

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### «Розробка слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

Шифр КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Виконав студент 3 курсу група АТс-23-2



Підпис

Дмитро ТКАЧЕНКО

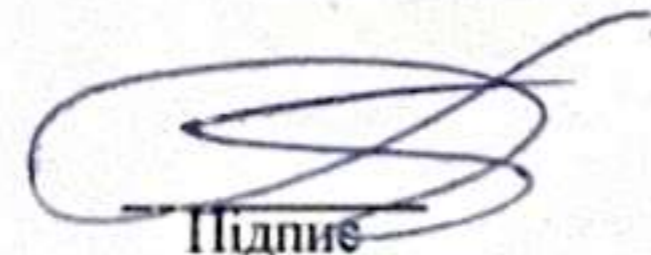
Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Олег МАКОВКІН

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ



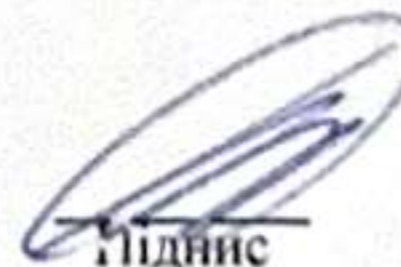
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ

9 06 2026

Дата




Підпис

Олександр ДИХА

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
15.06 Диха О.В.  
2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ткаченку Дмитру Романовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Розробка слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами**  
керівник роботи: Маковкін Олег Миколайович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Матеріали курсових проектів, виробничої практики, технічна документація електроприводів рульового керування, параметри синхронного двигуна та сервоконтролера AC-Servo-200, науково-технічна література.

4. Аналіз систем електропривода рульового керування

Аналіз конструкцій і режимів роботи електромеханічних підсилювачів керма, сучасних систем EPS та перспектив розвитку steer-by-wire технологій.

5. Дослідження електромеханічної системи

Дослідження математичних моделей синхронного двигуна з постійними магнітами, принципів векторного керування та процесів у системі електропривода.

6. Розробка системи електропривода

Розробка слідкуючого електропривода рульової рейки, синтез контурів керування, побудова імітаційної моделі та дослідження режимів роботи системи.

7. Виконання інженерних розрахунків

Розрахунок параметрів електродвигуна, динамічних характеристик, перехідних процесів та енергетичних показників електропривода.

8. Економічне обґрунтування проекту. Оцінка витрат на розробку, аналіз економічної ефективності та перспектив впровадження системи електропривода.

9. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.06 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З/П	НАЗВА РОЗДІЛУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	СТРОК ВИКОНАННЯ	ПРИМІТКА
1	Аналіз сучасних систем електропривода рульового керування та перспектив розвитку EPS	28.05.2026	вик
2	Дослідження математичних моделей синхронного двигуна з постійними магнітами та принципів векторного керування	08.06.2026	вик
3	Розробка слідкуючого електропривода рульової рейки, синтез контурів керування та моделювання системи	12.06.2026	вик
4	Виконання інженерних, енергетичних та економічних розрахунків, аналіз результатів моделювання, оформлення роботи та висновки	14.06.2026	вик
5	Захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026	

Студент



Дмитро ТКАЧЕНКО

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис  
  
Підпис

Олег МАКОВКІН

## РЕФЕРАТ

Студент групи АТс-23-2: Ткаченко Д.Р.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Розробка слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами» складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на понад 150 сторінках. У пояснювальній записці наведено рисунки, таблиці, структурні схеми, математичні моделі та результати імітаційного моделювання.

У роботі виконано аналіз сучасних систем електромеханічного підсилювача рульового керування, досліджено конструкції та режими роботи електроприводів рульової рейки, а також розглянуто перспективи розвитку систем EPS і steer-by-wire у сучасному автомобілебудуванні.

Проведено дослідження математичних моделей синхронного двигуна з постійними магнітами, виконано аналіз електромагнітних та механічних процесів у системі електропривода. Розглянуто принципи векторного керування та особливості побудови багатоконтурної системи автоматичного керування.

У роботі розроблено структуру слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу, виконано синтез контурів струму, швидкості та положення, побудовано імітаційні моделі системи електропривода для ручного та автономного режимів керування.

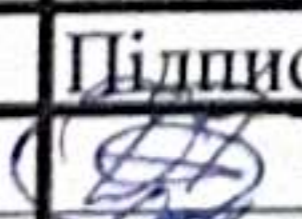



Виконано інженерні, енергетичні та економічні розрахунки, проведено аналіз перехідних процесів і оцінку динамічних характеристик системи. Окрему увагу приділено питанням практичної реалізації електропривода, розробленню випробувального стенда та перспективам впровадження результатів дослідження.

За результатами виконаної роботи встановлено, що застосування синхронного двигуна з постійними магнітами та векторного керування забезпечує високу точність, швидкодію та енергоефективність системи рульового керування транспортного засобу. Запропоновані технічні рішення мають перспективи використання у сучасних системах EPS, ADAS та автономного транспорту.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВОД, РУЛЬОВА РЕЙКА, EPS, PMSM, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, СЕРВОКОНТРОЛЕР, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ВСТУП .....	7
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	9
1.1 Підсилювачі рульового керування електромеханічного типу .....	9
1.2 Режими роботи електропривода рульової рейки .....	15
1.3 Компоновка електропривода рульового управління .....	18
1.4 Опис пристрою AC-Servo-200 .....	22
1.5 Опис та принцип роботи сервоконтролера AC-Servo-200 .....	25
1.6 Вибір закону керування електроприводом .....	30
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА .....	34
2.1 Паспортні дані та розрахунок основних параметрів двигуна .....	34
2.2 Математичний опис синхронного двигуна з постійними магнітами .....	36
2.3 Модель синхронної машини в нерухомій системі координат .....	41
2.4 Модель синхронної машини в обертовій системі координат .....	46
3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....	55
3.1 Імітаційна модель електропривода при ручному керуванні .....	55
3.2 Імітаційна модель електропривода для безпілотного керування .....	59
3.3 Аналіз перехідних процесів та оцінка якості регулювання .....	62
3.4 Результати імітаційного моделювання .....	65
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ..	75
5 ФІНАНСОВИЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ .....	85
5.1 Оцінка комерційного потенціалу та перспективності дослідження .....	85

<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Гкаченко		
Перевір.		Маковкін		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Розробка слідуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами				
		Літера	Аркуш	Аркушів
			4	107
ХНУ, АТс-23-2				

5.2 Планування науково-дослідних робіт .....	98
5.3 Бюджет витрат на проектування .....	99
5.4 Висновок по розділу .....	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	105
ДОДАТКИ .....	107

#### АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами.

У роботі проведено аналіз сучасних систем електромеханічного підсилювача рульового керування, досліджено конструкції та режими роботи електроприводів рульової рейки, а також розглянуто сучасні тенденції розвитку систем EPS та steer-by-wire.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

Виконано дослідження математичних моделей синхронного двигуна з постійними магнітами, розглянуто принципи векторного керування та особливості побудови багатоконтурної системи автоматичного керування електроприводом.

У роботі розроблено структуру слідкуючого електропривода рульової рейки, виконано синтез контурів струму, швидкості та положення, побудовано імітаційні моделі системи для ручного та автономного режимів керування. Проведено аналіз перехідних процесів та оцінено динамічні характеристики системи.

Окрему увагу приділено питанням практичної реалізації електропривода, розробленню випробувального стенда, а також перспективам використання результатів дослідження у сучасних транспортних засобах.

За результатами досліджень встановлено, що застосування синхронного двигуна з постійними магнітами та векторного керування забезпечує високу точність, швидкодію та енергоефективність системи рульового керування транспортного засобу.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВОД, РУЛЬОВА РЕЙКА, EPS, PMSM, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, СЕРВОКОНТРОЛЕР, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

## ВСТУП

Електропривод є енергосиловою системою, призначеною для приведення в рух машин і механізмів. До його складу, як правило, входять джерело енергії, електродвигун, передавальний механізм та система керування. Основною функцією електропривода є перетворення електричної енергії в механічну із заданими параметрами руху виконавчих органів.

Сучасні електроприводи характеризуються високою енергоефективністю, надійністю та широкими можливостями регулювання.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Завдяки цим властивостям вони набули широкого застосування в різних галузях техніки. Компактність конструкцій, зручність керування та доступність джерел електроенергії забезпечують їх використання як в основних, так і в допоміжних системах машин і механізмів.

В автомобілебудуванні електроприводи відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки, комфорту та точності керування транспортним засобом. Сучасні автомобілі оснащуються значною кількістю електромеханічних систем, які спрямовані на підвищення ефективності роботи агрегатів і зменшення навантаження на водія.

Однією з таких систем є електромеханічний сервопривід рульової рейки. Його застосування дозволяє підвищити точність керування, знизити енергоспоживання та забезпечити адаптивне регулювання характеристик рульового управління порівняно з традиційними гідромеханічними підсилювачами.

Незважаючи на активне впровадження електричних систем, значна частина транспортних засобів досі оснащена гідропідсилювачами керма. Це зумовлює актуальність розробки та вдосконалення слідкуючих електроприводів, які здатні забезпечити більш високі експлуатаційні та енергетичні показники.

Об'єктом дослідження є система слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу.

Предметом дослідження є синхронний двигун з постійними магнітами, що використовується як виконавчий елемент електропривода.

Метою роботи є розробка слідкуючого електропривода рульової рейки транспортного засобу, призначеного для перевезення пасажирів, із повною масою 2,5 т.

Для досягнення поставленої мети в роботі застосовано теоретичні методи дослідження, що базуються на використанні імітаційного моделювання. Це дозволяє дослідити динамічні характеристики системи,

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначити раціональні параметри електропривода та оцінити ефективність його функціонування.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оптимізації системи керування сервоконтролера, розробленого НППФ «Мехатроніка ПРО» на базі AC-Servo-200.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Підсилювачі рульового керування електромеханічного типу

Для зменшення зусилля, яке водій прикладає до рульового колеса, підвищення комфорту керування та покращення точності реакції транспортного засобу на керуючі дії застосовують підсилювачі рульового керування. На сучасному етапі розвитку автомобілебудування найбільшого поширення набули електромеханічні підсилювачі керма, оскільки вони

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

забезпечують ефективне поєднання енергоощадності, функціональності та інтеграції з електронними системами автомобіля.

Електромеханічний підсилювач керма, або EPS/ЕМПК (Electric Power Steering), створює додатковий керуючий момент за допомогою електричного привода, що працює за сигналами датчиків моменту, кута повороту керма, швидкості руху та інших параметрів. На відміну від гідравлічних систем, електромеханічний підсилювач не потребує гідронасоса, магістралей, робочої рідини та допоміжних гідравлічних елементів. Це спрощує конструкцію, зменшує втрати потужності та підвищує загальну експлуатаційну надійність системи.

Порівняно з гідропідсилювачем, електромеханічний підсилювач має низку суттєвих переваг. Насамперед це вища енергоефективність, оскільки електродвигун підсилювача працює лише за потреби, тобто під час повороту керма або коригування траєкторії руху. На відміну від гідросистеми, де насос постійно відбирає потужність від двигуна, EPS дає змогу зменшити енергетичні втрати та сприяє зниженню витрати палива або збільшенню запасу ходу електромобіля. Крім того, відсутність гідравлічних компонентів знижує ризик витоків, спрощує технічне обслуговування та покращує екологічні характеристики автомобіля.

Ще однією важливою перевагою електромеханічного підсилювача є можливість гнучкого програмного налаштування характеристик рульового керування. Завдяки цьому забезпечується зміна підсилення залежно від швидкості руху, режиму експлуатації, навантаження на вісь та дорожніх умов. У сучасних транспортних засобах одна й та сама система може реалізовувати різні режими керування — від комфортного до спортивного, що особливо важливо для автомобілів із розвиненими електронними системами стабілізації та допомоги водієві.

На сьогодні електромеханічний підсилювач керма розглядається не лише як засіб зменшення фізичного навантаження на водія, а і як одна з

									Арк.
									9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАТ 26 23074 000 ПЗ				

базових платформ для реалізації функцій ADAS та високоавтоматизованого руху. Саме EPS забезпечує технічну можливість виконання автоматичного утримання в смузї руху, корекції траєкторії, автоматичного паркування, компенсації бокового вітру, активного повернення керма та взаємодії з системами курсової стійкості. У сучасних рішеннях Bosch прямо вказує, що EPS є ключовою технологією для автоматизованого керування аж до високих рівнів автоматизації, а архітектура нових блоків керування доповнюється засобами захисту від відмов та кіберзагроз.

Важливим сучасним напрямом є перехід від класичних EPS-систем до steer-by-wire, у яких механічний зв'язок між рульовим колесом і керованими колесами може бути повністю відсутній. Такі системи вже перейшли від експериментальних рішень до серійного впровадження: зокрема, ZF у 2025 році повідомила про початок серійного виробництва steer-by-wire для NIO ET9, а Mercedes-Benz у 2026 році представила власне серійне застосування цієї технології в оновленому EQS. Це підтверджує, що рульові системи нового покоління дедалі більше переходять у площину програмно-керованої архітектури автомобіля.

Серед основних переваг електромеханічних підсилювачів рульового керування доцільно виділити:

- високу надійність завдяки відсутності гідравлічних контурів;
- менші енергетичні втрати порівняно з гідропідсилювачем;
- точніше дозування підсилювального моменту;
- простоту інтеграції з електронними системами стабілізації та допомоги водієві;
- можливість реалізації функцій автоматизованого керування;
- зниження рівня шуму та спрощення технічного обслуговування;
- кращу адаптацію до вимог електромобілів і гібридних транспортних засобів.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Разом із тим електромеханічні підсилювачі мають і певні обмеження. До них належать високі вимоги до точності калібрування системи керування, складність узгодження механічної та електронної частин, потреба в забезпеченні функціональної безпеки та відмовостійкості, а також жорсткі вимоги до електроживлення. Із розвитком автоматизованого керування ці вимоги ще більше посилюються, оскільки рульова система стає критично важливим елементом безпечного функціонування автомобіля. Для таких систем дедалі більшого значення набувають вимоги функціональної безпеки рівня ASIL D, а також відповідність регламентам UNECE R155 і R156, що стосуються кібербезпеки та оновлення програмного забезпечення транспортних засобів.

За компоновкою електромеханічні підсилювачі поділяють залежно від місця прикладання допоміжного моменту електродвигуна. У сучасній технічній літературі та промисловій практиці найчастіше виділяють:

1. column-assist EPS (C-EPS) — підсилювач із розміщенням електродвигуна на рульовій колонці;
2. single-pinion EPS (P-EPS) — підсилювач із дією на шестерню рульового механізму;
3. dual-pinion EPS (DP-EPS) — система з окремою шестернею електродвигуна;
4. rack-assist EPS (R-EPS) — підсилювач із прикладанням зусилля безпосередньо до рульової рейки.

Для малолітражних і середньорозмірних автомобілів часто застосовується колонковий варіант EPS, який відзначається компактністю та відносно невисокою вартістю. Водночас для важчих легкових автомобілів, кросоверів, електромобілів, легких комерційних транспортних засобів і машин із підвищеними вимогами до точності керування більш доцільними є системи із впливом на шестерню або безпосередньо на рейку. Саме rack-assist EPS нині розглядається як один із найперспективніших напрямів, оскільки він

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

забезпечує більший допоміжний момент, кращу динаміку відгуку та ефективнішу інтеграцію з функціями автоматизованого водіння.

У конструктивному відношенні рейкові електромеханічні підсилювачі можуть бути виконані за різними схемами. До найбільш поширених належать системи з двома шестернями та системи з паралельним приводом. У схемі з двома шестернями одна шестерня передає зусилля від рульового колеса, а інша — від електродвигуна, що забезпечує роздільне формування керуючого та підсилювального моментів. У системах з паралельним приводом електродвигун передає зусилля на рейку через окремий механічний контур, що дає змогу гнучко компоувати вузли та покращувати розподіл навантажень у рульовому механізмі.

Серед сучасних тенденцій розвитку електромеханічних підсилювачів керма слід окремо виділити:

- модульність і масштабованість конструкцій для різних платформ автомобілів;
- збільшення вихідного моменту підсилення для важчих транспортних засобів;
- інтеграцію з централізованими обчислювальними платформами автомобіля;
- використання 48-вольтових архітектур для steer-by-wire та високомоментних систем;
- підвищення відмовостійкості, кіберзахисту та функціональної безпеки;
- орієнтацію на програмно-керовані рульові системи у складі software-defined vehicle.

Отже, електромеханічні підсилювачі рульового керування є закономірним етапом еволюції рульових систем автомобіля. Вони не лише забезпечують зменшення зусилля на рульовому колесі, але й формують технологічну основу для реалізації інтелектуальних функцій активної безпеки,

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12





- датчик кута повороту рульового колеса;
- датчик крутного моменту на рульовому валу;
- виконавчий елемент:
- електродвигун підсилювача;
- електронний блок керування (ECU):
- здійснює обробку сигналів;
- формує керуючий вплив на електродвигун;
- додаткові джерела інформації:
- датчик швидкості автомобіля (ABS/ESP);
- датчик частоти обертання колінчастого вала двигуна.

Застосування паралельного приводу дозволяє розвантажити рульовий механізм, підвищити ресурс елементів та забезпечити кращу адаптацію до сучасних систем активної безпеки.

## 1.2 Режими роботи електропривода рульової рейки

Електропривод рульової рейки забезпечує функціонування системи керування транспортним засобом у різних режимах експлуатації, що визначаються швидкістю руху, дорожніми умовами та діями водія.

До основних режимів роботи належать:

- поворот автомобіля в нормальних умовах;
- поворот на малій швидкості (маневрування, паркування);
- поворот на високій швидкості;
- активне повернення керованих коліс у нейтральне положення;
- утримання прямолінійного руху (стабілізація положення коліс).

## Принцип роботи системи

Під час обертання рульового колеса крутний момент передається через торсіон на рульовий механізм. Деформація торсіона реєструється датчиком крутного моменту, а положення керма — датчиком кута повороту.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Сигнали від датчиків разом із додатковими параметрами (швидкість руху, оберти двигуна тощо) надходять до електронного блоку керування.

Блок керування визначає необхідний рівень підсилення та формує керуючий сигнал для електродвигуна. Регулювання здійснюється шляхом зміни сили струму, що дозволяє змінювати величину електромагнітного моменту двигуна.

Далі крутний момент передається через механізм приводу на рульову рейку, а від неї — через рульові тяги на керовані колеса.

Таким чином, поворот коліс відбувається за рахунок сумарної дії:

- зусилля водія;
- допоміжного моменту електропривода.

#### Характеристика режимів роботи

##### ◆ Поворот на малій швидкості

Характерний для режимів паркування.

Система забезпечує:

- максимальний підсилювальний момент;
- мінімальне зусилля на кермі («легке кермо»).

##### ◆ Поворот на високій швидкості

Для підвищення стабільності:

- підсилення зменшується;
- зростає «відчуття дороги» («важке кермо»).

##### ◆ Активне повернення керма

Система створює додатковий момент, який:

- сприяє поверненню керма у нульове положення;
- покращує керованість автомобіля.

##### ◆ Утримання прямолінійного руху

Система компенсує:

- боковий вітер;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- нерівномірний тиск у шинах;
- конструктивні особливості трансмісії.

#### ◆ Компенсація тягового уводу

Особливо актуально для передньопривідних автомобілів, де:

- різна довжина приводних валів викликає відхилення;
- EPS автоматично коригує траєкторію руху.

#### Інтеграція з системами безпеки

Електропідсилювач керма активно використовується у складі:

- системи курсової стійкості (ESP);
- систем утримання смуги руху (LKA);
- автоматичного паркування;
- систем автономного керування.

У таких випадках електропривод може працювати без участі водія, формуючи керуючий вплив на колеса.

#### Особливості для безпілотного транспорту

У системах автономного керування:

- відсутнє зусилля від водія;
- весь момент створюється електродвигуном.

Це зумовлює необхідність:

- підвищення номінального моменту двигуна;
- забезпечення високого перевантажувального режиму;
- підвищення надійності та відмовостійкості.

#### Найбільш навантажений режим

Найважчим режимом роботи електропривода є:

поворот коліс на місці (статичний режим) при сухому асфальтобетонному покритті.

У цьому випадку:

- коефіцієнт зчеплення максимальний;
- опір повороту коліс найбільший;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- формується максимальний статичний момент навантаження.

Саме цей режим приймається як розрахунковий при проектуванні електропривода.

### 1.3 Компоновка електропривода рульового управління

На сучасних легкових автомобілях європейського сегмента, зокрема Renault Logan, Renault Megane, Peugeot 301 та Peugeot 308, широко застосовується електропривод електропідсилювача рульового управління з так званою прямою (коаксіальною) схемою приводу.

Особливістю даної компоновки є те, що вал електродвигуна інтегрується безпосередньо у рульовий вал, утворюючи єдину кінематичну систему. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість проміжних механічних елементів і забезпечити безпосередню передачу крутного моменту.

З позиції інженерного аналізу, дана схема має подвійний ефект. З одного боку, виникає необхідність застосування електродвигуна з підвищеними характеристиками точності позиціонування та моменту, оскільки будь-яка похибка безпосередньо впливає на керування автомобіля. З іншого боку, відсутність редукторів, ремінних передач та гвинтових механізмів забезпечує:

- зниження механічних втрат;
- підвищення ККД системи;
- спрощення конструкції та технології виготовлення;
- підвищення експлуатаційної надійності.

У сучасних умовах така компоновка є оптимальною для масового виробництва, оскільки поєднує у собі економічність, компактність та достатній рівень функціональності. З урахуванням цього, для подальшого дослідження слідкуючого електропривода рульового управління доцільно прийняти саме цю схему як базову.

Експериментальні та аналітичні дослідження виконуються на основі електромеханічного підсилювача рульового управління, реалізованого за

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Таблиця 1.1 – Основні параметри синхронного двигуна з постійними магнітами

Параметр	Значення
Номінальна потужність, Вт	530
Фазна напруга живлення, В	14,5
Активний опір обмоток, Ом	0,5
ККД, %	76
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,93
Маса, кг	5,6
Число пар полюсів	8
Частота живлення, Гц	66,67
Номінальна частота обертання, об/хв	500

Функціонування електродвигуна забезпечується за допомогою перетворювача частоти, інтегрованого в електронний блок керування підсилювача рульового управління. Живлення здійснюється від бортової мережі автомобіля напругою 12 або 24 В.

Застосування сучасних силових перетворювачів дозволяє:

- реалізувати плавне регулювання швидкості обертання;
- формувати необхідний момент у реальному часі;
- забезпечити адаптацію системи до змінних умов експлуатації;
- підвищити енергоефективність та зменшити теплові навантаження.

Таким чином, використання прямої компоновки електропривода у поєднанні з синхронним двигуном з постійними магнітами та сучасними алгоритмами керування забезпечує високий рівень точності, надійності та

ефективності функціонування системи рульового управління транспортного засобу.



Рисунок 1.4 – Електропривод електропідсилювача рульового управління (структурна компоновка)

- 1 – рульове колесо;
- 2 – синхронний електродвигун з постійними магнітами;
- 3 – механізм рульової рейки.

На рисунку 1.4 представлено загальну компоновку електропривода електропідсилювача рульового управління, реалізованого за коаксіальною схемою. Конструкція включає рульове колесо, електромеханічний привід та виконавчий механізм у вигляді рульової рейки.

Електродвигун (поз. 2), інтегрований у рульову колонку, забезпечує формування додаткового крутного моменту, який передається безпосередньо на рульовий вал. Така схема дозволяє реалізувати високоточне керування положенням керованих коліс без застосування проміжних механічних передач.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Рульова рейка (поз. 3) виконує функцію перетворення обертального руху рульового вала у поступальний рух тяг, що забезпечує зміну кута повороту коліс транспортного засобу.

Використання синхронного електродвигуна з постійними магнітами забезпечує:

- високу швидкодію системи;
- точне відпрацювання керуючих сигналів;
- стабільність моменту при змінних режимах навантаження.

Загалом представлена компоновка відповідає сучасним тенденціям розвитку систем електропідсилювачів рульового управління (EPS) та забезпечує підвищення енергоефективності, надійності і комфорту керування транспортним засобом.

#### 1.4 Опис пристрою «АС-Servo-200»

Сервоконтролер типу АС-Servo-200 призначений для керування електроприводами серводвигунів різних типів у складі мехатронних систем, зокрема електропідсилювачів рульового управління. Пристрій забезпечує формування керуючих сигналів, обробку даних зворотного зв'язку та реалізацію алгоритмів високоточного позиціонування.

Контролер розроблений умовним українським підприємством ТОВ «Інтелект-Електропривід» та орієнтований на застосування у транспортних і промислових системах автоматизованого керування.

Підключення датчиків зворотного зв'язку

До сервоконтролера передбачено підключення таких типів датчиків:

1. Інкрементальний енкодер – використовується для визначення швидкості обертання та відносного положення вала електродвигуна або виконавчого механізму;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Рисунок 1.5 – Функціональна схема процесорної плати сервоконтролера

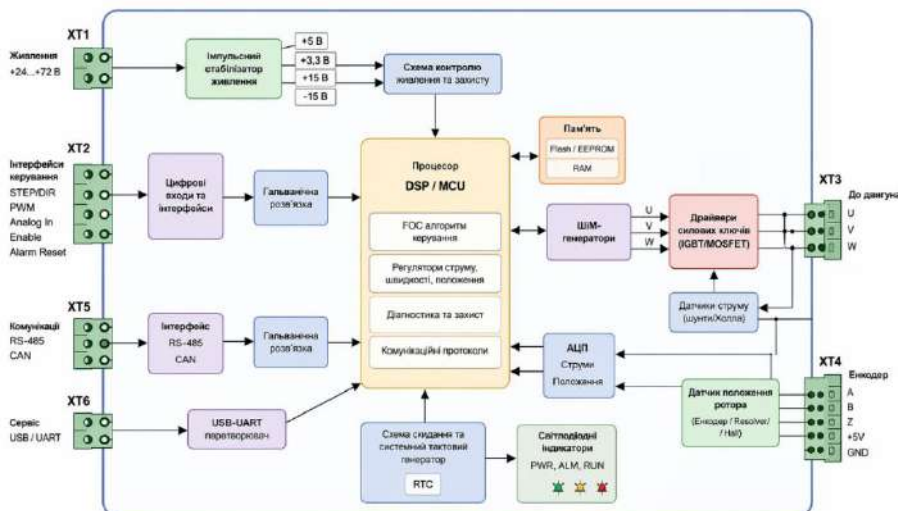


Рисунок 1.5 – Функціональна схема процесорної плати сервоконтролера  
 Сервоконтролер AC-Servo-200 являє собою високотехнологічний електронний пристрій, призначений для керування та захисту трифазного синхронного електродвигуна у складі замкнених електроприводів.

Живлення контролера здійснюється через роз’єм XT1, на який подається постійна напруга у діапазоні, що визначається виконанням пристрою. До роз’єму XT2 підключається електродвигун, керування яким реалізується за допомогою силового інвертора.

### Режими гальмування та утилізація енергії

При роботі електропривода у режимі динамічного гальмування виникає зворотна електрорушійна сила, внаслідок чого генерується електрична енергія. У сервоконтролері передбачено декілька способів її утилізації:

- Акумуляція енергії – передача енергії у бортову мережу або акумуляторну батарею, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи;
- Вбудований гальмівний резистор – застосовується при короткочасних та нерегулярних режимах гальмування;

- Зовнішній гальмівний резистор – використовується при інтенсивних або тривалих режимах гальмування, що потребують ефективного розсіювання енергії.

Такий підхід відповідає сучасним концепціям енергоменеджменту в електромеханічних системах.

### Силовая часть сервоконтролера

Функціональна схема силової плати наведена на рисунку 5.

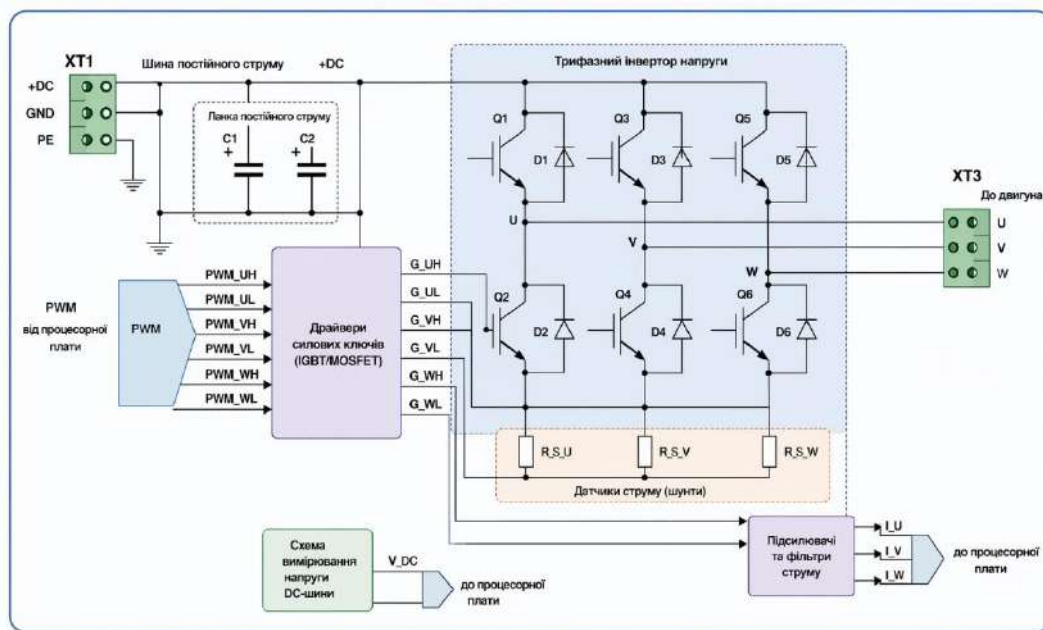


Рисунок 1.6 – Функціональна схема силової плати сервоконтролера

Силовая часть контролера реалізована у вигляді трифазного інвертора напруги, що побудований на шести силових транзисторних ключах (IGBT або MOSFET) із зворотними діодами.

Інвертор формує трифазну систему напруги для живлення електродвигуна шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Керуючі сигнали подаються на транзисторні ключі синхронно відповідно до алгоритму керування (FOC або аналогічного).

Основні функції силової частини:

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>				

- перетворення постійної напруги у трифазну змінну;
- регулювання амплітуди та частоти напруги;
- формування електромагнітного моменту двигуна.

### Принцип роботи системи

Робота сервоконтролера базується на замкненій системі керування, яка включає:

- зчитування сигналів з датчиків (енкодерів, датчиків Холла);
- обробку інформації мікропроцесором;
- формування керуючих впливів на силовий інвертор;
- регулювання струму, швидкості та положення.

Це дозволяє реалізувати високоточне керування електроприводом у реальному часі.

### Зовнішній вигляд та інтерфейси

Зовнішній вигляд сервоконтролера з розташуванням роз'ємів представлено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Розташування роз'ємів сервоконтролера

Таблиця 1.3 – Призначення виводів роз'ємів сервоконтролера

Роз'єм XT1 – живлення

Контакт	Призначення
1	+U живлення
2	-U живлення

Роз'єм XT2 – електродвигун

Контакт	Призначення
1	Фаза U
2	Фаза V
3	Фаза W

Роз'єм XT3 – допоміжні ланцюги

Контакт	Призначення
1	+VDC
2	OUT
3	GND

Роз'єм XT4 – дискретні входи (ізольовані)

Контакт	Призначення
1-4	DI1-DI4
5	COM1
6	+U1
7	резерв

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

28

Роз'єм XT5 – дискретні виходи

Контакт	Призначення
1–4	DOUT1–DOUT4
5	COM2

Роз'єм XT6 – енкодер SSI

Контакт	Призначення
1	+5 В
2	Clock+
3	Clock–
4	Data+
5	Data–
6	GND

Роз'єм XT7 – інтерфейс RS-485

Контакт	Призначення
1	A (Data +)
2	B (Data –)
3	COM
4	TR

Роз'єм XT8 – дискретні входи (неізолювані)

Контакт	Призначення
1–4	DI5–DI8
5	GND

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

29

## Роз'єм XT9 – аналогові входи

Контакт	Призначення
1	AIN1+
2	AIN1-
3	AIN2+
4	AIN2-
5	+5 В

### 1.6 Вибір закону керування електроприводом

Для забезпечення високоточного та динамічного керування електроприводом у системі електропідсилювача рульового управління доцільно застосовувати векторне керування (Field Oriented Control, FOC).

Векторне керування є сучасним методом керування безщітковими електродвигунами змінного струму (PMSM, BLDC), який дозволяє здійснювати незалежне регулювання електромагнітного моменту та швидкості обертання ротора. Основною особливістю методу є керування не лише амплітудою та частотою напруги, а й фазовими співвідношеннями струмів, тобто просторовим вектором струму статора.

#### Фізична суть методу

Ідея векторного керування полягає у представленні трифазної системи струмів у вигляді просторового вектора та його подальшому перетворенні у систему координат, пов'язану з ротором (d-q координати).

У такій системі:

- вісь d співпадає з напрямком магнітного поля ротора;
- вісь q є перпендикулярною до неї та відповідає за формування моменту.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

30

Оптимальний режим роботи досягається тоді, коли вектор струму статора ортогональний (перпендикулярний) до вектора магнітного поля ротора, тобто кут між ними становить  $90^\circ$ .

#### Математичне обґрунтування

Електромагнітний момент синхронного двигуна з постійними магнітами визначається через взаємодію магнітного потоку ротора та q-складової струму статора. Для такого типу електричної машини момент може бути поданий у вигляді:

$$M = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad 1.1$$

де:

$p$  — кількість пар полюсів електродвигуна;

$\psi_f$  — магнітний потік, створений постійними магнітами ротора;

$i_q$  — квадратурна складова струму статора, що безпосередньо бере участь у формуванні електромагнітного моменту.

Із наведеної залежності випливає, що за сталого магнітного потоку ротора величина моменту прямо пропорційна значенню струму  $i_q$ . Саме тому в системах векторного керування регулювання q-складової струму є основним способом керування моментом двигуна. Збільшення  $i_q$  приводить до відповідного зростання розвиваного електромагнітного моменту, що забезпечує необхідні динамічні характеристики електропривода.

Ще більш академічно це можна подати так:

#### Математичне обґрунтування

Для синхронного двигуна з постійними магнітами електромагнітний момент у системі координат  $d_q$  описується аналітичною залежністю

$$M = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad 1.2$$

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

де  $p$  — число пар полюсів;  $\psi_f$  — потокозчеплення, зумовлене магнітним полем постійних магнітів ротора;  $i_q$  —  $q$ -компонента струму статора, відповідальна за створення обертового моменту.

Наведений вираз свідчить, що в умовах незмінного магнітного потоку ротора електромагнітний момент є лінійно залежним від квадратурної складової струму. Така особливість є теоретичною основою побудови систем векторного керування, у яких момент двигуна формується шляхом цілеспрямованого регулювання величини  $i_q$ .

На рисунку 1.8 наведено кутову характеристику синхронної машини.



Рисунок 1.8 – Кутова характеристика синхронного електродвигуна

З аналізу кутової характеристики випливає, що максимальний електромагнітний момент досягається при куті між вектором струму та магнітним полем ротора, близькому до  $90^\circ$ .

Таким чином, ефективна стратегія керування полягає не у “наздоганянні” ротором заданого вектора струму, а у формуванні такого вектора струму, який завжди орієнтований перпендикулярно до магнітного поля ротора, незалежно від його положення.

### Принцип векторного керування

Суть методу можна сформулювати наступним чином:

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

- вектор струму статора “прив’язується” до ротора;
- підтримується постійний кут  $90^\circ$  між струмом і магнітним полем;
- регулювання моменту здійснюється зміною амплітуди струму.

Це забезпечує:

- максимальний момент при мінімальних втратах;
- високу енергоефективність;
- стабільність роботи при змінному навантаженні.

#### Переваги векторного керування

- висока точність регулювання швидкості та положення;
- плавний пуск і стабільна робота у всьому діапазоні частот;
- швидка реакція на зміну навантаження;
- широкий діапазон регулювання;
- зменшення теплових втрат і підвищення ККД;
- можливість реалізації складних алгоритмів керування.

#### Недоліки

- необхідність точного задання параметрів двигуна;
- підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів;
- складність реалізації алгоритмів керування;
- чутливість до похибок вимірювання сигналів.

#### Висновок

Застосування векторного керування у системі електропривода рульового управління дозволяє забезпечити оптимальне співвідношення між точністю, швидкодією та енергоефективністю. Це робить його найбільш доцільним вибором для реалізації слідкуючих електроприводів сучасних транспортних засобів

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 2.1 Паспортні дані та розрахунок основних параметрів двигуна

На основі паспортних характеристик обраного синхронного електродвигуна з постійними магнітами виконаємо розрахунок його основних електромеханічних параметрів, необхідних для подальшого математичного моделювання та синтезу системи керування.

Синхронна кутова швидкість обертання електродвигуна визначається через частоту обертання ротора та може бути розрахована за виразом:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 500}{30} = 52,33 \text{ рад/с}$$

де:

$n_n$  — номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв;

$\omega_n$  — синхронна кутова швидкість, рад/с.

Отримане значення свідчить, що при частоті обертання 500 об/хв кутова швидкість ротора становить 52,33 рад/с.

Номінальний електромагнітний момент двигуна визначається як відношення корисної потужності на валу до кутової швидкості обертання ротора. Розрахунок виконується за формулою:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{530}{52,33} = 10,13 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де:

$P_n$  — номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$\omega_n$  — номінальна кутова швидкість обертання, рад/с;

$M_n$  — номінальний електромагнітний момент, Н·м.

Отриманий результат показує, що за потужності 530 Вт та кутової швидкості 52,33 рад/с двигун здатний розвивати момент 10,13 Н·м на валу.

Максимальне значення моменту електродвигуна визначається з урахуванням допустимої перевантажувальної здатності привода. Для цього номінальний момент множиться на коефіцієнт перевантаження:

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$M_{\max} = k_{\text{пер}} M_n = 3 \cdot 10,13 = 30,39 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де:

$k_{\text{пер}}$  — коефіцієнт перевантажувальної здатності;

$M_n$  — номінальний момент електродвигуна;

$M_{\max}$  — максимальний момент, який може бути короткочасно реалізований приводом.

Таким чином, за коефіцієнта перевантаження 3 максимальний момент становить 30,39 Н·м, що забезпечує необхідний запас для роботи привода в режимах пікових навантажень.

Орієнтовне значення індуктивності статорної обмотки може бути визначене через номінальну напругу, струм, число пар полюсів та кутову швидкість ротора. Для оцінювання використовується співвідношення:

$$L_s = 0,3 \cdot \frac{U_n}{I_n \cdot p \cdot \omega_n} = 0,3 \cdot \frac{14,5}{20 \cdot 8 \cdot 52,33} = 0,00052 \text{ Гн}$$

де:

$U_n$  — номінальна напруга електродвигуна, В;

$I_n$  — номінальний струм, А;

$p$  — число пар полюсів;

$\omega_n$  — кутова швидкість ротора, рад/с;

$L_s$  — індуктивність статорної обмотки, Гн.

Отримане значення (0,00052) Гн відповідає індуктивності приблизно 0,52 мГн, що є характерним для компактних високодинамічних синхронних двигунів з постійними магнітами.

Максимальне значення струму двигуна визначається з урахуванням допустимого коефіцієнта перевантаження. Для цього номінальний струм множиться на коефіцієнт перевантажувальної здатності:

$$I_{\max} = k_{\text{пер}} I_n = 3 \cdot 20 = 60 \text{ А}$$

де:

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$k_{пер}$  — коефіцієнт перевантаження;

$I_n$  — номінальний струм електродвигуна;

$I_{max}$  — максимальний струм, який може короткочасно протікати через обмотки двигуна.

Таким чином, за коефіцієнта перевантаження 3 граничний струм електродвигуна становить 60 А, що необхідно враховувати при виборі силових ключів, драйверів та елементів захисту сервоконтролера.

Для синхронного двигуна з постійними магнітами у першому наближенні можна прийняти, що перевантаження за струмом пропорційно визначає перевантаження за потужністю. Максимальна потужність електродвигуна може бути оцінена пропорційно збільшенню струму відносно номінального режиму роботи. У цьому випадку припускається, що зростання струму супроводжується відповідним збільшенням розвиваної потужності:

$$P_{max} = P_n \cdot \frac{I_{max}}{I_n} = 530 \cdot \frac{60}{20} = 1590 \text{ Вт} = 1,59 \text{ кВт}$$

де:

$P_n$  — номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$I_n$  — номінальний струм;

$I_{max}$  — максимально допустимий струм у режимі перевантаження;

$P_{max}$  — гранична потужність, яку двигун може короткочасно розвивати.

Отримане значення свідчить, що у форсованому режимі електропривод здатний забезпечити потужність до 1,59 кВт. Надалі ці параметри використовуються під час формування математичної моделі сервопривода, аналізу перехідних процесів та оцінювання динамічних характеристик системи керування.

## 2.2 Математичний опис синхронного двигуна з постійними магнітами

У сучасних слідкуючих системах електропривода широкого застосування набули синхронні двигуни з постійними магнітами, в яких

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

керування струмами статорних обмоток здійснюється залежно від кутового положення ротора, що визначається датчиком положення. Такий підхід забезпечує реалізацію векторного керування та дозволяє незалежно регулювати магнітний потік і електромагнітний момент.

Для побудови математичної моделі розглянемо фізичну модель синхронної машини з постійними магнітами, наведену на рисунку 2.1.

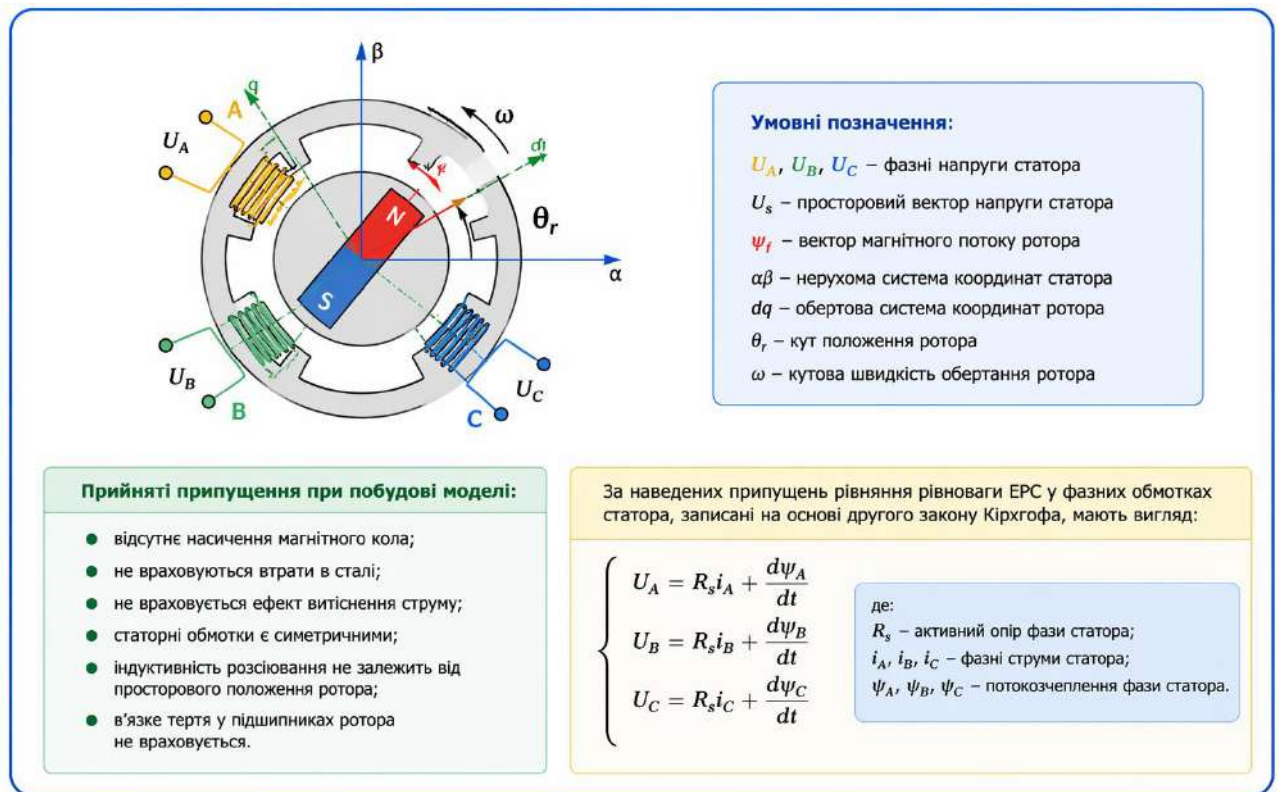


Рисунок 2.1 – Фізична модель синхронної машини з постійними магнітами

У даній моделі використовуються:

- $(U_A, U_B, U_C)$  — фазні напруги статора;
- $(U_s)$  — просторовий вектор напруги;
- $(\psi_f)$  — вектор магнітного потоку ротора, створений постійними магнітами;
- $(\alpha\beta)$  — нерухома система координат;

- (dq) — обертова система координат, жорстко зв'язана з ротором.

При побудові математичної моделі приймаються такі припущення:

- відсутнє насичення магнітного кола;
- не враховуються втрати в сталі;
- не враховується ефект витіснення струму;
- статорні обмотки є симетричними;
- індуктивність розсіювання не залежить від просторового положення ротора;
- в'язке тертя у підшипниках ротора не враховується.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння рівноваги ЕРС у фазних обмотках статора, записані на основі другого закону Кірхгофа, мають вигляд:

Рівняння рівноваги напруг у фазних обмотках статора, записані відповідно до другого закону Кірхгофа, можуть бути подані у вигляді системи:

$$\begin{cases} U_A = R_s i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ U_B = R_s i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ U_C = R_s i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad 2.1$$

де:

$U_A, U_B, U_C$  — фазні напруги статора;

$R_s$  — активний опір фази статора;

$i_A, i_B, i_C$  — фазні струми;

$\psi_A, \psi_B, \psi_C$  — потокозчеплення відповідних фаз.

Наведена система описує взаємозв'язок між прикладеною напругою, активним падінням напруги на опорі обмоток та зміною потокозчеплення у кожній фазі статора.

Для синхронної машини з постійними магнітами потокозчеплення фазних обмоток визначаються сумою складової, зумовленої струмом статора, та складової, що створюється магнітним полем ротора. У розгорнутому вигляді ці співвідношення можна записати так:

$$\begin{cases} \psi_A = L_s i_A + \psi_f \cos \omega t, \\ \psi_B = L_s i_B + \psi_f \cos(\omega t - 120^\circ), \\ \psi_C = L_s i_C + \psi_f \cos(\omega t + 120^\circ). \end{cases} \quad 2.2$$

де:

$L_s$  — індуктивність фази статора;

$i_A, i_B, i_C$  — миттєві значення фазних струмів;

$\psi_f$  — амплітуда потокозчеплення, створеного постійними магнітами ротора;

$\omega$  — кутова швидкість обертання ротора;

$t$  — час.

Із наведених рівнянь видно, що потокозчеплення кожної фази формується двома складовими: електромагнітною реакцією обмотки статора та періодичною дією магнітного поля ротора. Зсув фаз на  $120^\circ$  відображає просторову симетрію трифазної системи, що є характерною ознакою синхронної машини з постійними магнітами.

Після переходу від фазних координат до просторового представлення електромагнітних величин рівняння статора можуть бути записані у більш компактній векторній формі.

Рівняння напруги статора має вигляд:

$$U_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad 2.3$$

Водночас рівняння потокозчеплення просторового вектора статора записується як:

$$\psi_s = L_s i_s + \psi_f e^{j\omega t} \quad 2.4$$

де:

$U_s$  — просторовий вектор напруги статора;

$i_s$  — просторовий вектор струму статора;

$\psi_s$  — просторовий вектор потокозчеплення статора;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$R_s$  — активний опір статорної обмотки;

$L_s$  — індуктивність статора;

$\psi_f$  — потокозчеплення, створене постійними магнітами ротора.

Подання рівнянь у векторному вигляді істотно спрощує математичний опис електромеханічних процесів у двигуні та створює основу для подальшого переходу до координатної системи  $dq$ , яка широко застосовується в алгоритмах векторного керування.

Електромагнітний момент синхронного двигуна визначається взаємодією просторового вектора потокозчеплення та вектора струму статора. У загальному вигляді це співвідношення записується так:

$$M = \frac{3}{2}p(\psi_s \times i_s) \quad 2.5$$

де:

$M$  — електромагнітний момент двигуна;

$p$  — число пар полюсів;

$\psi_s$  — просторовий вектор потокозчеплення статора;

$i_s$  — просторовий вектор струму статора.

Векторний добуток ( $\psi_s$ ) характеризує взаємне розташування векторів потокозчеплення та струму. Максимальний момент формується у випадку, коли ці вектори є взаємно перпендикулярними, що відповідає принципам векторного керування синхронною машиною з постійними магнітами.

Динаміка електропривода описується рівнянням руху, яке встановлює залежність між моментом, що розвивається двигуном, моментом навантаження та зміною кутової швидкості ротора:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad 2.6$$

де:

$J$  — приведений момент інерції електромеханічної системи;

$\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора;

$M$  — електромагнітний момент, створюваний двигуном;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$M_c$  — момент опору навантаження.

Наведене рівняння показує, що прискорення ротора визначається різницею між рушійним моментом двигуна та моментом зовнішнього навантаження. Якщо  $M > M_c$ , ротор прискорюється, а у випадку  $M < M_c$  — сповільнюється.

Залежність між електричною та механічною кутовими швидкостями визначається числом пар полюсів двигуна:

$$\omega = p \omega_m \quad 2.7$$

де:

$\omega$  — електрична кутова швидкість;

$\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора;

$p$  — число пар полюсів.

Таким чином, електрична швидкість змінюється пропорційно механічній швидкості ротора та кількості пар полюсів машини.

### 2.3 Модель синхронної машини в нерухомій системі координат

Таким чином, узагальнений математичний опис синхронної машини з постійними магнітами у векторній формі може бути представлений системою рівнянь, що охоплює електричну та механічну підсистеми привода.

Рівняння напруги статора записується у вигляді:

$$U_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + j\omega \Psi_s \quad 2.8$$

Електромагнітний момент двигуна визначається співвідношенням:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_s \times i_s) \quad 2.9$$

Механічна частина електропривода описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad 2.10$$

де:

$U_s$  — просторовий вектор напруги статора;

$i_s$  — просторовий вектор струму статора;  
 $R_s$  — активний опір фазних обмоток;  
 $L_s$  — індуктивність статора;  
 $\psi_s$  — просторовий вектор потокозчеплення;  
 $p$  — число пар полюсів машини;  
 $M$  — електромагнітний момент двигуна;  
 $M_c$  — момент зовнішнього навантаження;  
 $J$  — приведений момент інерції електромеханічної системи;  $\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора.

Наведена система рівнянь є основою для побудови математичної моделі синхронного електродвигуна з постійними магнітами, проведення комп'ютерного моделювання та подальшого синтезу системи автоматичного керування електроприводом.

Для подальшого дослідження електромагнітних процесів доцільно подати вихідну векторну модель у проєкціях на осі нерухомої системи координат ( $\alpha/\beta$ ). Такий запис дає змогу перейти від узагальненого векторного подання до системи скалярних рівнянь, зручної для аналітичного розгляду та комп'ютерного моделювання.

У проєкціях на осі  $\alpha$  та  $\beta$  рівняння напруги статора можуть бути записані так:

$$\begin{aligned}
 U_\alpha &= R_s i_\alpha + L_s \frac{di_\alpha}{dt} - \omega \Psi_\beta \\
 U_\beta &= R_s i_\beta + L_s \frac{di_\beta}{dt} + \omega \Psi_\alpha
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Електромагнітний момент у цій системі координат визначається виразом:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha)
 \tag{2.12}$$

Механічна рівновага електропривода, як і раніше, описується рівнянням:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad 2.13$$

де:

$U_\alpha, U_\beta$  — проєкції вектора напруги статора на осі нерухомої системи координат;

$i_\alpha, i_\beta$  — складові вектора струму статора;

$\psi_\alpha, \psi_\beta$  — складові вектора потокозчеплення;

$R_s$  — активний опір статорної обмотки;

$L_s$  — індуктивність статора;

$\omega$  — електрична кутова швидкість;

$p$  — число пар полюсів;

$M$  — електромагнітний момент двигуна;

$M_c$  — момент навантаження;

$J$  — приведений момент інерції;

$\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора.

Такий запис моделі дає можливість більш детально простежити взаємозв'язок між електричними змінними та процесом формування моменту, а також слугує проміжною ланкою для подальшого переходу до обертової системи координат  $dq$ , яка широко використовується у сучасних алгоритмах векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

У нерухомій системі координат  $(\alpha\beta)$  потокозчеплення визначаються сумарною дією струмів статора та магнітного поля ротора. У цьому випадку проєкції вектора потокозчеплення на відповідні осі можуть бути представлені такими залежностями:

$$\begin{aligned} \Psi_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + \Psi_0 \cos(\omega t) \\ \Psi_\beta &= L_\beta i_\beta + \Psi_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad 2.14$$

де:

$L_\alpha$  та  $L_\beta$  — індуктивності статорних обмоток уздовж осей  $\alpha$  та  $\beta$ ;

$i_\alpha, i_\beta$  — складові струму статора;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$\psi_0$  — магнітний потік ротора, створений постійними магнітами;

$\omega$  — електрична кутова швидкість;

$t$  — поточний час.

Наведені залежності показують, що потокозчеплення у нерухомій системі координат змінюються гармонічно внаслідок обертання ротора. При цьому магнітний потік, створений постійними магнітами, проєктується на осі  $\alpha$  та  $\beta$  через функції косинуса та синуса, що відповідає круговому обертанню вектора потокозчеплення у просторі.

Для неявнополусної синхронної машини з постійними магнітами індуктивності за осями  $\alpha$  та  $\beta$  вважаються однаковими, що дає змогу спростити математичний опис електромагнітних процесів. У такому разі приймається співвідношення:

$$L_\alpha = L_\beta = L_s \quad 2.15$$

Оскільки ротор оснащений постійними магнітами, його магнітний потік у межах прийнятої моделі розглядається як сталий параметр, тобто:

$$\Psi_0 = \text{const}, \quad \frac{d\Psi_0}{dt} = 0 \quad 2.16$$

За таких умов система рівнянь у нерухомій системі координат може бути подана у розгорнутій формі.

Для осі  $\alpha$  рівняння напруги набуває вигляду:

$$U_\alpha = R_s i_\alpha + L_s \frac{di_\alpha}{dt} - \omega \Psi_0 \sin(\omega t) \quad 2.17$$

Для осі  $\beta$  аналогічне рівняння записується так:

$$U_\beta = R_s i_\beta + L_s \frac{di_\beta}{dt} + \omega \Psi_0 \cos(\omega t) \quad 2.18$$

Електромагнітний момент двигуна в цій системі координат визначається співвідношенням:

$$M = \frac{3}{2} p [(L_s i_\alpha + \Psi_0 \cos(\omega t)) i_\beta - (L_s i_\beta + \Psi_0 \sin(\omega t)) i_\alpha] \quad 2.19$$

Механічна частина моделі, як і раніше, описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad 2.20$$

де:

$L_s$  — індуктивність статорної обмотки;

$\psi$  — сталий магнітний потік ротора;

$R_s$  — активний опір статора;

$i_\alpha, i_\beta$  — складові струму статора в нерухомій системі координат;

$U_\alpha, U_\beta$  — проєкції напруги статора;

$M$  — електромагнітний момент;

$M_c$  — момент навантаження;

$J$  — зведений момент інерції;

$\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора.

Таким чином, після врахування сталості магнітного потоку ротора та рівності індуктивностей за осями  $\alpha$  і  $\beta$ , математичний опис стає більш придатним для подальшого аналізу динаміки привода, чисельного моделювання та переходу до системи координат  $dq$ , у якій зазвичай реалізуються алгоритми векторного керування.

Наведена система рівнянь є основою для побудови математичної та структурної моделі синхронного двигуна у нерухомій системі координат. Такий підхід дозволяє досліджувати динаміку електромеханічного перетворення енергії, аналізувати вплив параметрів машини на її робочі характеристики та формувати базу для подальшого переходу до обертової системи координат  $dq$ , яка є більш зручною для реалізації векторного керування.

Структурна схема, що відповідає системі рівнянь, наведена на рисунку 2.2.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

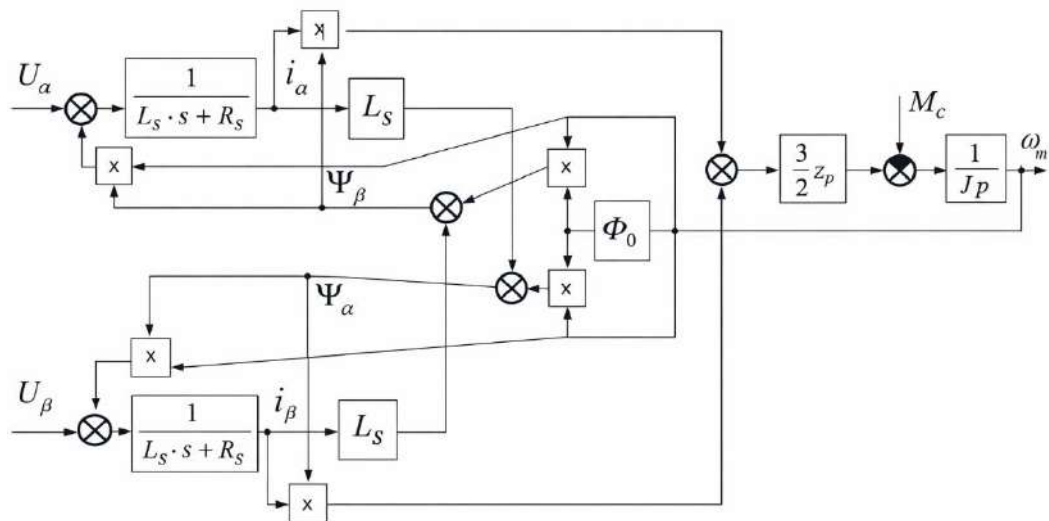


Рисунок 2.2 – Структурна схема синхронного двигуна в нерухомій системі координат

#### 2.4 Модель синхронної машини в обертовій системі координат

Для спрощення аналізу динамічних процесів у синхронному електродвигуні з постійними магнітами вводиться обертова система координат  $dq$ , жорстко пов'язана з ротором.

Перехід від нерухомої системи координат  $\alpha$  та  $\beta$  до обертової  $dq$  здійснюється за допомогою координатних перетворень, що дозволяють представити змінні у вигляді постійних (стаціонарних) величин у сталому режимі.

#### Математична основа перетворення координат

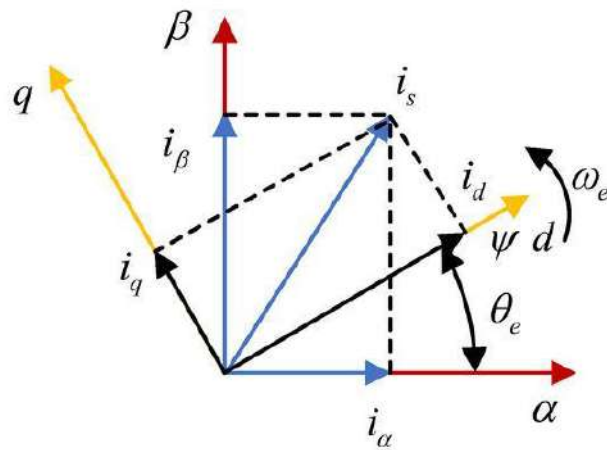


Рисунок 2.3 – Геометрична інтерпретація перетворення координат  $\alpha\beta \rightarrow dq$

У нерухомій системі координат  $\alpha\beta$  просторовий вектор струму статора подається через його складові вздовж відповідних осей:

$$i_s = i_\alpha + j i_\beta \quad 2.21$$

У системі координат  $dq$ , яка обертається разом із ротором, той самий вектор може бути представлений через поздовжню та поперечну складові:

$$i_s = (i_d + j i_q) e^{j\theta} \quad 2.22$$

де:

$i_s$  — просторовий вектор струму статора;

$i_\alpha, i_\beta$  — складові струму в нерухомій системі координат;

$i_d$  — складова струму вздовж осі  $d$ , що збігається з напрямком магнітного потоку ротора;

$i_q$  — складова струму вздовж осі  $q$ , яка формує електромагнітний момент;

$\theta$  — поточний електричний кут положення ротора.

Таке подання дає змогу перейти від нерухомої системи координат до обертової та суттєво спрощує аналіз електромагнітних процесів у синхронній машині з постійними магнітами.

Для переходу від нерухомої системи координат  $\alpha, \beta$  до обертової системи  $dq$ , яка пов'язана з положенням ротора, застосовується пряме перетворення Парка. У результаті цього перетворення просторовий вектор струму розкладається на дві складові: поздовжню  $i_d$  та поперечну  $i_q$ .

Пряме перетворення Парка визначається такими залежностями:

$$\begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_q &= -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{aligned} \quad 2.23$$

де:

$i_d$  — складова струму вздовж осі (d);

$i_q$  — складова струму вздовж осі (q);

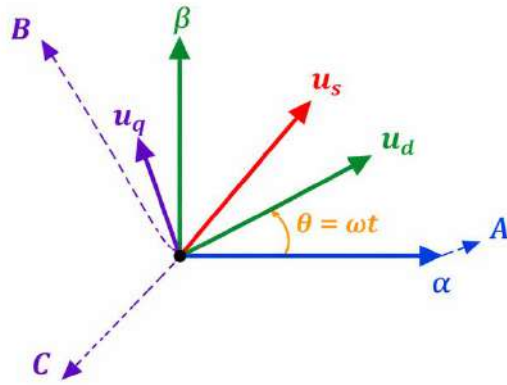
$i_\alpha, i_\beta$  — складові струму у нерухомій системі координат;

$\theta$  — електричний кут положення ротора.

Для відновлення значень струмів у нерухомій системі координат використовується зворотне перетворення Парка, яке має вигляд:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_d \cos \theta - i_q \sin \theta \\ i_\beta &= i_d \sin \theta + i_q \cos \theta \end{aligned} \quad 2.23$$

Застосування перетворення Парка дає можливість перейти від змінних, що змінюються за синусоїдальним законом, до майже сталих величин у системі координат  $dq$ . Це значно спрощує побудову систем автоматичного керування, оскільки дозволяє незалежно регулювати потокову та моментну складові струму двигуна.

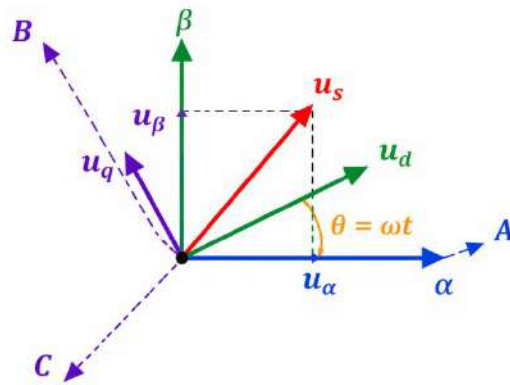


Формули прямого перетворення:

$$i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta$$

$$i_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta$$

Рисунок 2.4 – Прямое перетворення Парка



Формули зворотного перетворення:

$$i_\alpha = i_d \cos \theta - i_q \sin \theta$$

$$i_\beta = i_d \sin \theta + i_q \cos \theta$$

Рисунок 2.5 – Зворотне перетворення Парка

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

49

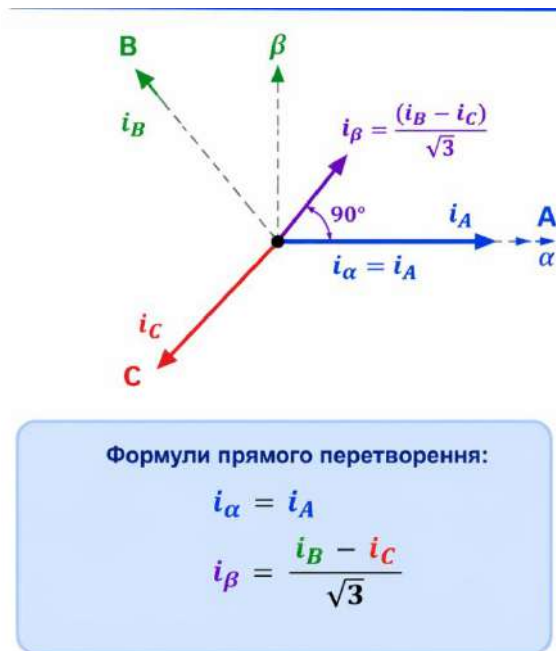


Рисунок 2.6 – Прехід від фазних струмів до  $\alpha\beta$

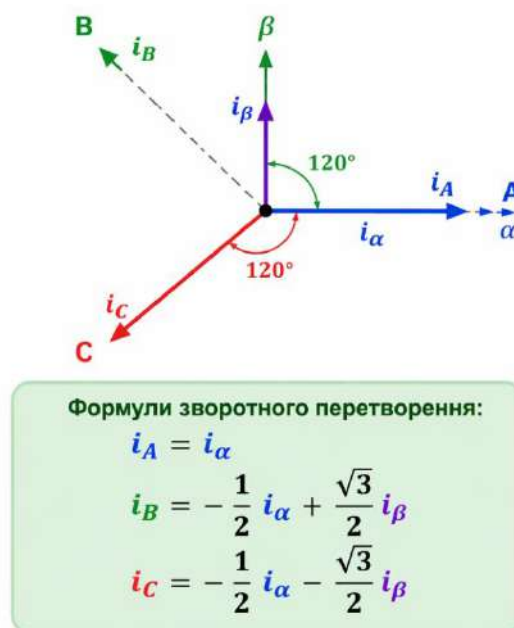


Рисунок 2.7 – Прехід від  $\alpha\beta$  до фазних струмів

Рисунок 2.6 ілюструє пряме перетворення Кларка, за допомогою якого три фазні струми  $i_A$ ,  $i_B$  та  $i_C$  перетворюються у дві ортогональні складові  $i_{\alpha}$  та  $i_{\beta}$ . Такий перехід дозволяє замінити трифазну систему еквівалентною

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

двовимірною моделлю, що значно спрощує подальший аналіз електромагнітних процесів та побудову систем керування.

У межах прийнятої моделі вісь  $\alpha$  збігається з фазою А, тому складова  $i_\alpha$  дорівнює фазному струму  $i_A$ . Складова  $i_\beta$  формується на основі різниці струмів фаз В та С, поділеної на 3. У результаті отримується двовимірний просторовий вектор струму, який описує стан трифазної системи у нерухомій системі координат  $\alpha\beta$ .

Рисунок 2.7 демонструє зворотне перетворення, при якому за відомими складовими  $i_\alpha$  та  $i_\beta$  визначаються відповідні фазні струми  $i_A$ ,  $i_B$  та  $i_C$ . Таке перетворення застосовується після виконання алгоритмів керування у координатах  $\alpha\beta$  або  $dq$ , коли необхідно сформувати реальні сигнали для силового інвертора.

Використання перетворень Кларка є необхідною складовою сучасних систем векторного керування електроприводами, оскільки вони забезпечують перехід від трифазних змінних до компактної двовимірної моделі, зручної для подальших математичних перетворень і реалізації цифрових алгоритмів керування.

#### Фізичний зміст dq-системи

Оскільки система координат  $dq$  обертається синхронно з ротором, вісь  $d$  постійно збігається з напрямком магнітного потоку, створеного постійними магнітами. Водночас вісь  $q$  залишається ортогональною до осі  $d$  і відповідає за формування електромагнітного моменту.

Для синхронної машини з постійними магнітами проєкції потокозчеплення у системі координат  $dq$  мають особливо простий вигляд:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= \Psi_f \\ \Psi_q &= 0\end{aligned}\tag{2.24}$$

де:

$\psi_d$  — складова потокозчеплення вздовж осі (d);

$\psi_q$  — складова потокозчеплення вздовж осі (q);

$\psi_f$  — магнітний потік ротора, створений постійними магнітами.

Така властивість є однією з основних переваг використання системи координат  $dq$ , оскільки дозволяє розділити процеси формування магнітного потоку та електромагнітного моменту. У результаті складова  $i_d$  використовується переважно для керування потоком, а складова  $i_q$  — для регулювання моменту, що істотно спрощує побудову системи автоматичного керування електроприводом.

Після переходу до обертової системи координат  $dq$ , жорстко пов'язаної з ротором, математичний опис синхронного двигуна набуває форми, зручної для аналізу та синтезу алгоритмів векторного керування. У цій системі змінні, які в нерухомих координатах мають синусоїдальний характер, перетворюються на величини, що змінюються значно повільніше, а в усталеному режимі можуть розглядатися як сталі.

Проекція рівняння напруги на вісь ( $d$ ) визначається виразом:

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad 2.25$$

Проекція рівняння напруги на вісь ( $q$ ) має вигляд:

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_f \quad 2.26$$

де:

$U_d, U_q$  — складові напруги статора в системі координат ( $dq$ );

$i_d, i_q$  — проекції струму статора на осі ( $d$ ) та ( $q$ );

$R_s$  — активний опір статорної обмотки;

$L_d, L_q$  — індуктивності по поздовжній та поперечній осях;

$\omega$  — електрична кутова швидкість;

$\psi_f$  — потокозчеплення ротора, створене постійними магнітами.

Наведені рівняння показують, що складові напруги в системі ( $dq$ ) залежать не лише від відповідних струмів і їх похідних, але й від взаємного електромагнітного зв'язку між каналами ( $d$ ) та ( $q$ ), який враховується через члени з кутовою швидкістю  $\omega$ .

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електромагнітний момент синхронної машини у загальному випадку може бути визначений так:

$$M = \frac{3}{2}p(\Psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad 2.27$$

Цей вираз містить дві складові моменту. Перша з них пов'язана з магнітним потоком ротора та q-складовою струму, а друга обумовлена анізотропією магнітної системи, тобто різницею між індуктивностями ( $L_d$ ) і ( $L_q$ ).

Для неявнополюсної синхронної машини приймається рівність індуктивностей за обома осями:

$$L_d = L_q = L_s \quad 2.28$$

У цьому випадку різницева складова моменту зникає, а рівняння електромагнітного моменту суттєво спрощується:

$$M = \frac{3}{2}p\Psi_f i_q \quad 2.29$$

Отже, для неявнополюсного двигуна з постійними магнітами момент визначається виключно q-складовою струму. Саме ця особливість є теоретичною основою векторного керування, оскільки дає змогу незалежно керувати потоком і моментом, подібно до принципу керування двигуном постійного струму. У практичній реалізації це означає, що при ( $i_d=0$ ) забезпечується раціональний режим роботи електропривода, а формування моменту здійснюється лише за рахунок зміни ( $i_q$ ).

Механічна підсистема електропривода описується рівнянням динамічної рівноваги моментів, яке встановлює зв'язок між електромагнітним моментом двигуна, моментом зовнішнього навантаження та зміною кутової швидкості ротора:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c \quad 2.30$$

де:

$J$  — зведений момент інерції електромеханічної системи;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$\omega_m$  — механічна кутова швидкість ротора;

$M$  — електромагнітний момент, який розвиває двигун;

$M_c$  — момент опору навантаження.

Із наведеного співвідношення випливає, що характер зміни швидкості визначається різницею між рушійним моментом двигуна та моментом опору. За умови, коли ( $M > M_c$ ), ротор набирає швидкість, а при ( $M < M_c$ ) відбувається його сповільнення. У випадку рівності цих моментів система переходить у сталий режим роботи.

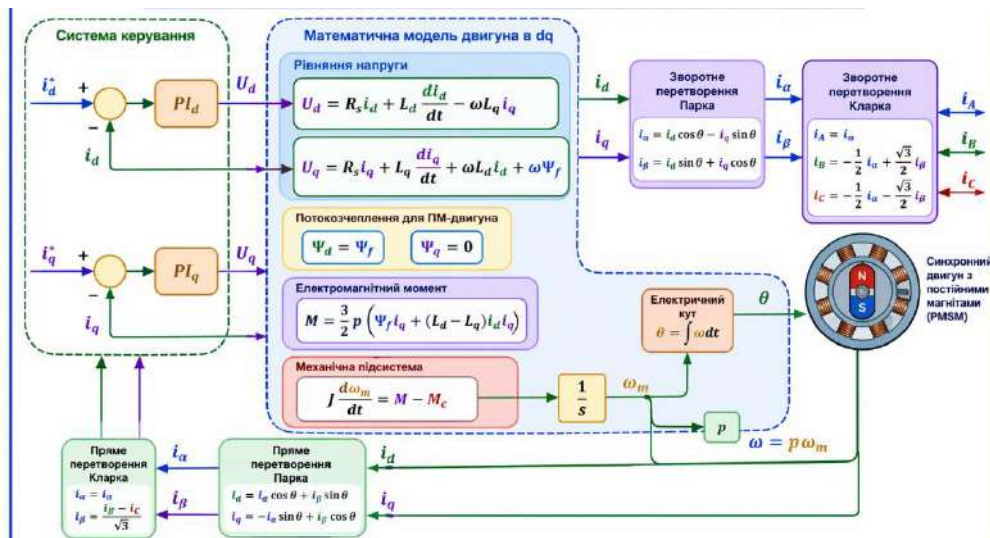


Рисунок 2.8 – Структурна схема математичної моделі синхронного двигуна з постійними магнітами в обертовій системі координат (dq)

### Висновок

Отже, використання обертової системи координат (dq) дає можливість замінити змінні синусоїдальні величини на сигнали, що в усталеному режимі мають практично сталий характер. Завдяки цьому значно спрощується математичний опис електромагнітних процесів та підвищується ефективність побудови систем автоматичного керування.

Основною перевагою такого підходу є можливість незалежного регулювання потокозчеплення та електромагнітного моменту двигуна. При

цьому складова (id) використовується для формування магнітного потоку, а складова (iq) — для керування моментом. Подібне розділення процесів забезпечує високу швидкодію, точність та стійкість електропривода.

Саме тому обертові координати (dq) є базою для реалізації векторного керування ФОС, яке сьогодні широко застосовується у сервоприводах, електромобілях, промислових приводах і системах рульового електропідсилення.

### 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО КОЛА ТА СИНТЕЗ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Механічна система електропривода

Згідно з розрахунковими оцінками для транспортного засобу повною масою близько 2,5 т, момент опору на керованих колесах у навантаженому режимі може досягати:

$$M_{\text{мех}}=240 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Наведене значення враховує сили опору повороту коліс, реакцію дорожнього покриття, а також втрати у механізмах рульового привода. Таким чином, саме цей момент повинен бути подоланий або частково компенсований електромеханічною системою підсилення.

Порівняння отриманого навантаження з максимальним моментом електродвигуна показує, що безпосереднє підключення двигуна до рульового механізму є недоцільним, оскільки його граничний момент є суттєво меншим за необхідний. У зв'язку з цим у конструкції електропривода передбачається використання механічного редуктора, який забезпечує збільшення моменту на вихідному валу за рахунок відповідного зменшення швидкості обертання.

Застосування редуктора дозволяє узгодити параметри електродвигуна з вимогами виконавчого механізму рульового керування, забезпечити необхідний запас тягового моменту та знизити навантаження на силову частину привода.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Структурно електропривод системи рульового керування можна подати як сукупність трьох взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує окрему функцію у процесі перетворення та передавання енергії.

До складу електропривода входять:

електродвигун, який забезпечує перетворення електричної енергії у механічну та створює необхідний крутний момент на валу;

силовий перетворювач або інвертор, призначений для формування трифазної системи напруг і струмів, а також реалізації алгоритмів керування електродвигуном;

механічна підсистема навантаження, що включає редуктор, рульову рейку та інші елементи рульового механізму, через які момент передається до керованих коліс.

Узгоджена робота зазначених підсистем забезпечує необхідну швидкодію, плавність та точність функціонування електромеханічного підсилювача рульового керування.

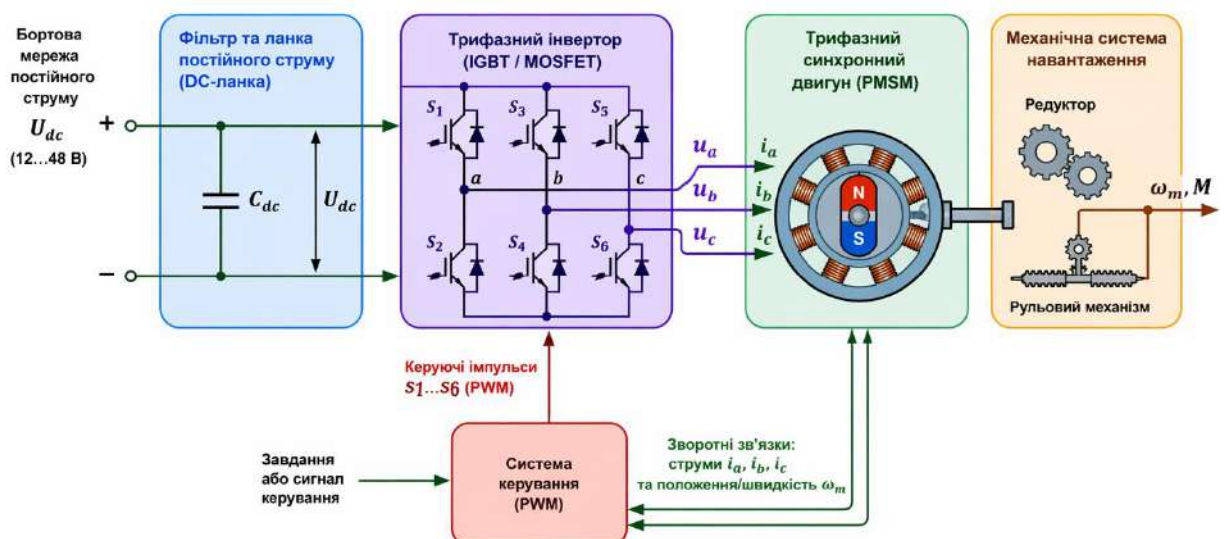


Рисунок 3.1 – Структурна схема силового каналу електропривода

У структурній схемі враховано зворотні зв'язки за струмом, швидкістю та положенням, що забезпечує реалізацію замкненої системи керування.

Передаточне число редуктора визначається виходячи з необхідності забезпечення потрібного моменту на вихідній ланці механізму. Для цього момент навантаження порівнюється з максимально допустимим моментом електродвигуна:

$$i = \frac{M_{\text{мех}}}{M_{\text{мах}}} = \frac{240}{30} = 8$$

3.1

де:

$M_{\text{мех}}$  — момент навантаження на виході рульового механізму;

$M_{\text{мах}}$  — максимальний момент електродвигуна;

$i$  — передаточне число редуктора.

Отримане значення свідчить про те, що для узгодження параметрів двигуна з навантаженням доцільно застосовувати редуктор із передаточним числом, близьким до 8. Це дозволяє збільшити вихідний момент до необхідного рівня та одночасно зменшити швидкість обертання виконавчого механізму.

Для подібних систем найбільш доцільним є використання планетарних редукторів, оскільки вони поєднують компактні габарити, високу навантажувальну здатність, незначну масу та високий коефіцієнт корисної дії. Крім того, така конструкція добре підходить для інтеграції у вузол електромеханічного підсилювача рульового керування.

Обране передаточне число означає, що приблизно двом обертам рульового колеса відповідає близько шістнадцяти обертів електродвигуна, що узгоджується з кінематикою рульового привода та забезпечує необхідну точність і швидкодію системи.

Під час подальшого моделювання механічна частина електропривода розглядається як одномасова система. Таке припущення дозволяє спростити

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

математичний опис, оскільки не враховуються пружні деформації валів, люфти у передачах та коливальні процеси в елементах трансмісії.

Водночас у реальній конструкції механічна система складається з кількох взаємопов'язаних елементів: електродвигуна, редуктора та рульового механізму. Кожен із цих компонентів має власний момент інерції, який у подальших розрахунках доцільно привести до вала двигуна для отримання еквівалентного моменту інерції всієї системи.

Для подальшого аналізу динаміки електропривода необхідно визначити еквівалентний момент інерції механічної системи, приведений до вала електродвигуна. Це дозволяє врахувати вплив редуктора та рульового механізму на розгін і гальмування привода.

У подальших розрахунках приймаються такі значення моментів інерції:

$$J_{\text{ред}}=0,367 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J_{\text{мех}}=0,377 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Зведений момент інерції всієї системи, приведений до вала електродвигуна, визначається залежністю:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{ред}}}{i^2} + \frac{J_{\text{мех}}}{i_{\text{рп}}^2} \quad 3.2$$

де:

$J_{\text{дв}}$  — власний момент інерції ротора електродвигуна;

$J_{\text{ред}}$  — момент інерції редуктора;

$J_{\text{мех}}$  — момент інерції рульового механізму;

$i$  — передаточне число редуктора;

$i_{\text{рп}}$  — передаточне число рульового механізму.

Після підстановки прийнятих значень отримуємо:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + \frac{0,367}{8^2} + \frac{0,377}{1,3^2}$$

Проміжні складові приведених моментів інерції становлять:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + 0,0057 + 0,223$$

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

У результаті загальний приведений момент інерції системи можна записати у вигляді:

$$J_{\Sigma} \approx J_{\text{пр}} + 0,229$$

Отримане значення показує, що основний внесок у сумарний момент інерції робить рульовий механізм, тоді як вплив редуктора після приведення до вала двигуна є значно меншим через квадрат передаточного числа.

Зведений момент інерції механічної частини є одним із визначальних параметрів електропривода, оскільки саме він характеризує інерційність системи та її здатність реагувати на зміну керуючих дій.

Зі збільшенням приведенного моменту інерції зменшується швидкість розгону та гальмування привода, тобто погіршується його швидкодія. Крім того, величина безпосередньо впливає на вибір параметрів регуляторів у контурі швидкості та моменту, оскільки від неї залежать динамічні властивості об'єкта керування.

Недостатньо точне врахування цього параметра може призвести до спотворення результатів моделювання, збільшення перерегулювання, погіршення стійкості системи та зниження точності відпрацювання заданих режимів. Саме тому коректне визначення зведеного моменту інерції є необхідною умовою для якісного синтезу системи автоматичного керування електроприводом і достовірного аналізу його перехідних процесів.

### 3.2 Лінеаризована структурна схема слідкуючого синхронного електропривода

Відповідно до прийнятої математичної моделі, лінеаризована структурна схема електропривода будується за принципом підпорядкованого регулювання, при якому внутрішні контури струму працюють значно швидше за зовнішній контур швидкості або моменту. Такий підхід забезпечує високу точність, стійкість та швидкодію системи керування.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У контурі по осі (d) задається нульове значення струму, що відповідає режиму оптимального керування для неявнополюсного двигуна з постійними магнітами:

$$i_d^{\text{зад}} = 0$$

За таких умов вісь (d) використовується лише для підтримання сталого магнітного потоку ротора, а формування моменту здійснюється виключно за рахунок q-складової струму.

Контур по осі (q) є основним каналом керування навантаженням, оскільки саме він визначає величину електромагнітного моменту:

$$i_q \sim M$$

Регулювання струмів у каналах (d) та (q) виконується за допомогою ПІ-регуляторів, які забезпечують високу швидкодію системи та практично повне усунення статичної похибки. На виході регуляторів формуються керуючі сигнали напруги  $U_d$  та  $U_q$ .

Силовий інвертор у лінеаризованій моделі може бути представлений аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{інв}} = \frac{1}{T_{\text{ШІМ}}s + 1} \quad 3.3$$

де  $T_{\text{ШІМ}}$  — період широтно-імпульсної модуляції.

Електромагнітна частина двигуна описується передаточною функцією статорного кола:

$$\frac{1}{L_s s + R_s} \quad 3.4$$

де  $L_s$  — індуктивність статора, а  $R_s$  — активний опір обмоток.

Формування електромагнітного моменту відбувається відповідно до залежності:

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_d i_q \quad 3.5$$

Отже, момент прямо пропорційний потокозчепленню ротора та  $q$ -складовій струму статора.

Механічна частина привода описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad 3.6$$

У лінеаризованому вигляді механічна підсистема може бути представлена передаточною функцією:

$$\frac{1}{J_p} \quad 3.7$$

де ( $J$ ) — зведений момент інерції механічної системи.

Таким чином, лінеаризована схема електропривода відображає взаємозв'язок між електричними та механічними процесами, а також дозволяє виконувати подальший синтез регуляторів і досліджувати перехідні процеси у системі керування рульовим електроприводом.

Перехід до лінеаризованої моделі дає можливість замінити складний нелінійний опис електропривода більш простою математичною структурою, придатною для подальшого розрахунку та налаштування системи керування. Завдяки цьому з'являється можливість окремо синтезувати контури струму, швидкості та положення, забезпечуючи необхідну швидкодію та точність роботи привода.

Лінеаризація також істотно спрощує дослідження динамічних характеристик системи, оскільки дозволяє використовувати передаточні функції, частотні характеристики та інші класичні інструменти теорії автоматичного керування. Це створює основу для оцінювання стійкості, визначення запасів за фазою та амплітудою, аналізу перехідних процесів і вибору параметрів регуляторів.

У результаті застосування лінеаризованої моделі можна отримати більш наочне уявлення про поведінку електропривода в різних режимах роботи та забезпечити його ефективне функціонування при змінному навантаженні.

### 3.3 Синтез контурів регулювання синхронного електропривода

Під час побудови системи керування електроприводом рульової рейки необхідно визначити послідовність взаємодії окремих контурів регулювання та їх місце у загальній структурі автоматизованого керування. Такий підхід дає змогу сформувати ієрархію контурів відповідно до швидкості протікання процесів та їх впливу на роботу привода.

Для систем електромеханічного підсилення рульового керування визначальним параметром є електромагнітний момент двигуна, оскільки саме він формує додаткове зусилля, що передається на рульовий механізм. У зв'язку з цим основним контуром системи виступає контур моменту, реалізований через регулювання q-складової струму.

Контур струму є найшвидшим у структурі електропривода, тому саме він розташовується на нижньому рівні системи підпорядкованого регулювання. На його основі формуються зовнішні контури швидкості та положення, які працюють повільніше та задають необхідні режими функціонування електропривода.

Таким чином, для електропривода рульової рейки першочергове значення має саме точне та швидкодієне регулювання моменту, оскільки від нього залежить комфортність керування транспортним засобом, точність відпрацювання дій водія та стабільність роботи системи підсилення.

#### Обґрунтування вибору основного контуру

Для синхронного двигуна з постійними магнітами, що працює за алгоритмом векторного керування, електромагнітний момент безпосередньо залежить від q-складової струму статора:

$$M = \frac{3}{2}p \cdot \Psi_f \cdot i_q \quad 3.8$$

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Це означає, що момент двигуна визначається величиною струму  $i_q$ , тоді як  $d$ -складова переважно відповідає за формування магнітного потоку. Таким чином, регулювання моменту фактично зводиться до регулювання  $q$ -складової струму, а внутрішній контур струму стає основним елементом усієї системи керування.

У сучасних електроприводах застосовується каскадний принцип побудови системи керування, при якому внутрішні контури працюють швидше, ніж зовнішні. Найшвидшим є контур струму, оскільки саме він забезпечує формування електромагнітного моменту та безпосередньо впливає на реакцію привода на зміну навантаження. Для реалізації такого контуру зазвичай використовуються ПІ-регулятори, що працюють у системі координат  $dq$ .

Контур швидкості розташовується на вищому рівні ієрархії та використовується для формування завдання для струму  $i_q$ . Його швидкодія є меншою порівняно з контуром струму, оскільки зміна швидкості визначається інерційністю механічної системи.

Контур положення у класичних сервосистемах застосовується для забезпечення високої точності позиціонування. Однак для електромеханічного підсилювача рульового керування його роль є менш значущою, оскільки необхідне положення рульового механізму задається безпосередньо водієм. У системах автоматизованого або автономного керування транспортним засобом контур положення набуває більшого значення, але в базовій моделі рульового електропривода він може бути спрощений або взагалі не враховуватись.

Отже, для системи електропідсилювача рульового управління найбільш доцільною є структура, у якій основним є внутрішній контур струму, зовнішнім — контур швидкості, а контур положення або не використовується, або має допоміжний характер.

Для побудови контурів регулювання струму найбільш доцільним є застосування ПІ-регуляторів, оскільки саме такий тип регулятора забезпечує необхідну якість керування для електроприводів із векторним принципом керування. Їх використання дає змогу усунути статичну похибку в усталеному режимі, забезпечити достатню швидкодію системи та зберегти відносну простоту практичної реалізації як у цифровому, так і в аналоговому виконанні.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad 3.9$$

де:

$K_p$  — коефіцієнт пропорційної складової;

$K_i$  — коефіцієнт інтегральної складової.

Пропорційна частина регулятора забезпечує швидку реакцію системи на відхилення регульованої величини, тоді як інтегральна складова компенсує накопичену похибку та дозволяє досягти нульової статичної похибки за сталих режимів роботи.

Синтез системи керування виконується за каскадним принципом. Спочатку налаштовується внутрішній контур струму як найбільш швидкодійний, оскільки саме він формує момент двигуна та визначає динаміку електромагнітної частини привода. Після цього, з урахуванням уже сформованого внутрішнього контуру, налаштовуються зовнішні контури — швидкості та, за потреби, положення.

Важливою умовою такого синтезу є розділення часових масштабів між окремими контурами:

$$T_{\text{струм}} \ll T_{\text{швидкість}} \ll T_{\text{положення}} \quad 3.10$$

Це означає, що контур струму повинен відпрацьовувати зміни значно швидше за контур швидкості, а контур швидкості — швидше за контур положення. Такий підхід забезпечує мінімальний взаємний вплив контурів

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

один на одного, спрощує процедуру налаштування регуляторів і підвищує стійкість усієї системи керування.

Для електропривода рульової рейки основним функціональним елементом системи керування є саме контур струму, оскільки через нього здійснюється формування електромагнітного моменту двигуна. Від його швидкодії, точності та стійкості безпосередньо залежить ефективність роботи всього рульового привода, плавність відпрацювання дій водія та здатність системи компенсувати змінне навантаження.

Саме тому синтез внутрішнього контуру струму розглядається як першочерговий етап побудови системи керування. Після його налаштування можуть бути реалізовані зовнішні контури швидкості та положення, які виконують допоміжні функції та визначають більш загальний режим роботи привода.

Для електромеханічного підсилювача рульового керування контур швидкості зазвичай використовується для обмеження динаміки та стабілізації режимів роботи, тоді як контур положення у базовій системі має другорядне значення, оскільки положення рульового механізму задається водієм. Разом з тим у перспективних системах автономного або напівавтономного керування роль цих контурів суттєво зростає, що відкриває можливість для подальшого розвитку та ускладнення структури електропривода.

### 3.4 Синтез регулятора струму

Структурна схема контуру струму електропривода представлена на рисунку 3.2. Оскільки контури  $I_d$  та  $I_q$  є ідентичними за структурою, синтез виконаємо для контуру струму по осі  $q$ , який безпосередньо визначає електромагнітний момент двигуна.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65



Рисунок 3.2 – Структурна схема контуру струму по осі q

Допущення при синтезі

При синтезі регулятора струму приймаються наступні припущення:

- не враховується вплив зворотної ЕРС двигуна;
- не враховується взаємозв'язок між осями ( d ) та ( q );
- датчик струму моделюється як пропорційна ланка;
- інвертор представлено аперіодичною ланкою першого порядку.

Передаточна функція об'єкта керування

Під час синтезу контуру струму по осі q об'єкт керування доцільно подати у вигляді послідовного з'єднання інвертора напруги та електричної частини обмотки статора двигуна. За такого підходу динамічні властивості об'єкта описуються передаточною функцією

$$W_{об}(s) = \frac{K_{інв}}{(T_{ШІМ}s + 1)(L_s s + R_s)} \quad 3.11$$

де  $K_{інв}$  — коефіцієнт передачі інвертора;

$T_{ШІМ}$  — еквівалентна стала часу, що характеризує інерційність перетворювача;

$L_s$  — індуктивність фази статора;

$R_s$  — активний опір обмотки статора.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

66

Наведена модель відображає основні електромагнітні процеси в каналі формування струму та враховує вплив широтно-імпульсної модуляції на швидкодію системи. Множник  $T_{ШІМs}$  описує інерційність силового перетворювача, тоді як вираз  $L_{ss}+R_s$  характеризує електричну динаміку статорного кола. Таким чином, об'єкт керування має властивості аперіодичної ланки другого порядку, що необхідно враховувати при виборі структури та параметрів регулятора.

#### Параметри системи

У досліджуваній системі керування частота широтно-імпульсної модуляції приймається рівною

$$f_{ШІМ} = 5 \text{ кГц.}$$

Тоді стала часу інвертора визначається співвідношенням

$$T_{ШІМ} = \frac{1}{f_{ШІМ}} = 0,0002 \text{ с.}$$

Отримане значення свідчить про високу швидкодію силового перетворювача, що є важливою передумовою ефективного регулювання струму в електроприводі. Водночас навіть за малої сталої часу вплив інвертора на перехідні процеси не можна ігнорувати, оскільки він визначає граничну швидкість реакції системи на зміну керувального сигналу.

#### Вибір типу регулятора

Для налаштування внутрішнього контуру струму доцільно використовувати пропорційно-інтегральний регулятор, оскільки саме такий тип регулятора забезпечує поєднання високої швидкодії з відсутністю статичної похибки в усталеному режимі. Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд

$$W_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad 3.12$$

де  $K_p$  — коефіцієнт пропорційної складової;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

$T_i$  — стала часу інтегруючої частини регулятора.

Еквівалентно цю залежність можна записати у формі

$$W_{PI}(s) = \frac{K_p (T_i s + 1)}{T_i s} \quad 3.13$$

Пропорційна складова формує необхідну швидкість реакції системи на відхилення струму від заданого значення, тоді як інтегральна частина усуває сталу похибку та підвищує точність відпрацювання завдання. Саме тому ІІ-регулятор є найбільш поширеним і технічно обґрунтованим рішенням для контурів струму електромеханічних систем, зокрема в сервоприводах та тягових електроприводах транспортних засобів.

#### Обґрунтування застосування ІІ-регулятора

Використання ІІ-регулятора у внутрішньому контурі струму пояснюється тим, що цей контур безпосередньо визначає процес формування електромагнітного моменту двигуна. Від якості його налаштування залежать динамічні показники всієї системи керування, зокрема швидкість реакції електропривода, точність стабілізації струму та стійкість при зміні навантаження. За рахунок порівняно простої структури ІІ-регулятор легко реалізується як у цифрових, так і в аналогових системах керування, що додатково підтверджує доцільність його застосування.

#### Налаштування за модульним оптимумом

Для забезпечення оптимальної швидкодії застосовується метод модульного оптимуму, згідно з яким:

Для забезпечення симетричного оптимуму та досягнення необхідної швидкодії внутрішнього контуру струму стала часу інтегруючої частини ІІ-регулятора приймається рівною електромагнітній сталій часу об'єкта керування. У такому разі

$$T_i = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,00525}{0,5} = 0,0105 \text{ с.}$$

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Таке значення забезпечує компенсацію найбільш інерційної електричної ланки двигуна та дозволяє сформувати достатньо швидкий перехідний процес без суттєвого перерегулювання.

Коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора визначається з урахуванням параметрів силового перетворювача та об'єкта керування за залежністю

$$K_p = \frac{L_s}{a \cdot T_{\text{ШМ}} \cdot K_{\text{інв}}} \quad 3.14$$

де  $a$  — коефіцієнт оптимуму, який для налаштування за симетричним оптимумом приймається рівним 2;

$T_{\text{ШМ}}$  — стала часу інвертора;

$K_{\text{інв}}$  — коефіцієнт передачі інвертора.

$$K_p = \frac{L_s}{a T_{\text{ШМ}} K_{\text{інв}}} \quad 3.15$$

Підставляючи числові значення параметрів системи, отримуємо

$$K_p = \frac{0,00525}{2 \cdot 0,0002 \cdot 1} = 13,125.$$

Отримане значення коефіцієнта підсилення свідчить, що регулятор матиме достатньо високу чутливість до зміни похибки струму, забезпечуючи швидке відпрацювання задавального сигналу та ефективно придушення впливу зовнішніх збурень. При цьому обране налаштування дозволяє уникнути надмірного перерегулювання та зберегти стійкість системи керування.

Очікувані показники якості

Перехідний процес у контурі струму представлено на рисунку 3.3.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

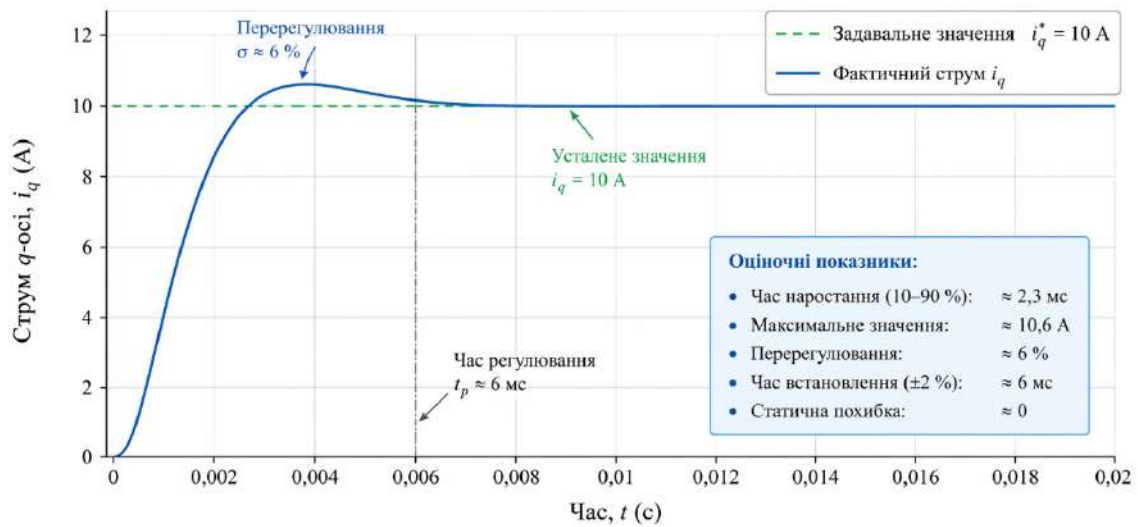


Рисунок 3.3 – Перехідний процес у контурі струму

#### Аналіз якості перехідного процесу

За результатами моделювання контуру струму встановлено, що система забезпечує високу точність відпрацювання задавального сигналу та задовільні динамічні характеристики. Усталена похибка в контурі струму практично відсутня, що підтверджує ефективність застосування інтегральної складової ПІ-регулятора:

$$\Delta I = 0.$$

Перерегулювання в системі знаходиться в межах

$$\sigma = 0\text{--}10\%.$$

Такий рівень перерегулювання є допустимим для внутрішнього контуру струму, оскільки дозволяє забезпечити достатньо швидке досягнення заданого значення струму без суттєвого погіршення стійкості системи.

$$0\% \leq \sigma \leq 10\%$$

Час перехідного процесу становить приблизно

$$t_p \approx 0,02 \text{ с.}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Отримане значення свідчить про високу швидкодію контуру струму, що особливо важливо для електроприводів рульових механізмів, де формування електромагнітного моменту повинно відбуватися практично миттєво при зміні задавального впливу.

#### Висновок

Синтез регулятора струму за методом модульного оптимуму дозволив сформувати швидкодіючий та стійкий контур керування з мінімальною статичною похибкою і помірним рівнем перерегулювання. Отримані параметри регулятора забезпечують ефективне формування електромагнітного моменту двигуна, високу точність підтримання струму та належну якість перехідних процесів.

Таким чином, розрахований контур струму може бути використаний як базовий внутрішній контур у багаторівневій системі керування електроприводом. Надалі його параметри можуть бути покладені в основу синтезу зовнішніх контурів швидкості та положення, що є необхідним для реалізації більш складних алгоритмів керування, у тому числі в системах активної безпеки та автономного руху транспортних засобів.

Структурна схема контуру положення з безінерційним зворотним зв'язком наведена на рисунку 2.1. У даному контурі здійснюється порівняння задавального та фактичного значення кута повороту, а сформована похибка використовується для вироблення керувального впливу.

Для зручності аналізу та інтерпретації результатів сигнал положення у системі подається у градусах. Це дозволяє безпосередньо оцінювати відхилення між заданим та фактичним кутом повороту виконавчого механізму.

Коефіцієнт зворотного зв'язку датчика положення визначається з урахуванням переходу від радіан до градусів:

$$K_{\text{дп}} = \frac{360}{2\pi} = 57,296$$

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Мала некомпенсована стала часу контуру положення приймається рівною подвоєному значенню сталої часу внутрішнього контуру швидкості:

$$T_{кп} = 2T_{кв} = 2 \cdot 0,0004 = 0,0008 \text{ с}$$

Таке співвідношення забезпечує необхідне розділення швидкодії між вкладеними контурами та підвищує стійкість усієї системи керування.

Для синтезу контуру положення за критерієм модульного оптимуму доцільно використовувати пропорційний регулятор, оскільки контур положення є зовнішнім по відношенню до швидкісного та не потребує інтегральної складової. Передаточна функція регулятора має вигляд

$$W_{рп}(s) = K_{рп} \quad 3.16$$

Коефіцієнт підсилення регулятора положення визначається за залежністю

$$K_{рп} = \frac{1}{K_{дп} \alpha_{п} T_{кп}} \quad 3.17$$

де

$\alpha_{п}$  — коефіцієнт оптимізації контуру положення.

$K_{рп}$

Після підстановки числових значень отримуємо

$$K_{рп} = \frac{1}{57,296 \cdot 2 \cdot 0,0008} \approx 10,9$$

Отже, для контуру положення приймається пропорційний регулятор з коефіцієнтом підсилення

$$K_{рп} = 10,9.$$

Отримане значення забезпечує достатню чутливість контуру положення до зміни задавального сигналу та дозволяє підтримувати високу точність позиціонування без виникнення суттєвих коливань або перерегулювання.

Для оцінювання якості роботи контуру положення в імітаційній моделі здійснюється порівняння задавального та фактичного значень кута повороту

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

виконавчого механізму. На основі отриманого графіка перехідного процесу можна зробити висновок, що система забезпечує точне відпрацювання задавального сигналу без статичної похибки, а отже синтез контуру виконано коректно.

За результатами аналізу перехідного процесу встановлено, що усталена похибка дорівнює

$$\Delta\varphi_{уст} = 0.$$

Це означає, що у сталому режимі фактичне значення кута повністю збігається із задавальним.

Час першого перехідного процесу, який відповідає початковому пуску системи, становить

$$t_{п1} = 0,35 \text{ с},$$

а величина першого перерегулювання не перевищує

$$\sigma_1 = 2,5\%.$$

Такі значення свідчать про достатньо плавний характер виходу системи на заданий режим без суттєвих коливань.

При зміні зовнішнього впливу або повторному коригуванні положення спостерігається другий перехідний процес із тривалістю

$$t_{п2} = 0,09 \text{ с},$$

а друге перерегулювання становить

$$\sigma_2 = 12,5\%.$$

Незважаючи на дещо більше перерегулювання при повторній зміні режиму, система зберігає стійкість і швидко повертається до необхідного положення.

Отримані результати підтверджують, що контур положення забезпечує достатню точність позиціювання та прийнятні динамічні характеристики для системи електропривода рульової рейки. Невелике перше перерегулювання, відсутність статичної похибки та обмежений час встановлення підтверджують

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

доцільність використання прийнятого закону керування і правильність вибору параметрів регулятора положення.

Оптимізація контуру положення показала, що застосування пропорційного регулятора забезпечує необхідну точність відпрацювання задавального кута повороту та достатню швидкодію системи в усіх основних режимах роботи. Завдяки правильно підбраному коефіцієнту підсилення вдалося досягти відсутності статичної похибки, обмежити рівень перерегулювання та забезпечити стійкий характер перехідних процесів.

Отримані результати свідчать про те, що синтезований контур положення може бути ефективно використаний як зовнішній контур багаторівневої системи керування електроприводом рульової рейки. Вибрані параметри регулятора можуть бути прийняті як базові для подальшого вдосконалення системи, зокрема при реалізації адаптивних алгоритмів, компенсації зовнішніх збурень, підвищенні точності позиціонування та розробленні електроприводів для автоматизованого або автономного рульового керування транспортними засобами.

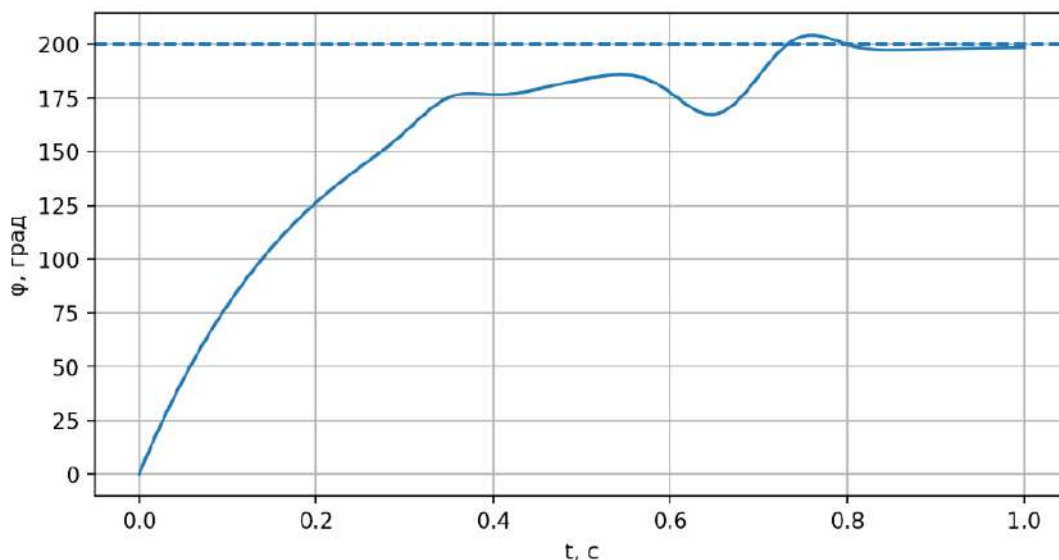


Рисунок 3.4 – Перехідний процес у контурі положення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## 4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РУЛЬОВОЇ РЕЙКИ АВТОМОБІЛЯ

Для дослідження динамічних процесів та перевірки працездатності синтезованої системи керування електроприводом рульової рейки використано програмне середовище MATLAB Simulink, яке дозволяє реалізувати математичні моделі складних електромеханічних систем, виконувати чисельний аналіз та досліджувати перехідні процеси в різних режимах роботи.

### Загальна структура моделі

Імітаційна модель електропривода побудована на основі математичного опису синхронного двигуна з постійними магнітами, системи векторного керування та каскадної структури контурів регулювання. Такий підхід дозволяє максимально наблизити модель до реальних умов роботи електропривода рульової рейки.

### Основу моделі складають:

- математична модель синхронного двигуна з постійними магнітами;
- система векторного керування FOC;
- вкладена структура контурів регулювання «струм – швидкість – положення»;
- блоки формування задавального сигналу;
- система зворотних зв'язків за струмом, швидкістю та положенням.

Система векторного керування забезпечує незалежне регулювання складових струму по осях (d) та (q), що дозволяє розділити процес формування магнітного потоку і електромагнітного моменту двигуна. Це особливо важливо для рульового електропривода, де необхідно забезпечити високу точність і швидкодію при зміні керувального впливу.

### Модель з керуванням від водія

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

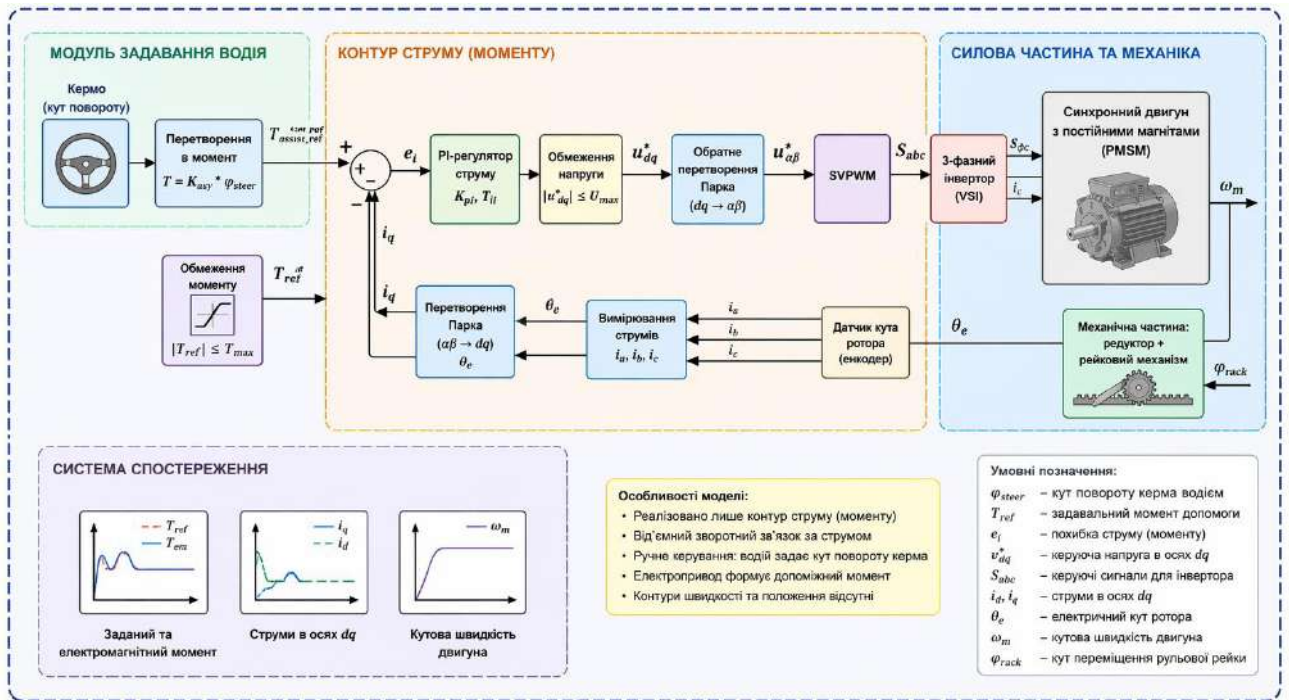


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель електропривода рульової рейки з ручним керуванням

На рисунку 23 представлена імітаційна модель електропривода рульової рейки, в якій реалізовано ручний режим керування з боку водія.

У даній конфігурації система містить лише внутрішній контур струму та від'ємний зворотний зв'язок за струмом. У такому випадку електропривод не формує самостійно положення рульової рейки, а лише створює додатковий електромагнітний момент, який полегшує зусилля водія на кермі.

Керування в даному режимі здійснюється за моментом, тобто без використання зовнішніх контурів швидкості та положення. Такий принцип відповідає роботі класичного електропідсилювача рульового керування, коли водій задає необхідний кут повороту, а електропривод компенсує частину механічного навантаження.

У результаті використання лише контуру струму забезпечується висока швидкодія системи та мінімальна затримка у формуванні допоміжного

моменту, що позитивно впливає на комфорт керування та чутливість рульового механізму.

### Модель для безпілотного керування

На рисунку 24 наведено розширену модель електропривода, яка може бути застосована у системах автономного або напіваавтономного керування транспортним засобом.

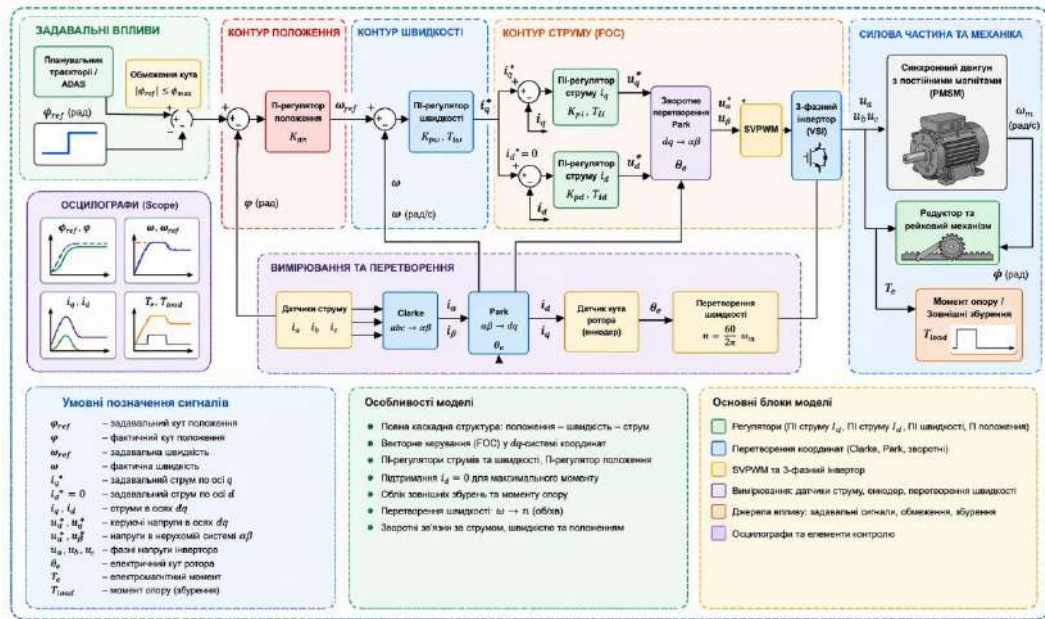


Рисунок 4.2 – Імітаційна модель електропривода для безпілотного керування

### Модель для безпілотного керування

На рисунку 4.2 наведено розширену імітаційну модель електропривода рульової рейки, орієнтовану на використання в системах автоматизованого, напіваавтономного та автономного керування транспортним засобом. На відміну від моделі ручного керування, у даній конфігурації реалізовано повну каскадну структуру регулювання, яка включає контури положення, швидкості та струму.

Такий підхід дозволяє не лише формувати допоміжний електромагнітний момент, але й забезпечувати автоматичне відпрацювання заданого кута повороту рульової рейки відповідно до команд, отриманих від

систем планування траєкторії, модулів стабілізації або систем допомоги водієві.

#### Структура системи керування

У розширеній моделі реалізовано три вкладені контури регулювання: внутрішній контур струму, який забезпечує формування електромагнітного моменту двигуна;

проміжний контур швидкості, що задає необхідну швидкість зміни кута повороту;

зовнішній контур положення, який відповідає за точне відпрацювання заданого кута рульової рейки.

Подібна каскадна структура дозволяє забезпечити розділення контурів за швидкодією: найшвидшим є контур струму, дещо повільнішим — контур швидкості, а найбільш інерційним — контур положення. Завдяки цьому система зберігає стійкість навіть при різкій зміні задавального сигналу або появі зовнішніх збурень.

#### Основні функціональні блоки моделі

До складу моделі входять регулятори, перетворювальні блоки, вимірювальні елементи та засоби формування зовнішніх впливів.

#### Регулятори

Для забезпечення необхідної якості керування використовуються такі регулятори:

ПІ-регулятор струму по осі (q), який формує електромагнітний момент двигуна;

ПІ-регулятор струму по осі (d), що підтримує умову

$$i_d = 0;$$

ПІ-регулятор швидкості;

пропорційний регулятор положення.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Підтримання нульового значення складової іd дозволяє реалізувати класичне FOC-керування синхронним двигуном з постійними магнітами та забезпечити незалежне регулювання потоку і моменту.

#### Перетворення координат і сигналів

У моделі використано систему координат dq, що є типовою для векторного керування електродвигунами. Для переходу між фазною системою координат та обертовою системою застосовуються перетворення Clarke та Park:

перетворення Clarke:

$$abc \rightarrow \alpha\beta;$$

перетворення Park:

$$\alpha\beta \rightarrow dq.$$

Після формування керувальних впливів виконуються зворотні перетворення, які забезпечують отримання сигналів для інвертора та фаз двигуна.

Крім того, у моделі передбачено блок перетворення кутової швидкості з радіан за секунду в оберти за хвилину:

$$\omega \rightarrow n.$$

#### Вимірювальні та контрольні елементи

Для аналізу роботи системи в моделі використовуються осцилографи та блоки контролю, які дозволяють спостерігати за зміною струму, швидкості, положення та моменту у часі. Окремо реалізовано елементи порівняння задавальних і фактичних значень, що дозволяє визначати похибку регулювання на кожному рівні каскадної структури.

Наявність таких блоків є важливою для оцінювання стійкості системи, швидкодії та якості перехідних процесів при зміні режимів роботи.

#### Джерела впливу та збурень

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

У моделі передбачено можливість задавання різних режимів роботи за допомогою блоків формування задавального сигналу. Додатково можуть моделюватися зовнішні збурення, пов'язані зі зміною моменту опору, дорожніх умов або додаткових навантажень на рульовий механізм.

Це дозволяє оцінити працездатність системи не лише в номінальному режимі, а й у випадках різких змін навантаження, що є особливо важливим для систем автономного керування.

#### Особливості реалізації моделі

Особливістю розробленої моделі є використання принципів векторного керування та вкладеної структури контурів регулювання. Реалізація зворотних зв'язків за струмом, швидкістю та положенням дозволяє досягти високої точності позиціювання та стабільної роботи електропривода.

Отримана модель може бути використана як основа для подальших досліджень, пов'язаних із синтезом адаптивних регуляторів, компенсацією зовнішніх збурень, оптимізацією параметрів електропривода та інтеграцією системи у комплекси автономного водіння, такі як ADAS.

#### Висновок до розділу

Імітаційне моделювання підтвердило працездатність розробленої системи керування електроприводом рульової рейки та показало, що запропонована структура забезпечує стійку роботу в різних режимах експлуатації. Отримані результати свідчать про коректність вибраних параметрів регуляторів, достатню швидкодію контурів керування та прийнятну якість перехідних процесів.

Залежно від конфігурації системи електропривод може функціонувати як у режимі допоміжного рульового керування за участю водія, так і в повністю автоматизованому режимі без безпосереднього втручання людини. У першому випадку електропривод формує лише допоміжний момент, зменшуючи фізичне навантаження на водія, тоді як у другому — забезпечує

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

точне відпрацювання заданого кута повороту відповідно до команд системи керування.

Таким чином, розроблена система має достатній потенціал для використання не лише в традиційних електропідсилювачах рульового керування, але й у перспективних системах автоматизованого та автономного водіння. Це створює передумови для подальшого впровадження електропривода у сучасні транспортні засоби, оснащені функціями активної безпеки, автоматичного утримання смуги руху та комплексами ADAS.

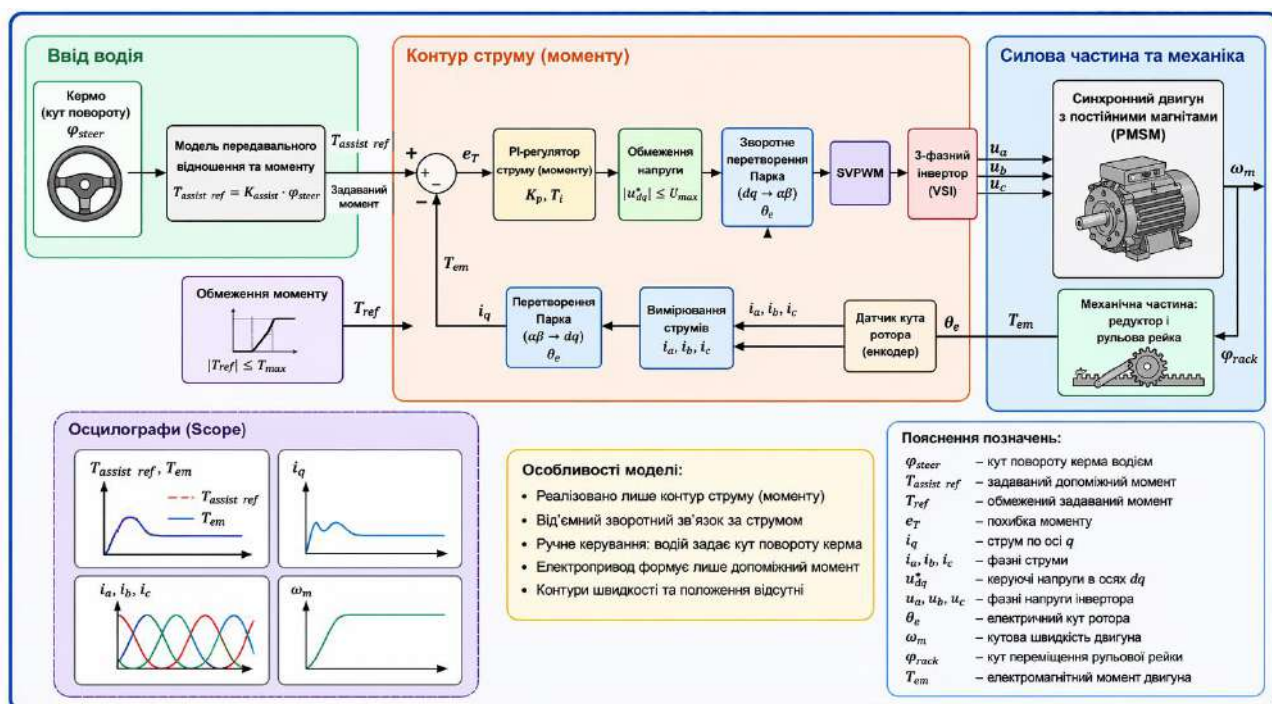


Рисунок 4.3 – Імітаційна модель електропривода рульової рейки (ручне керування)

Таблиця 4.1 - Переклад основних блоків (з твого рисунка)

Оригінал	Українською
Speed	Швидкість
Position	Положення
Регулятор швидкості	Регулятор швидкості

Оригінал	Українською
Регулятор тока Iq	Регулятор струму Iq
Регулятор тока Id	Регулятор струму Id
abc → dq	Перетворення Кларка-Парка
dq → abc	Зворотнє перетворення
Current	Струм
Converter	Перетворювач (інвертор)
Motor	Синхронний двигун
Scope	Осцилограф

Отримані результати імітаційного моделювання підтверджують адекватність побудованої математичної моделі електропривода рульової рейки та коректність прийнятих припущень щодо структури системи керування. Аналіз перехідних процесів показав, що синтезовані контури струму, швидкості та положення забезпечують стійку роботу електропривода, високу точність відпрацювання задавальних сигналів і прийнятні динамічні характеристики.

Відповідність розрахункових та експериментально отриманих характеристик свідчить про правильність виконаного синтезу регуляторів, вибору параметрів системи та ефективність застосованих принципів векторного керування. Отримані результати підтверджують можливість практичного використання розробленої системи як у традиційних електропідсилювачах рульового керування, так і в сучасних системах автоматизованого та автономного водіння.

Таким чином, побудована модель може бути використана як основа для подальших досліджень, пов'язаних із вдосконаленням алгоритмів керування, адаптацією до змінних режимів роботи, компенсацією зовнішніх збурень та

інтеграцією електропривода у комплекси ADAS і безпілотного керування транспортними засобами.

Результати даного дослідження передбачається використати у подальшому під час проєктування та вдосконалення систем керування безпілотними транспортними засобами. Розроблені математичні моделі, алгоритми регулювання та принципи побудови електропривода можуть бути адаптовані для використання в системах автоматичного рульового керування, утримання транспортного засобу в смузі руху та виконання маневрів без участі водія.

Як продемонстровано на рисунках 4.3 та 4.4, підприємством успішно завершено етап проєктування та виготовлення власного випробувального стенда електропідсилювача кермової рейки автомобіля. Створений стенд призначений для проведення експериментальних досліджень, перевірки працездатності електропривода, відпрацювання алгоритмів керування та подальшої інтеграції розроблених технічних рішень у перспективні проєкти.

Наявність власного випробувального обладнання створює можливість виконання повномасштабних експериментів у реальних умовах, уточнення параметрів математичної моделі та перевірки ефективності синтезованих регуляторів. Це дозволяє суттєво скоротити час розроблення нових систем, знизити витрати на їх адаптацію та підвищити достовірність отриманих результатів.

Отримані результати та напрацювання можуть бути використані при створенні конкурентоспроможних систем керування безпілотними транспортними засобами, орієнтованих на впровадження як на українському, так і на міжнародному ринку автомобілебудування. Зокрема, розроблена система може стати складовою комплексів автоматизованого керування, активної безпеки та систем ADAS, що використовуються у сучасних транспортних засобах.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83



Рисунок 4.4 – Стенд електропідсилювача кермової рейки автомобіля

## 5 ФІНАНСОВИЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

### 5.1 Оцінка комерційного потенціалу та перспективності дослідження з позицій ресурсоефективності

Даний розділ присвячений визначенню економічних показників проектування електропривода рульової рейки транспортного засобу з урахуванням принципів ресурсоефективності та ресурсозбереження. Особлива увага приділяється оцінці доцільності впровадження розробленої системи, визначенню її ринкового потенціалу та можливостей комерціалізації.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання матеріальних, енергетичних та фінансових ресурсів при створенні сучасних мехатронних систем керування транспортними засобами. У сучасних умовах розвитку автоматизованого та автономного транспорту особливого значення набуває розроблення електроприводів, які поєднують високу точність, швидкодію, надійність та економічну доцільність.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Досягнення поставленої мети забезпечується вирішенням таких основних завдань:

оцінка конкурентоспроможності розроблюваного електропривода;  
визначення перспектив його практичного впровадження;  
планування етапів виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт;  
формування бюджету проєкту з урахуванням принципів ресурсозбереження;

оцінка потенційного економічного ефекту від впровадження результатів дослідження.

Потенційні споживачі результатів дослідження

Для визначення комерційного потенціалу результатів дослідження доцільно провести аналіз цільового ринку із застосуванням методів сегментування. Сегментування ринку являє собою процес поділу потенційних споживачів на окремі групи, кожна з яких характеризується певними технічними, економічними або функціональними вимогами до продукції.

У межах даної роботи доцільно виконати сегментування за критерієм точності керування, оскільки для різних сфер застосування електропривода рульової рейки висуваються різні вимоги до якості позиціонування, швидкодії та надійності системи. Наприклад, для традиційних систем електропідсилювача керма достатнім є забезпечення допоміжного моменту, тоді як для автоматизованих і безпілотних транспортних засобів необхідна висока точність відпрацювання кута повороту та стабільність роботи при змінних зовнішніх впливах.

Крім того, доцільно виділити функціональні сегменти ринку, у межах яких можуть бути використані результати дослідження:

проєктування та виробництво систем електропривода;  
монтаж, налаштування та пусконаладжувальні роботи;  
технічне обслуговування, діагностика та ремонт;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

інтеграція електропривода у системи автоматизованого керування;  
використання в комплексах ADAS та безпілотного транспорту.

З урахуванням зазначених підходів виконано сегментування потенційних споживачів за галузевою ознакою. До основних груп споживачів можуть бути віднесені:

- підприємства автомобілебудування;
- виробники систем рульового керування;
- компанії, що займаються розробленням безпілотних транспортних засобів;
- сервісні та ремонтні підприємства;
- науково-дослідні установи та конструкторські бюро;
- університети та навчальні лабораторії, які займаються дослідженнями у сфері мехатроніки та автомобільної електроніки.

Результати сегментування доцільно узагальнити в таблиці 5.1, де для кожної групи споживачів можуть бути наведені основні потреби, вимоги до системи та очікуваний напрям використання розробленого електропривода.

Таблиця 5.1 – Сегментування комерційних організацій

Тип електропривода	Проектування і виробництво	Монтаж і пусконаладження	Обслуговування і ремонт
Електроприводи постійного струму з датчиками кута	✓	✓	✓
Асинхронні електроприводи з датчиками кута	✓	✓	✓

Тип електропривода	Проектування і виробництво	Монтаж і пусканалагодження	Обслуговування і ремонт
Синхронні електроприводи з датчиками кута	✓	✓	✓

### Висновки за результатами сегментування

На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш поширеними сегментами ринку залишаються системи електроприводів постійного струму та асинхронні електроприводи, оснащені датчиками кутового переміщення. Такі системи широко використовуються завдяки відносно простій конструкції, відпрацьованим технічним рішенням та значному рівню уніфікації.

Водночас стратегічно перспективним напрямом є розвиток синхронних електроприводів із високоточними системами зворотного зв'язку. Саме такі системи дозволяють забезпечити підвищену точність позиціонування, високу швидкодію та ефективну роботу в умовах змінних навантажень, що є особливо важливим для транспортних систем нового покоління.

Найбільш привабливими сегментами ринку є напрями, пов'язані з проектуванням, виробництвом та впровадженням синхронних електроприводів для транспортних засобів, роботизованих платформ, систем автоматизованого керування та комплексів ADAS. Особливо перспективним є використання таких електроприводів у безпілотних транспортних засобах, де висуваються підвищені вимоги до точності, надійності та безпеки роботи.

Очікується, що впровадження розробленого електропривода дозволить підвищити енергоефективність системи, покращити точність керування та збільшити ресурс елементів рульового механізму. Крім того, застосування сучасних алгоритмів регулювання сприятиме зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню загальної ефективності транспортного засобу.

## Аналіз конкурентних технічних рішень

Проведення аналізу конкурентних технічних рішень є важливим етапом обґрунтування доцільності розроблення електропривода рульової рейки транспортного засобу. Такий аналіз дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони існуючих рішень, визначити перспективні напрями вдосконалення та сформулювати вимоги до майбутньої системи керування.

У сучасних умовах розвитку мехатронних систем транспортних засобів особливої актуальності набуває застосування синхронних електроприводів з постійними магнітами. Порівняно з традиційними двигунами постійного струму вони мають низку важливих переваг:

- відсутність щітково-колекторного вузла;
- підвищений ресурс роботи;
- зниження потреби в технічному обслуговуванні;
- менші втрати енергії;
- вища точність керування;
- кращі динамічні характеристики.

Додатковою перевагою синхронних електроприводів є можливість реалізації сучасних алгоритмів векторного керування, які дозволяють незалежно регулювати потік і момент двигуна. Це забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості, швидке формування моменту та високу точність позиціонування.

Крім того, використання синхронних двигунів сприяє уніфікації конструктивних елементів та спрощує технічне обслуговування. У багатьох випадках вартість потужних двигунів постійного струму є співставною або навіть вищою за вартість синхронного електродвигуна разом із силовим перетворювачем і системою керування. При цьому синхронні системи мають кращі енергетичні показники та вищу надійність.

## Оцінка конкурентоспроможності

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

Для кількісного порівняння різних технічних рішень доцільно використовувати метод зважених коефіцієнтів, який дозволяє врахувати значущість окремих критеріїв оцінювання. До таких критеріїв можуть бути віднесені:

- точність керування;
- енергоефективність;
- надійність;
- складність конструкції;
- вартість реалізації;
- витрати на технічне обслуговування;
- можливість інтеграції в системи автономного керування;
- ресурс роботи.

Результати оцінювання доцільно узагальнити у таблиці 5.2, де для кожного типу електропривода визначаються вагові коефіцієнти та інтегральний показник конкурентоспроможності.

Таблиця 5.2 – Оцінка конкурентоспроможності електроприводів

Критерій	Вага	ЕП пост. струму (бал)	Синхронний ЕП (бал)	ЕП пост. струму	Синхронний ЕП
Технічні критерії					
ККД	0,12	4	5	0,48	0,60
Діапазон регулювання швидкості	0,20	5	5	1,00	1,00
Надійність	0,10	4	5	0,40	0,50

Критерій	Вага	ЕП пост. струму (бал)	Синхронний ЕП (бал)	ЕП пост. струму	Синхронний ЕП
Перевищення встановленої потужності	0,15	4	5	0,60	0,75
Простота керування	0,13	4	3	0,52	0,39
Габарити	0,12	4	5	0,48	0,60
Економічні критерії					
Вартість	0,08	3	4	0,24	0,32
Конкурентоспроможність продукту	0,05	3	4	0,15	0,20
Рівень проникнення на ринок	0,05	5	4	0,25	0,20
Підсумок	1,00			4,02	4,22

За результатами проведеного аналізу встановлено, що синхронний електропривод має вищий інтегральний показник конкурентоспроможності — 4,22 порівняно з 4,02 для електропривода постійного струму. Це свідчить про більш високий рівень технічної досконалості, енергоефективності та перспективності його використання у сучасних системах рульового керування.

Основними перевагами синхронного електропривода є:

підвищений коефіцієнт корисної дії;

менші масогабаритні показники;

вища надійність експлуатації;

розширені можливості керування;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАТ 26 23074 000 ПЗ

Арк.

90

конкурентна вартість у складі сучасних мехатронних систем.

Таким чином, використання синхронного електропривода є технічно та економічно доцільним для систем електропідсилювача рульового керування, особливо у складі перспективних транспортних засобів, оснащених функціями автоматизованого або автономного керування.

#### Технологія QuaD (QUality ADvisor)

Технологія QuaD є сучасним інструментом комплексної оцінки якості технічної розробки та її комерційної перспективності. Її використання дозволяє обґрунтовано оцінити рівень інноваційності проєкту, визначити його сильні та слабкі сторони, а також сформулювати рекомендації щодо доцільності подальшого фінансування й впровадження.

Методологія QuaD базується на визначенні інтегрального показника якості шляхом обчислення середньозважених значень окремих критеріїв. Усі показники оцінюються експертним методом за шкалою від 1 до 100 балів, де 1 бал відповідає мінімальному рівню розвитку характеристики, а 100 балів — максимальному.

До основних груп критеріїв належать:

Показники комерційного потенціалу:

вплив продукту на результати діяльності підприємства;

перспективність цільового ринку;

можливість комерціалізації;

технологічність виробництва;

фінансова ефективність;

рівень правового захисту.

Показники якості розробки:

енергоефективність;

надійність;

довговічність;

ергономічність;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ремонтпридатність;  
рівень уніфікації;  
матеріаломісткість;  
функціональні можливості системи.

За результатами проведеного оцінювання інтегральний показник якості та перспективності розробки становить:

Отримане значення свідчить про високий рівень технічної досконалості системи, достатню комерційну привабливість та доцільність подальшого впровадження розробки.

Найвищі оцінки отримали показники:

надійність — 90 балів;  
безпека — 100 балів;  
зручність експлуатації — 90 балів.

Разом з тим нижчі оцінки були характерні для рівня інтеграційних можливостей, інтелектуального інтерфейсу та обсягів фінансування, що визначає напрями подальшого вдосконалення системи.

SWOT-аналіз проєкту

Для стратегічної оцінки ефективності розробки використано метод SWOT-аналізу, який дозволяє комплексно дослідити внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на перспективність проєкту.

Сильні сторони проєкту

висока надійність системи;  
використання сучасних матеріалів;  
високий рівень точності та якості виготовлення;  
наявність кваліфікованого персоналу;  
можливість інтеграції в системи автоматизованого керування.

Слабкі сторони

відсутність достатнього досвіду експлуатації;  
недостатньо розвинена система збуту;

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висока вартість окремих компонентів;  
потенційні ризики відповідальності при аварійних ситуаціях.  
Можливості розвитку  
вихід на ринок з інноваційним продуктом;  
зростання попиту на системи автоматизованого керування;  
розширення використання електромеханічних систем у транспорті;  
зниження собівартості за рахунок впровадження нових технологій;  
розширення співпраці з виробниками транспортних засобів.

Потенційні загрози  
посилення конкуренції;  
економічна нестабільність;  
регуляторні обмеження;  
ризик недостатнього попиту на нові технології;  
перебої у постачанні комплектуючих.

Узагальнення результатів SWOT-аналізу

Проведений аналіз показує, що головною конкурентною перевагою проєкту є висока надійність системи та використання сучасних технічних рішень. Саме ці фактори формують основу ринкової стійкості розробки та створюють передумови для її успішного впровадження.

Водночас ключовими ризиками залишаються недостатня апробація системи в реальних умовах експлуатації, складність організації серійного виробництва та необхідність формування ефективної маркетингової стратегії.

Отримані результати свідчать про те, що досліджуваний електропривод рульової рейки має високий потенціал для практичного впровадження та комерціалізації. Розроблена система характеризується високими технічними показниками, достатнім рівнем конкурентоспроможності та перспективністю використання у сучасних транспортних засобах.

Разом з тим для підвищення ефективності впровадження необхідно враховувати ринкові ризики, вдосконалювати інтеграційні можливості

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

системи та розширювати сфери її застосування, зокрема у транспортних засобах, оснащених системами ADAS та елементами автономного керування. Визначення можливих альтернатив проведення наукових досліджень

У попередніх підрозділах було розглянуто підходи, що дозволяють оцінити перспективність розробки та сформувавши можливі напрями її подальшого вдосконалення. До таких підходів належать технологія QuaD, аналіз конкурентних технічних рішень і SWOT-аналіз, які дозволяють оцінити як технічні, так і економічні аспекти проєкту.

Додатково до зазначених методів можуть бути використані функціонально-вартісний аналіз та метод Кано. Їх застосування дозволяє більш детально дослідити споживчі властивості продукції, визначити найбільш важливі для споживача характеристики та оптимізувати параметри системи з урахуванням вимог ринку.

Разом з тим більшість наведених методів орієнтовані на вдосконалення розробки, яка перебуває на етапах створення макета, прототипу або готового виробу. Оскільки розроблюваний електропривод рульової рейки транспортного засобу знаходиться саме на таких стадіях життєвого циклу, доцільно визначити основні альтернативні напрями подальшого розвитку:

удосконалення алгоритмів керування, зокрема впровадження адаптивних, прогнозуючих або інтелектуальних методів регулювання;

оптимізація конструктивних параметрів електропривода, включаючи зменшення маси, габаритів і матеріаломісткості;

підвищення енергоефективності системи шляхом використання сучасних силових перетворювачів;

покращення інтеграційних можливостей для взаємодії з комплексами ADAS та системами автономного керування;

підвищення надійності та ремонтпридатності конструкції.

З огляду на стадію розвитку розробки застосування морфологічного аналізу є недоцільним, оскільки основні конструктивні та функціональні

рішення вже визначені. Подальші дослідження повинні бути спрямовані переважно на оптимізацію вже прийнятих рішень, уточнення параметрів системи та підвищення її експлуатаційної ефективності.

## 5.2 Планування науково-дослідних робіт

### Структура робіт у рамках наукового дослідження

Для виконання науково-дослідних і проєктних робіт формується робоча група, до складу якої входять керівник проєкту та інженер-виконавець. Такий склад команди є достатнім для реалізації основних етапів дослідження, оскільки дозволяє поєднати наукове керівництво, технічне проєктування та виконання практичних робіт.

Кожному етапу дослідження відповідає визначений перелік завдань, виконавців та очікуваних результатів. Чіткий розподіл функцій між учасниками проєкту забезпечує ефективне використання трудових ресурсів, своєчасне виконання робіт та можливість оперативного контролю за ходом дослідження.

До основних етапів виконання робіт доцільно віднести:

- аналіз літературних джерел та існуючих технічних рішень;
- формування технічного завдання;
- розроблення математичної моделі електропривода;
- синтез контурів керування;
- створення імітаційної моделі в MATLAB Simulink;
- проведення імітаційного моделювання;
- аналіз отриманих результатів;
- оцінку економічної доцільності та конкурентоспроможності;
- підготовку звітних матеріалів.

Послідовність виконання етапів, зміст робіт та розподіл відповідальності доцільно узагальнити у таблиці 5.3.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

Таблиця 5.3 – Етапи науково-дослідних робіт та розподіл виконавців

Етап	№	Зміст робіт	Виконавець
Розробка технічного завдання	1	Формування та затвердження технічного завдання	Керівник
Вибір напрямку досліджень	2	Аналіз літературних джерел та наукових матеріалів	Інженер
	3	Визначення напрямку дослідження	Керівник, інженер
	4	Календарне планування робіт	Керівник
Теоретичні дослідження	5	Аналіз технічного завдання	Інженер
	6	Розрахунок і вибір силового обладнання	Інженер
	7	Розрахунок статичних характеристик	Інженер
	8	Розробка функціональної схеми електропривода	Інженер
Оцінка результатів	9	Аналіз ефективності отриманих результатів	Керівник
Оформлення результатів	10	Підготовка пояснювальної записки та технічної документації	Інженер

Запропонована структура організації науково-дослідних робіт забезпечує:

- послідовність виконання етапів дослідження;
- чіткий розподіл відповідальності між виконавцями;
- ефективне використання трудових та часових ресурсів;
- підвищення якості отриманих результатів.

## Розробка графіка проведення наукового дослідження

У попередніх підрозділах було розглянуто підходи, які дозволяють оцінити перспективність розробки та визначити можливі напрями її подальшого вдосконалення. До таких підходів належать технологія QuaD, аналіз конкурентних технічних рішень і SWOT-аналіз, що дають можливість комплексно оцінити як технічні, так і економічні аспекти проєкту.

Додатково для поглибленого дослідження можуть бути використані функціонально-вартісний аналіз та метод Кано. Їх застосування дозволяє визначити найбільш важливі для споживача характеристики продукції, оцінити співвідношення між вартістю та функціональними можливостями системи, а також оптимізувати параметри електропривода відповідно до вимог ринку.

Разом з тим більшість зазначених методів орієнтовані на вдосконалення розробок, які перебувають на стадіях створення макета, прототипу або готового виробу. Оскільки розроблюваний електропривод рульової рейки знаходиться саме на таких етапах життєвого циклу, доцільно визначити основні альтернативні напрями його подальшого розвитку:

удосконалення алгоритмів керування, зокрема шляхом впровадження адаптивних, прогнозуючих та інтелектуальних методів регулювання;

оптимізація конструктивних параметрів електропривода, включаючи зменшення маси, габаритів та матеріаломісткості;

підвищення енергоефективності системи за рахунок застосування сучасних силових перетворювачів та оптимізації режимів роботи;

розширення інтеграційних можливостей для взаємодії з комплексами ADAS і системами автономного керування;

підвищення надійності, ремонтпридатності та ресурсу роботи основних вузлів.

З огляду на стадію розвитку проєкту застосування морфологічного аналізу є недоцільним, оскільки основні конструктивні та функціональні

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

рішення вже сформовані. Подальші дослідження мають бути спрямовані переважно на оптимізацію прийнятих технічних рішень, уточнення параметрів системи та підвищення її експлуатаційної ефективності.

## 5.2 Планування науково-дослідних робіт

Для виконання науково-дослідних і проєктних робіт формується робоча група, до складу якої входять керівник проєкту та інженер-виконавець. Такий склад команди є достатнім для реалізації основних етапів дослідження, оскільки дозволяє поєднати наукове керівництво, технічне проєктування та виконання практичних робіт.

Кожному етапу дослідження відповідає визначений перелік завдань, виконавців та очікуваних результатів. Чіткий розподіл функцій між учасниками проєкту забезпечує ефективне використання трудових ресурсів, своєчасне виконання робіт і можливість оперативного контролю за реалізацією проєкту.

До основних етапів виконання робіт доцільно віднести:

- аналіз літературних джерел та існуючих технічних рішень;
- формування технічного завдання;
- розроблення математичної моделі електропривода;
- синтез контурів керування;
- створення імітаційної моделі в MATLAB Simulink;
- проведення імітаційного моделювання;
- аналіз отриманих результатів;
- оцінку економічної доцільності та конкурентоспроможності;
- підготовку звітних матеріалів.

Послідовність виконання етапів, зміст робіт та розподіл відповідальності доцільно узагальнити у таблиці 5.4.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

Таблиця 5.4 – Тривалість виконання робіт

№	Вид роботи	Виконавець	Робочі дні	Календарні дні
1	Складання ТЗ	Керівник	1,4	2
2	Аналіз літератури	Інженер	5,2	8
3	Вибір напрямку	Керівник, інженер	1,4	1
4	Планування	Керівник	1,4	2
5	Аналіз ТЗ	Інженер	4	6
6	Розрахунок обладнання	Інженер	4,2	6
7	Статичні характеристики	Інженер	5	7
8	Розробка схеми	Інженер	5,8	9
9	Оцінка результатів	Керівник	1,8	3
10	Оформлення документації	Інженер	7	10

Загальна тривалість виконання проєкту становить приблизно 54–60 календарних днів, що відповідає типовим строкам виконання науково-дослідних і проєктних робіт аналогічного рівня складності. Такий часовий інтервал є достатнім для послідовного виконання всіх основних етапів — від аналізу літературних джерел і розроблення математичної моделі до проведення імітаційного моделювання та оцінки економічної ефективності.

Використання діаграми Ганта дозволяє раціонально організувати процес виконання робіт, оптимізувати часові витрати та забезпечити узгодженість дій між учасниками проєкту. Крім того, застосування такого інструменту сприяє уникненню простоїв, своєчасному виявленню відхилень від графіка та підвищує ефективність контролю за виконанням окремих етапів дослідження.

### 5.3 Бюджет витрат на проєктування

Матеріальні витрати на виконання науково-дослідної роботи включають витрати на канцелярські товари, папір, витратні матеріали для друку, а також

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

інші допоміжні ресурси, необхідні для підготовки графічних матеріалів, оформлення звітної документації та друку проміжних результатів дослідження.

До основних статей матеріальних витрат доцільно віднести:  
папір формату А4 для друку текстових та графічних матеріалів;  
картриджі або тонер для принтера;  
канцелярські товари;  
витрати на друк схем, рисунків і таблиць;  
носії інформації для збереження результатів дослідження.

Розрахунок матеріальних витрат доцільно виконувати з урахуванням актуальних цін в Україні станом на 2026 рік. Отримані результати рекомендується узагальнити у таблиці 5.5, де для кожної статті витрат зазначаються кількість, ціна за одиницю та загальна вартість.

Таблиця 5.5 – Матеріальні витрати

Найменування	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Витрати, грн
Канцелярський набір	1	250	250
Папір для принтера (пачка 500 арк.)	1	300	300
Картридж / фарба для принтера	1	700	700
Разом			1250 грн

Загальні матеріальні витрати на виконання проектування становлять близько 1250 грн, що є незначною часткою у структурі загального бюджету розробки. Невисокий рівень матеріальних витрат пояснюється переважанням аналітичних, розрахункових та програмних робіт, які не потребують значних витрат на сировину, комплектуючі або спеціалізоване обладнання.

Отримані результати свідчать про високу ресурсоефективність дослідження, низьку матеріаломісткість проекту та доцільність його реалізації навіть за умов обмеженого фінансування. Це є важливою перевагою розробки, особливо на ранніх етапах створення прототипу та проведення експериментальних досліджень.

Витрати на заробітну плату виконавців

Основна заробітна плата наукових та інженерних працівників визначається з урахуванням трудомісткості виконаних робіт, посадових окладів, преміальних виплат і доплат.

Місячний посадовий оклад визначається за формулою

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \quad 5.1$$

де  $Z_{TC}$  — тарифна ставка;

$k_{пр}$  — преміальний коефіцієнт;

$k_d$  — коефіцієнт доплат.

Для керівника проекту при тарифній ставці 20000 грн місячна заробітна плата становить

$$Z_M = 20000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) = 30000 \text{ грн.}$$

Для інженера при тарифній ставці 18000 грн місячна заробітна плата дорівнює

$$Z_M = 18000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) = 27000 \text{ грн.}$$

Середньоденна заробітна плата визначається за формулою

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot 11,2}{223} \quad 5.2$$

де 223 — середня кількість робочих днів на рік, а коефіцієнт 11,2 враховує середню кількість місяців розрахункового періоду.

Для керівника проекту середньоденна заробітна плата становить

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

$$Z_{\text{дн}} = \frac{30000 \cdot 11,2}{223} \approx 1507 \text{ грн.}$$

Для інженера середньоденна заробітна плата дорівнює

$$Z_{\text{дн}} = \frac{27000 \cdot 11,2}{223} \approx 1357 \text{ грн.}$$

Основна заробітна плата виконавців визначається множенням середньоденної заробітної плати на кількість днів роботи:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

де  $T_p$  — тривалість виконання робіт у робочих днях.

Виконавець	Середньоденна ЗП, грн	Тривалість, днів	Основна ЗП, грн
Керівник	1507	5	7535
Інженер	1357	32	43424
Разом			50959 грн

#### 5.4 Висновок по розділу

У даному розділі було виконано комплексну економічну оцінку розробки електропривода рульової рейки транспортного засобу з урахуванням принципів ресурсоефективності та ресурсозбереження.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що застосування синхронного електропривода є технічно та економічно обґрунтованим. Це підтверджується результатами аналізу конкурентних технічних рішень, високими показниками енергоефективності, надійності та можливості інтеграції у сучасні системи керування транспортними засобами.

Загальна тривалість виконання проєкту становить близько 54 календарних днів, що відповідає нормативним строкам виконання науково-дослідних робіт подібного рівня складності. Основним ресурсом проєкту є

									Арк.
									102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>				

інтелектуальна праця інженера та керівника, що відображено у структурі витрат.

Загальний бюджет проєкту становить приблизно 99 тис. грн, що свідчить про доступність реалізації розробки навіть за умов обмеженого фінансування. При цьому найбільшу частку витрат займає фонд оплати праці, частка якого перевищує 59 %. Це є характерним для інженерних і науково-дослідних робіт, де основна цінність формується за рахунок знань, кваліфікації та часу виконавців.

Матеріальні витрати у структурі бюджету залишаються мінімальними, що підтверджує високу ресурсоефективність проєкту та невелику матеріаломісткість розробки. Усі розрахунки виконано відповідно до вимог чинного законодавства України, зокрема норм бухгалтерського обліку та податкового регулювання.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>				103

## ВИСНОВОК

Розробка електропривода рульової рейки відповідає сучасним вимогам щодо енергоефективності, надійності, точності керування та економічної доцільності. Запропонована система має високий потенціал практичного впровадження у сфері автомобілебудування та може бути використана як у традиційних електропідсилювачах рульового керування, так і у перспективних системах автоматизованого керування транспортними засобами.

Особливо перспективним є застосування розробленого електропривода у транспортних засобах, оснащених комплексами ADAS, системами автоматичного утримання смуги руху, активної безпеки та елементами безпілотного керування. Це підтверджує актуальність, наукову новизну та практичну значущість проведеного дослідження.

Розробка електропривода рульової рейки повною мірою відповідає сучасним вимогам до мехатронних систем транспортних засобів. Запропонована система характеризується високою енергоефективністю, надійністю, точністю керування та економічною доцільністю впровадження.

Застосування синхронного електропривода з векторним керуванням дозволяє забезпечити швидке формування електромагнітного моменту, високу точність позиціонування та стабільну роботу в різних режимах експлуатації. Водночас використання сучасних алгоритмів регулювання сприяє підвищенню ресурсу елементів рульового механізму, зниженню енергоспоживання та покращенню загальних експлуатаційних характеристик системи.

Проект має значний потенціал для практичного впровадження у сфері автомобілебудування. Розроблений електропривод може бути використаний не лише у традиційних системах електропідсилювача керма, але й у сучасних транспортних засобах, оснащених комплексами ADAS, системами автоматичного утримання смуги руху, активної безпеки та безпілотного керування. Це підтверджує актуальність, перспективність і практичну значущість виконаного дослідження.

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю. Електропривод : підручник. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2009. 504 с. ([pdf.lib.vntu.edu.ua](http://pdf.lib.vntu.edu.ua))
2. Видмиш А. А., Бондар В. І., Козловський В. О. Основи електропривода. Теорія та практика : навчальний посібник. Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2020. 387 с. ([repository.vsau.org](http://repository.vsau.org))
3. Воскобойник В. Е., Бородай В. А., Боровик Р. О., Нестерова О. Ю. Основи електропривода виробничих машин та комплексів : навчальний посібник. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с. ([elprivod.nmu.org.ua](http://elprivod.nmu.org.ua))
4. Яким Р. С. Приводи транспортних машин : навчальний посібник. Дрогобич : Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2020. 240 с. ([ДДПУ ім. І. Франка](http://ДДПУ ім. І. Франка))
5. Голодний І. М., Червінський Л. С., Жильцов А. В., Санченко О. В., Романенко О. І. Моделювання регульованого електропривода в системі MATLAB : навчальний посібник. Біла Церква : Білоцерківський національний аграрний університет, 2019. 266 с. ([rep.btsau.edu.ua](http://rep.btsau.edu.ua))
6. Гераїмчук М. Д. Моделювання систем у середовищі MATLAB-Simulink : навчальний посібник. Київ : Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2006. 120 с. ([ela.kpi.ua](http://ela.kpi.ua))
7. Пижов В. М. Електропривод: розрахунково-графічна робота : навчальний посібник. Київ : Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2021. 57 с. ([Google Drive](http://Google Drive))
8. Пижов В. М., Красношарпа Н. Д., Островерхов М. Я. Електропривод: механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму : навчальний

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

- посібник. Київ : Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2019. 198 с. ([Google Drive](#))
9. Автоматизований електропривод машин та установок : навчальний посібник. Київ : Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2021. 312 с. ([ela.kpi.ua](#))
10. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Калінов А. П. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів. Практикум і тестові завдання : навчальний посібник. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. ([document.kdu.edu.ua](#))
11. Гурко О. Г., Єрмоменко І. Ф. Аналіз та синтез систем автоматичного управління у MATLAB : навчальний посібник. Харків : Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2012. 284 с. ([karazin.ua](#))
12. Богомолів В. О., Гурко О. Г., Клименко В. І., Леонтєв Д. М., Красюк О. М. Моделювання систем управління в SIMULINK : навчальний посібник. Харків : Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2018. 220 с. ([karazin.ua](#))
13. Кошулінський М. Р. Розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами : кваліфікаційна робота магістра. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. ([Elartu](#))
14. Транспортні засоби з електричним приводом : електронний навчальний курс. Луцьк : Луцький національний технічний університет. ([tfklntu.lcloud.in.ua](#))

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

ДОДАТКИ

					<i>КвРАТ 26 23074 000 ПЗ</i>	Арк.
						107
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		