. Ю. Олехно, 2016.
19. Shchetina, V. A., Morgovskiy, Ju. Ja., Tsenter, B. I., Bogomazov, V. A. (1987). *Elektromobil': tekhnika i ekonomika [Electric car: technology and economics]*. Mashinostroyeniye, 253.
20. Electric vehicle design, modelling and optimization Amir Guizania, Moncef Hammad<sup>1</sup>, Jean-Yves Choley<sup>1</sup>, Thierry Soriano<sup>1</sup>, Mohamed Slim Abbas<sup>2</sup> and

Mohamed Haddar<sup>2</sup>, *Mechanics & Industry* 17, 405 (2016) с AFM, EDP Sciences 2016.

21. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978 г. – 832 с.
22. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. — К.: Техніка, 2002. — 512 с.
23. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. — М.: Высшая школа, 1986. — 416 с.
24. Vol. 7, Issue 4, April 2018, Comparative Analysis of Cruise Control in Electric Vehicles with PI and Sliding Mode Control, Gopika Vighneswaran<sup>1</sup>, Keerti.S.Nair<sup>2</sup>
25. Теорія електропривода-1: Курс лекцій для студентів напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка", спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" денної форми навчання / Уклад. М.Я.Островерхов. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 274 с.
26. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. –96 с.
27. Попович М.Г., Теряев В.І., Кіселичник О.І., Бур'ян С.О. Особливості синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами. - *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44) частина 2. – с. 12-16
28. Автоматизація електромеханічних систем. курсовий проект. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи

автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса,  
С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2014 р. 43 с.