

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

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

“ ___ ” червня 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра

за напрямом підготовки – 6.050702 «Електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Електромеханічна система електровізка

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

Біляк Василь Васильович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник Желінський Микола Миколайович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Рецензент асист. Котлярова В.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки – 6.050702 електромеханіка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

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

« ____ » _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту**

Біляк Василь Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Електромеханічна система електровізка» ,
керівник проекту асистент Желінський М.М. _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Електровізок масою з людиною та всім обладнанням 225 кг, максимальною швидкістю 10 км/год та прискоренням 1.5 м/с, діаметром ходових коліс 0.33 м, числом ходових коліс 4.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. 1 Аналітичний огляд. 2 Розрахунок зусиль транспортного засобу, потужності та вибір двигуна. 3 Розробка функціональної схеми електроприводу. 4 Розробка прямого векторного керування моментом. 5 Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Загальний вигляд. Схема електрична принципова.

Графіки перехідних процесів. Структурна схема алгоритму прямого векторного керування моментом.

6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 05.03.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд. Опис технологічного процесу (установки)	01.04.2019	
2	Розрахунок зусиль транспортного засобу, потужності та вибір двигуна	15.04.2019	
3	Розробка функціональної схеми електроприводу	28.04.2019	
4	Синтез прямого векторного керування моментом	14.05.2019	
5	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи.	29.05.2019	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

М. М. Желінський

_____ (ініціали, прізвище)

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: «Електромеханічна система електровізка»

Київ – 2019 р.

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра містить 70 сторінок, 21 рисунки, 6 таблиць, 38 джерел інформації, 4 аркуші графічної частини.

Об'єкт дослідження – електропривод електромеханічної системи електровізка.

Мета роботи – виконати проектування електромеханічної системи електровізка з використанням асинхронного векторно регульованого електроприводу відповідно до вимог технічного завдання.

В ході роботи розроблено електропривод, що задовольняє умови технічного завдання.

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ, МОМЕНТ, ПОХИБКА, ІНВЕРТОР, ЕНКОДЕР, РЕГУЛЯТОРИ, ЕЛЕКТРОВІЗОК

					6.050702.5101.001.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бляк В. В.			Електромеханічна система електровізка Реферат	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Желінський М.М					6	70
Рецензент						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА каф. АЕМС - ЕП гр. ЕП-51		
Н. Контр.		Приймак Б. І.						
Затверд.		Пересада С. М.						

THE SUMMARY

The final qualifying paper of the bachelor's degree contains 70 pages, 21 figures, 6 tables, 38 sources of information, 4 sheets of graphic part.

The object of the study is the electric drive of the electromechanical system.

The purpose of the work is to carry out the design of the electromechanical system using an asynchronous vector controlled electric drive in accordance with the requirements of the technical specification.

In the course of work an electric drive was developed that satisfies the terms of the technical task.

**ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY CONVERTER,
ASYNCHRONOUS VECTOR CONTROLLED ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY
CONVERTER, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, STATIC AND DYNAMIC
CHARACTERISTICS**

					6.050702.5101.001.BR			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.	V Biliak				Electromechanical electrowaves system SUMMARY	L.		Pages
Checked	M. Zhelinskyi						7	70
Reviewer						«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA, gr. EP-51		
N. Contr.	B. Pryymak							
Approved.	S. Peresada							

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	9
1.1 Опис технологічних та конструктивних особливості електровізків.	9
1.2 Сучасні тенденції у розробці електроприводу візка з різними типами двигунів	15
1.3 Порівняння переваг та недоліків електродвигунів для візків.....	20
1.4 Вимоги до електроприводу візків.....	25
Висновок до розділу 1	26
2 РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ, ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ДВИГУНА	27
2.1 Розрахунок зусиль транспортного засобу.....	27
2.2 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	32
2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення	34
Висновки до розділу 2	37
3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	38
Висновки до розділу 3	41
4 РОЗРОБКА ПРЯМОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ	42
4.1 Постанова задачі керування моменту	42
4.1.1 Синтез векторного керування моментом	44
4.2.1 Синтез підсистеми потокозчеплення ротора	47
Висновки до розділу 4	54
5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	55
Висновки до розділу 5	64
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

В даному розділі буде розглянута історія, види, типи, описана технології у розробці електроприводів електровізка. наведено переваги, недоліки та вимоги до електроприводу електровізка.

Порівняно використання в електроприводі електровізка різних типів двигунів.

1.1 Опис технологічних та конструктивних особливості електровізків

Інвалідний візок – транспортний засіб (ТЗ) пересування, призначений для людей з фізичними порушеннями. За способом руху розрізняють: електровізки з електроприводом, та механічні з ручним приводом (тобто ті, якими рухає людина, обертаючи колеса). Також можливе переміщення візка іншою особою [1].

Електровізок [2]., так званий візок з електроприводом, являє собою кімнатний або дорожній варіант крісла-візка для людей з обмеженими можливостями, колеса якого приводяться в рух не фізичним зусиллям рук, а електропривода, що складається, як правило, з електричного двигуна (одного або двох), електронного блоку управління (контролера) і акумуляторних батарей, що забезпечують її живлення. Моторизовані інвалідні візки будуть корисні тим людям, яким важко самостійно пересуватися на візку ручного приводу або доводиться використовувати інвалідне крісло для поїздок на значні відстані або подолання складних ділянок.

Найдавніша згадка про візок [3] датується VI століттям. Це було зображення на сланцевому камені в Китаї. Відтак згадки про візок зустрічаються під час німецького Відродження, коли європейці починають виробляти крісла на коліщатах.

Більш-менш схожі на сучасні візки з'явилися 1760 року. Перший легкий [4] (зі сталевих трубок) візок сконструювали у 1933 році Гаррі Дженнінгс та його приятель з інвалідністю Герберт Еверест. Обидва побачили комерційний потенціал винаходу і згодом стали першими масовими виробниками інвалідних візків «Еверест і Дженнінгс».

Види інвалідних візків:

1. За типом приводу:

- Механічні для руху яких необхідні м'язові зусилля людини. Це прості візки, що забезпечують відносний комфорт. Їх доцільно використовувати під час недовгої реабілітації;
- Електричні, які оснащені електродвигуном і для руху не вимагають м'язових зусиль. та дозволяють людині здійснювати самостійні тривалі прогулянки, відвідувати публічні заходи і магазини.

2. Маса габаритні показники

1. «Легка», вага якої до 50 кг - гелієві акумулятори, 17-27А / год;
2. «Середня», вагою до 70 кг - гелієві акумулятори 32-45 А / год;
3. «Важка, вагою понад 70 кг - звичайні акумулятори 55А час і більш.

Прості моделі електровізків керуються за допомогою ручок, що знаходяться в прямому контакті з колесами. Більш складні і дорогі моделі керування з використанням окремого електропульта або джойстика, який вставляється в підлокітники.

Джойстик монтується в будь-якому з підлокітників, що дозволяє підлаштувати візок під особливості людини, наприклад розташувати пульт з боку робочої руки. Є можливість налаштувати керування [4].

Характеристики електровізків [5]:

- вага електровізка від 40 кг - 165 кг. Залежить від функціоналу, матеріалів коліс і сидіння, типу коліс, додаткових пристроїв;
- швидкість 6-10 км / год;
- ємність акумулятора визначає резерв руху від 10 км -40 км на одному заряді;

- колеса треба вибирати відповідно до планованої навантаженям
- задні, передньопривідні і з центральною віссю, суцільнолітні, пневматичні, з протекторами;

- вага людини від 40 кг до 180.

Сьогодні на ринку існує безліч інвалідних візків. Вони відрізняються один від одного типом приводу, технічними можливостями, набором наявних функцій, дизайном і, звичайно, вартістю. Існує кілька основних типів інвалідних візків. Поговоримо про них докладніше [6].

1. Кімнатні візки на (рис 1.1).

Такі візки призначені тільки для використання всередині приміщень. Як правило, вони не відрізняються великим набором функцій і налаштувань. При виборі такого візка слід звернути увагу на загальний розмір конструкції, оскільки вона повинна проходити в дверні прорізи.



Рисунок 1.1 – Кімнатний візок

2. Універсальний візок на (рис 1.2).

Ці інвалідні візки можна назвати найбільш затребуваними. Їх можна використовувати в приміщеннях і на вулиці. Вони володіють ідеальним співвідношенням ціни, якості та функціональності. Такий тип візків підходить для людей із середнім рівнем активності. Вони

володіють можливістю різних регулювань, забезпечують надійність і високий рівень комфорту.



Рисунок 1.2 – Універсальний візок

3. Активні візки на (рис 1.3).

Дані візки стануть оптимальним варіантом для людей бажаючих вести активний спосіб життя, займатися спортом і т. д. Такі моделі поєднують в собі простоту управління, маневреність, легкість, комфорт і надійність. Оскільки, часом, такі візки повинні протистояти великим, навіть екстремальних навантажень, то для їх виробництва застосовують надміцні, але легкі матеріали, такі як алюміній і титан.



Рисунок 1.3 – Активний візок

4. Багатофункціональні візки на (рис 1.4).

Основними перевагами даних візків є можливість різних регулювань, здатність підлаштовуватися під індивідуальні потреби та настройки користувача. Вони мають функції кута підйому підніжок, відкидання спинки, що дозволяє в деяких моделях навіть спати. Іноді візки додатково комплектуються фіксаторами ніг, рук і голови.



Рисунок 1.4 – Багатофункціональний візок

5. Електровізки що на (рис 1.5).

Електровізки з електричним приводом працюють від акумуляторних батарей. Вони здатні пройти на одній зарядці від 10 км, до 40 км, розвивати швидкість до 10 км/год. Керування відбувається за допомогою пульта керування або джойстика, вбудованого в підлокітник. Електровізки дозволяють набагато швидше пересуватися без докладання зусиль з боку користувача [7].



Рисунок 1.5 – Електровізок

6. Посилені візки на (рис 1.6).

Ці посилені конструкції мають вдвічі міцнішу раму. Спинка і сидіння виготовляють з матеріалів підвищеної міцності. Такі візки здатні витримати навантаження до 160 кг, а ширина сидіння 50 см і більше. Посилюючи такі візки, фахівці не стали обтяжувати їх, тому для їх виготовлення застосовують міцні, але легкі матеріали – авіаційний алюміній або сталь.



Рисунок 1.6 – Посилені візки (для повних людей)

7. Дитячі інвалідні візки [7] (рис 1.7).

Як правило, інвалідні візки для дітей обладнано п'яти точковими ременями безпеки, що дозволяють надійно зафіксувати тіло дитини в кріслі. На відміну від візків для дорослих ці моделі мають меншу вагу, компактні розміри і можливості регулювати параметри конструкції по мірі дорослішання малюка.



Рисунок 1.7 – Дитячий інвалідний візок

1.2 Сучасні тенденції у розробці електроприводу візка з різними типами двигунів

Сучасні конструкції інвалідних візків з електроприводом мають широкі можливості для індивідуального регулювання у відповідності з індивідуальними потребами власника, а також для використання вдома, на вулиці, як для короткочасних поїздок так і для довготривалих.

До основних тенденцій електроприводів візків можна віднести:

1. Електропривід з використання двигуна, що приводить візок в рух через редуктор та диференціал зображений на (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Електровізок з використанням диференціалів

Диференціал — механічний пристрій [8], що передає обертання з одного джерела на два незалежні споживача так, що кутові швидкості обертання джерела і обох споживачів можуть бути різними один відносно іншого і їх співвідношення може бути непостійним, але відношення швидкості обертання джерела до суми швидкостей обох споживачів лишається постійним.

Схематичне зображення диференціала подано на (рис 1.9).

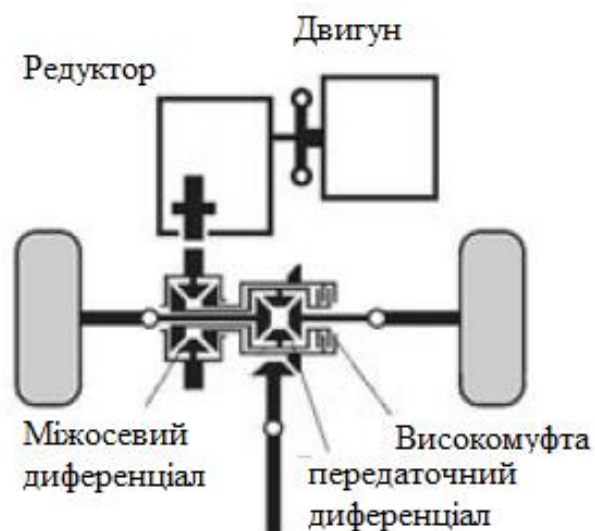


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення диференціала

Механізм диференціала був вперше застосований в 1897 році на паровому автомобілі. І невдовзі після появи автомобілів з двигуном внутрішнього згорання і на них почали застосовувати диференціали.

В теперішній час всі автомобілі [9], як з двигунами внутрішнього згорання, електродвигунами, гібридні машини, мають між колісні диференціали. Міжосьові диференціали застосовуються в багатопривідних автомобілях для запобігання циркуляції потужності, додатково навантажуючої трансмісію і викликаючи швидке зношування.

2. Використання мотор-колеса: в цьому випадку статор двигуна обертається навколо ротора, який жорстко закріплений на корпусі візка. Мотор-колесо є різновидом ведучого колеса, комплексний агрегат, в якому об'єднані безпосередньо колесо, електричний двигун, силова передача і гальмівна система. Зображення мотор-колеса на (рис. 1.10) [10].



Рисунок 1.10 – Мотор-колесо

Мотор-колесо являє собою агрегат, що поєднує колесо і вбудовані в нього тяговий електродвигун, силову передачу в деяких випадках, гальмівну систему (таким чином, кожне мотор-колесо має індивідуальний привід). Встановлюється, як правило, в підвішеному до рами кронштейні (в разі, коли колесо не є керованим) або в установленому в поворотною цапфою підшипнику (в разі, коли колесо є одночасно привідним і керованим). Живиться енергією від двигуна внутрішнього згоряння через електромеханічну трансмісію (переважно на автомобільній техніці, головним чином важкої), від контактної мережі (на тролейбусах) або від акумулятора (на електромобілях і електровелосипедах, електровізках). Мотор колесо також може використовуватись, додаткове джерело енергії, на автомобільній техніці з двигуном внутрішнього згоряння, такий як (гібридні автомобілі, тролейбуси). Існує два режими роботи мотор-колеса - тяговий і генераторний. У тяговому режимі обертання передається з вала якоря електродвигуна, що працює в руховому режимі, через редуктор до внутрішнього зубчатому вінця провідного колеса; в генераторному режимі, використовуваному для електричного гальмування, електродвигун переходить в генераторний режим роботи, а електроенергія перетворюється в тепло на гальмівному резисторі або повертається в електричну мережу або застосовується для зарядки акумуляторів (рекуперативного гальмування) [11].

Мотор-колеса бувають редукторними та без редукторними, найчастіше застосовуються перші, оскільки вони забезпечують зменшення маси і шуму при роботі та збільшують ремонтпридатність мотор колеса.

Види мотор-коліс:

1. Редукторні - вони містять шестерні, що знаходяться безпосередньо в корпусі колеса, рис 1.11 відрізняються компактністю і меншою вагою. Планетарний редуктор забезпечує легкому мотору (масою 2-2,5 кг) високий крутний момент і виступають гідною альтернативою більш потужним електродвигунів з прямим приводом.



Рисунок 1.11 – Редукторне мотор-колесо

2. Без редукторні (безщіточні) - мотори прямого приводу, зображені на (рис 1.12). Відрізняються чудовою надійністю, високим ККД і тихою роботою, але більш габаритні і великовагових. Використовуються переважно в електровелосипедах з високою вантажопідйомністю, швидкісних моделях і скутерах [12].



Рисунок 1.12 – Без редукторне (безщіточні) мотор-колесо

3. З використанням модульних електроприводів в яких є в наявності акумулятор колесо, рама двигун, найчастіше мотор-колесо, та система керування, яка розташована на рулі, які з'єднують зі звичайним візком.

Перевагами модульних електровізків є:

- відносно невелика вартість;
- надійність;
- не потребує системи керування поворотами, оскільки оператор сам задає напрямок, і регулює тільки швидкість.

Недоліком модульних електроприводів є:

- не підходять інвалідам, в яких напрацює одна чи дві руки
- більші габарити ніж у порівнянні з іншими тенденціями.

Модульні електроприводи, що показано на рис 1.13, складаються з [13]: 1- Дзеркала заднього виду, 2 - руль, 3 - колеса, 4- Кріплення, що дозволяють з'єднати модуль з візком(звичайним), Фара Кабелі для системи керування Акумуляторна батарея.

Система керування: Газ Тормоз Ввімкнення/Вимкнення фар

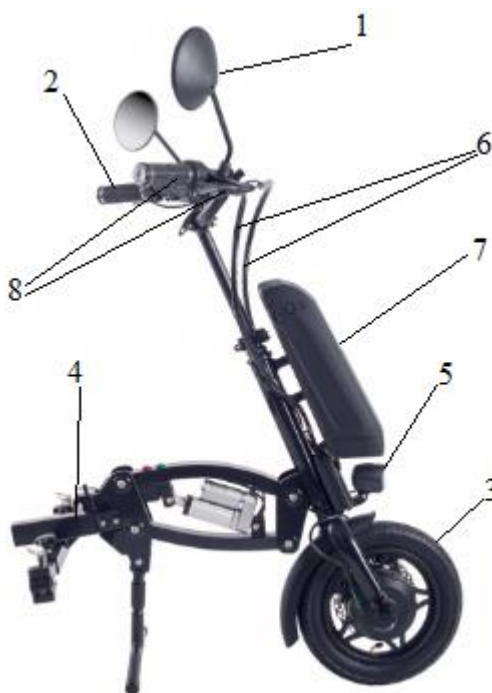


Рисунок 1.13 – Зображення модульного електроприводу

1.3 Порівняння переваг та недоліків електродвигунів для візків

Розглянемо такі типи двигунів як: ДПС, АД з КЗ ротором, СДПМ, прямопривідні та редукторні мотор-колеса

1. Переваги та недоліки двигунів постійного струму

До переваг ДПС можна віднести наявність:

1. широкого діапазону регулювання частоти обертання (від 0 до $n_{ном}$ вище до n_{max});
2. трьох порівняно простих і надійних способів регулювання частоти обертання: зміною напруги на обмотці якоря, струму збудження та додаткового опору в колі обмотки якоря;
3. великих значень пускових моментів;
4. більшої, ніж для машин змінного струму, перевантажувальної здатності.

До недоліків двигунів постійного струму можна віднести такі властивості:

1. значно більші, ніж у машинах змінного струму, габарити, маса та вартість;

2. великі експлуатаційні витрати;

3. Наявність щіток та колектора, що знижують надійність

2. Мотор-колеса

- Переваги прямопривідних коліс

Ці двигуни [16]: досить надійну конструкцію. У них немає частин, що піддаються зносу і тертя, що в свою чергу гарантує високу точність динамічних характеристик приводу, незмінних протягом усього періоду експлуатації мотор-колеса.

- безпосереднім перетворенє електричної енергії.

- виняткова динаміка і максимально високі показники точності роботи.

- Практична відсутність ефектів люфту і тертя при роботі.

- Чи можуть створювати великий крутний момент.

- розвивають велику швидкість (наприклад, при потужності 500 Вт - 40-45 км / ч).

- мають високим ККД.

- притаманний низький рівень шуму і вібрації.

- В прямо привідних мотор-колеса не потребують мастил і іншому технічному обслуговуванні.

- зручність і простота установки на електровелосипед.

Недолік прямопривідного мотор колеса є

- більша вага, ніж у мотор-коліс з редукторним механізмом.

- Переваги редукторного мотор-колеса:

- є надзвичайно малу вагу.

- високі показники крутного моменту.

- висока стійкість до перевантажень по струму.

- мала потужність (250-350 Вт) усіх редукторних мотор-коліс дозволяє економити заряд батареї, і відповідно збільшувати пробіг на одному заряді акумулятора.

Недоліки редукторного електродвигуна:

- елементи редукторного мотор-колеса підлягають зносу, більше ніж прямопривідний електродвигун,
- максимальні швидкісні показники обмежені 25-30 км / год;
- ККД редукторного двигуна нижче ніж у прямоприводного.
- існує необхідність періодичного технічного обслуговування [17].

3. Асинхронний двигун з КЗ ротором

До переваг асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором можна віднести [17]:

1. Простоту конструкції та експлуатації. Як правило, обслуговування таких електродвигунів полягає лише в періодичній заміні мастила в підшипникових щитах.
2. Надійність у роботі та відносна простота ремонту. Ці електродвигуни не мають ковзного електричного контакту - основного елемента, що знижує надійність інших видів електродвигунів. Заміна обмотки статора, найменш надійного елемента цього електродвигуна, є відносно нескладною операцією.
3. Відносно мала вага, габаритні розміри та вартість.

До недоліків асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна віднести:

1. Великі пускові струми (I_p). При прямому пуску і вони можуть досягати $(5+7) I_{ном}$.
2. Малі значення пускових (M_p) та мінімальних по відношенню до номінальних моментів ($M_{ном}$). Для значної частини електродвигунів $M_p/M_{ном} = 1-1,2$, що ускладнює чи навіть унеможлиблює запуск електродвигуна при номінальному навантаженні.
3. Складність регулювання швидкості. Незважаючи на те що швидкість асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором теоретично можна регулювати з допомогою трьох параметрів (частоти напруги живлення, кількістю пар полюсів та ковзання), на практиці її регулювання потребує

або дорогого обладнання (наприклад, перетворювача частоти), або спеціального конструктивного виконання асинхронного двигуна.

3. Синхронні двигуни постійного струму

До переваг СДПМ можна віднести такі властивості [18]:

1. Стабільна частота обертання у всьому діапазоні допустимих навантажень.

2. Високий коефіцієнт потужності.

Недоліками синхронних двигунів є:

1. Необхідність двох джерел живлення (постійного та змінного струмів);

2. збільшення габаритів, маси і вартості;

3. складність процесу запуску та обслуговування в процесі експлуатації.

Синхронні двигуни найбільш доцільно використовувати в складі такого електропривода, де:

- потрібна стабільна частота обертання при зміні навантаження від 0 до $M_{ном}$;

- складність при пуску;

- потужність електродвигунового пристрою велика (як правило, не менш ніж 250 кВт, але технічно і економічно обґрунтованою нижньою межею номінальної потужності є 500 / 600 кВт).

1.6 Техніко-економічне порівняння

Для вибору виду та типу двигуна необхідно задатись його параметрами, які забезпечать стабільну роботу:

1. Простота ремонту

2. Невелика маса та габарити

3. Висока надійність та довговічність

4. Енергоефективність

5. Низька ціна

В таких транспортних засобах як інвалідні візки, теоретично можуть використовуватись як: двигуни постійного струму, асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором синхронні двигуни з постійними

магнітами, так і синхронний двигун типу мотор-колесо з постійними магнітами. Але всі вони мають свій ряд переваг та недоліків.

ДПС є дорожчими та важчими, мають складніше улаштовані, ніж подібні по потужності трифазні асинхронні двигуни. Але їхніми перевагами є.

АД з КЗ ротором є дешевшими, ніж СД, та легшими за ДПС. Їхнім недоліком є складність у керуванні внаслідок нагріву (активного опору), що ускладнює його керування.

Найбільшою перевагою синхронного двигуна у порівнянні з двигунами інших типів, абсолютно жорстка механічна характеристика. Адже ротор обертається зі швидкістю обертового магнітного поля, що створюється статором. Швидкість обертання поля не залежить від моменту опору, якщо він не більший за максимальне значення.

Мотор-колесо з постійними магнітами, має менші габарити та вагу, а встановлення безпосередньо в колесо, дозволяє зробити транспортний засіб компактнішим ніж з використанням інших типів двигунів. Але є дорожчим за АД та СДПМ, і складнішим в обслуговуванні.

Для наглядно ті занесемо порівняння двигунів в табл 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняння параметрів електродвигунів

Двигуни Параметри	ДПС	АД з КЗ ротором	СДПМ	Мотор колесо з пост. магнітами	
				Редук торні	Безредук торні
Висока надійність та довговічність	-	+	+	-	+
Малі габарити та маса	-	+	+	+	+
Обмежене обслуговування	-	+	+	-	+
Енергоефективність	-	-	+	+	+
Вартість	-	+	-	+	+
Оцінка	1	6	5	4	5

Вибираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором за найбільшою оцінкою та параметрами, які найбільше підходять для ЕП.

1.4 Вимоги до електроприводу візків

Для керування приводом електровізка необхідно забезпечити рух у відповідності з діями власника [14].

При цьому повинна підтримуватися необхідна швидкість руху прискорення при розгоні та сповільнення при гальмуванні. Тяговий електропривод повинен обмежувати максимальну швидкість і максимальний струм двигунів. А також повинен мати необхідну автоматику керування електровізка, захист електрообладнання від перевантаження показники як струму, швидкості та напруги.

Режим роботи електровізка характеризується частими включеннями і виключеннями двигунів, значними коливаннями навантаження, струму і нагрівом електрообладнання.

Таким чином, проаналізувавши інформацію, яка була наведена вище можна сформулювати вимоги до електроприводу електровізка, які розгляно та у підрозділі 1.1 та підрозділі 1.2.

- забезпечення плавного пуску для комфортного перевезення пасажирів з максимальним прискоренням $a_{\max} = 1.5 \text{ м/с}^2$;

- діапазон регулювання швидкості $D = 50:1$;

- максимальна швидкість 10 км/год;

- кут підйому 5° ;

- забезпечувати управління тяговими двигунами в процесах пуску і гальмування автоматично з мінімальною допомогою водія;

- відмова в роботі того чи іншого електричного апарату не повинна приводити до неправильного виконання команди управління, наприклад, пуску замість гальмування і навпаки;

- електрообладнання систем керування тяговими двигунами і його монтаж повинні бути надійними, мати зручний доступ для його контролю обслуговування.

Висновок до розділу 1

1. Розглянуто історію електроприводів електровізка їх види, типи у розробці переваги та недоліки.

2. Представлено вимоги до електроприводу візка: максимальне прискорення 1.5 м/с, швидкість 10 км/год, діапазон регулювання швидкості 50.

3. За даними порівняльного оцінювання був вибраний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, оскільки він виявився найкращим серед інших кандидатів, набравши максимальну кількість балів обігнавши синхронний двигун за ціновим параметром а мотор-колесо з постійними магнітами показником моменту

2 РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ, ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ДВИГУНА

В даному розділі вибрано візок, розраховано сили, що протидіють його руху: кочення, аеродинамічного опору та підйому. На основі цих сил, виходячи з закону збереження енергії, розраховано силу тяги, виходячи з якої визначено потужність, обрано електродвигун і редуктор. Для подальшого моделювання розраховано номінальні параметри двигуна.

2.1 Розрахунок зусиль транспортного засобу

Щоб привести в рух транспортний засіб (ТЗ) [19], необхідно визначити силу тяги F_T , та сили що протидіють його руху: силу кочення F_k , підйому F_p , аеродинамічну F_a , які показані на рис. 2.1.

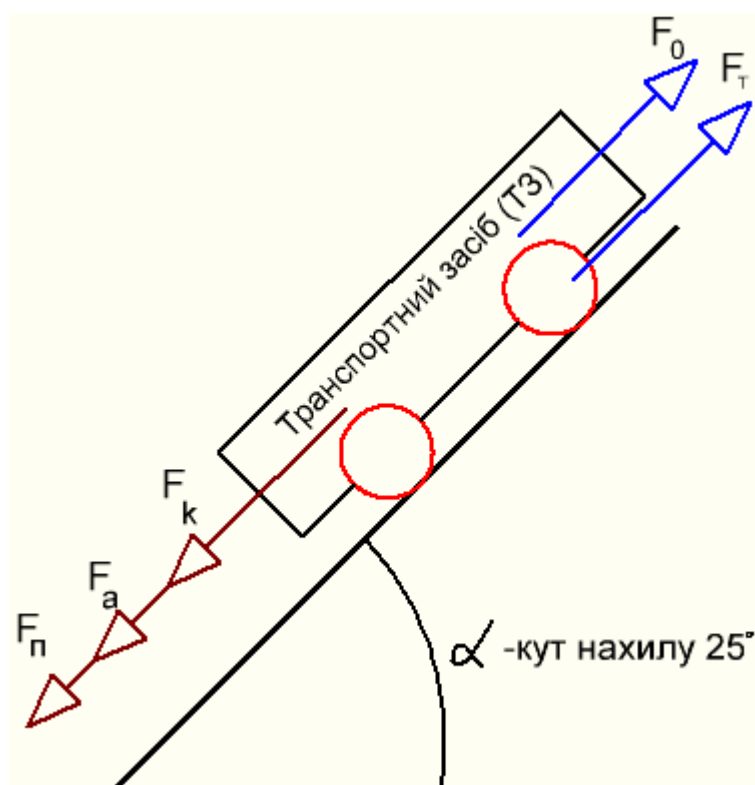


Рисунок 2.1 – Розподіл зусиль при русі транспортного засобу

Для розрахунку зусиль буде прийнято технічні характеристики електровізка OSD-PCC1600 [20], як показані в табл. 2.1. зовнішній вигляд візка зображений в додатку А.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики електровізка OSD-PCC1600

Параметри	Значення
Діаметр передніх коліс D , м	0.33
Діаметр передніх коліс d , м	0.2
Ширина візка W , м	0.7
Висота візка h , м	1.2
Максимальна усталена швидкість у разі повного завантаження V , км/год	10
Час розгону при повному завантаженні до швидкості 10 км/год, с	5
Маса візка m , кг	74
Сумарна маса візка з людиною m , кг	225
Максимальне прискорення уповільнення у разі повного завантаження a_{\max} , $\frac{M}{C^2}$	0.5
Тривалість включення ТВ, %	100

За другим законом Ньютона формула зусилля буде виглядати так:

$$F_0 = ma = 225 \cdot 0.5 = 112.5 \text{ (Нм)}, \quad (2.1)$$

де a – прискорення в, m – маса візка з людиною.

Зусилля кочення розраховується як

$$F_k = mgf_r \cos \alpha = 225 \cdot 9.81 \cdot 0.012 \cdot 0.99 = 23.8 \text{ Нм}, \quad (2.2)$$

де f_r – коефіцієнт тертя, [21], $g = 9.81 \left(\frac{M}{C^2} \right)$,

Для того щоб перевести швидкість з км/год в м/с скористаємось наступною формулою

Визначимо фронтальну площу за формулою:

$$A_f = l_{\text{ширина}} l_{\text{висота}} = 1.2 \cdot 0.7 = 0.84 \text{ м}^2, \quad (2.3)$$

$$v_{\text{м/с}} = V_{\text{км/год}} \frac{1000}{3600} = 10 \cdot \frac{1000}{3600} = 2.7 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.4)$$

Зусилля аеродинамічного опору визначимо як

$$F_a = 0.5 \rho A_f C_w V^2 = 0.5 \cdot 1.22 \cdot 0.84 \cdot 0.8 \cdot 2.7^2 = 3.168 \text{ (Нм)}, \quad (2.5)$$

де ρ – густина повітря (1.22 м²), C_w – аеродинамічний коефіцієнт (0,8), ТЗ, V – швидкість ТЗ в м/с.

Зусилля підйому визначимо як:

$$F_n = m_s g \sin \alpha = 225 \cdot 9,81 \cdot 0.1 = 220.1 \text{ Нм}, \quad (2.6)$$

Отримавши F_k, F_a, F_n, F_0 знайдемо сумарне зусилля

$$F_{\Sigma} = F_0 + F_a + F_k + F_n = 112.5 + 23.8 + 220.1 + 3.1 = 358 \text{ Нм} \quad (2.7)$$

Перевіримо розрахунок на правильність за допомогою закону збереження енергії:

$$F_{\Sigma} + F_0 = F_a + F_k + F_n \quad (2.8)$$

$$F_{\Sigma} - F_0 + F_a + F_k + F_n = -252 + 112.5 + 23.8 + 220.1 + 3.1 = 0 \quad (2.9)$$

Розрахуємо момент двигуна

$$M_{\text{дв}} = \frac{F_T r_k}{i_p} = \frac{358 \cdot 0.33}{10} = 10.839 \text{ Нм}, \quad (2.10)$$

де i_p – передаточне число, r_k – радіус колеса.

Для зменшення необхідного моменту на валу двигуна використаємо редуктор з передаточним числом 10,

Визначимо максимальну кутову швидкість обертання на колесі електровізка за наступною формулою

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\omega i_p}{r_k} = \frac{2.78 \cdot 10}{0.33} = 81.8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (2.11)$$

$$V_w = \omega_{\text{дв}} \cdot \frac{60}{2\pi} = 81.8 \cdot \frac{60}{2\pi} = 781.7 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Знаючи швидкість та момент двигуна, визначимо потужність як

$$P_{\text{дв}} = M\omega_{\text{дв}} = 10.839 \cdot 81.8 = 966.6 \text{ Вт}, \quad (2.12)$$

Вибираємо асинхронний двигун з коротко замкненим (КЗ) ротором типу 4А [23], з потужністю у 1.1 кВт; та синхронною частотою обертання 1000 об/хв, параметри якого представлено в табл. 2.3.

Та виберемо редуктор черв'ячного типу 411А [24] параметри якого зображені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри редуктора циліндричний 411А

Параметр	Значення
Тип редуктора	циліндричний
Матеріал корпусу	Алюміній
Тип корпусу	Литий
Кількість робочих ступенів	1
Максимальний крутний момент Нм	16
Мінімальна потужність під'єданого електроприводу кВт	0.75
Максимальна потужність отримана двигуном кВт	1.15
КПД, не менше %	98
Маса кг	3.2
Передаточне число	10

Таблиця 2.3 – Технічні дані асинхронного двигуна з КЗ ротором 4А80ВАНЗ

Номінальна потужність P_n , кВт	1.1
Номінальна лінійна напруга $U_{\text{лн}}$, В	380
Число пар полюсів P_n	3
Момент інерції J , кг/м ²	0.0046
Номінальний η_n , ККД %	0.74
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_n$	0.74
Номінальне ковзання s_n	0.08
Критичне ковзання s_k	0.38
Номінальний режим роботи	S1
Тривалість включення ТВ, %	100
Номінальна частота напруги f_n , Гц	50
Параметри Г-подібної схеми заміщення у (відносних одиницях)	
Індуктивний опір розсіювання статора x'_{1v} , Ом	0.11
Активний опір статора r'_{1v} , Ом	0.12
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора x''_{2v} , Ом	0.19
Приведений активний опір ротора r''_{2v} , Ом	0.11
Індуктивний опір намагнічуючого контуру x'_{mv} , Ом	1.6

2.2 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова швидкість напруги статора:

$$\omega_{\text{он}} = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (2.13)$$

Швидкість обертання ідеального холостого ходу:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{on}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104.72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (2.14)$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 104.72(1 - 0.08) = 96.34 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (2.15)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{1.1 \cdot 10^3}{96.34} = 11.42 \text{ Нм}, \quad (2.16)$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = \lambda_k M_n = 1.13 \cdot 11.42 = 12.66 \text{ Нм}, \quad (2.17)$$

Електричні параметри.

Фазна номінальна напруга двигуна:

$$U_n = \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{В}, \quad (2.18)$$

Номінальний струм статора:

$$I_n = \frac{P_n}{3U_n \cos \varphi_n \eta_n} = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0.74 \cdot 0.74} = 3.04\text{А}, \quad (2.19)$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311\text{В}, \quad (2.20)$$

Амплітудне значення струму:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 3.04 = 4.3\text{А}, \quad (2.21)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу

при $r_1 = 0$:

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{on}} = \frac{311}{314} = 0.99\text{Вб}. \quad (2.22)$$

2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення

Перерахунок параметрів [25] з Г-подібної схеми заміщення[26], зображеної на рис 2.2, в Т-подібну рис 2.3, виконується наступним чином:

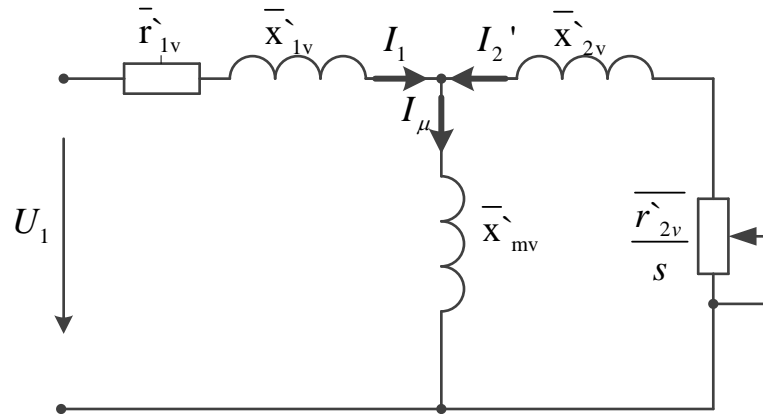


Рисунок 2.2 – Т-подібна схема заміщення

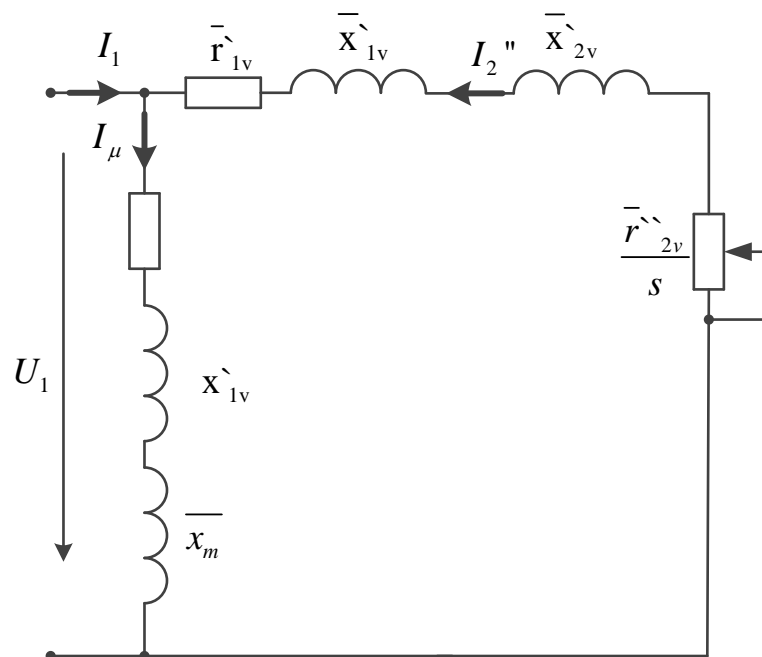


Рисунок 3.3 – Г-подібна схема заміщення

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}'_{mv} + \sqrt{\bar{x}'_{mv}{}^2 + 4\bar{x}'_{1v}\bar{x}'_{mv}}}{2\bar{x}'_{mv}} = 1.065, \quad (2.23)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\begin{aligned}x_{1v} &= \frac{x'_{1v}}{c_1} = \frac{0.11}{1.065} = 0.103; & r_{1v} &= \frac{r'_{1v}}{c_1} = \frac{0.12}{1.065} = 0.113; \\x'_{2v} &= \frac{x''_{2v}}{c_1^2} = \frac{0.19}{1.065^2} = 0.168; & r'_{2v} &= \frac{r''_{2v}}{c_1^2} = \frac{0.11}{1.065^2} = 0.097.\end{aligned}\quad (2.24)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

Активний опір статора:

$$r_1 = r_{1v} \frac{U_n}{I_n} = 8.148 \text{ Ом}, \quad (2.25)$$

Індуктивний опір статора:

$$x_1 = x_{1v} \frac{U_n}{I_n} = 7.469 \text{ Ом}, \quad (2.26)$$

Активний опір ротора, приведений до статора:

$$r_2 = r'_{2v} \frac{U_n}{I_n} = 7.016 \text{ Ом}, \quad (2.27)$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$x'_2 = x'_{2v} \frac{U_n}{I_n} = 12.118 \text{ Ом}, \quad (2.28)$$

Індуктивний опір розсіювання

$$x_m = x'_{mv} \frac{U_n}{I_n} = 115.653 \text{ Ом}, \quad (2.29)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_m = \frac{x_m}{\omega_{on}} = \frac{115.653}{314} = 0.368 \text{ Гн}, \quad (2.30)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{on}} = \frac{7.469}{314} = 0.024 \text{ Гн}, \quad (2.31)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_{on}} = \frac{12.118}{314} = 0.039 \text{ Гн}, \quad (2.32)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.024 + 0.368 = 0.392 \text{ Гн}, \quad (2.33)$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0.039 + 0.368 = 0.407 \text{ Гн}, \quad (2.34)$$

Всі розраховані параметри Γ – подібної схеми занесено до табл. 2.4
Таблиця 2.4 – Параметри асинхронного двигуна з КЗ ротором
4А80В6У3

Величина	Значення	Величина	Значення
P_n , кВт	1.1	r_1 , Ом	8.148
ω_{xx} , рад / с	104.72	r_2 , Ом	7.016
ω_n , рад / с	96.34	L_1 , Гн	0.392
M_n , Н·м	11.42	L_2 , Гн	0.407
M_k , Н·м	12.66	L_m , Гн	0.368
λ_k	1.13	α_1 , Ом / Гн	20.79
I_n , А	3.04	α , Ом / Гн	17.25
ψ_{1xx} , Вб	0.99	β , 1 / Гн	15.423
$\cos \varphi_n$	0.74	γ , Ом / Гн	236.772
J , кг·м ²	7.3	σ , Гн	0.059
η	0.74		

Для
двигуна по
скористаємось формулою

перевірки
нагріву[26]

$$M'_{\text{екв}} = M_{\text{дв}} \sqrt{\frac{TВ}{TВ_{\text{ном}}}} = 9.8 \sqrt{\frac{100}{100}} = 9.8 \text{ Нм}, \quad (2.35)$$

де $TВ$ – це тривалість включення, $TВ_{\text{ном}}$ – номінальна тривалість включення.

Двигун проходить по нагріву за умови якщо:

$$M'_{\text{екв}} < M_n, \quad (2.36)$$

$$10.26 \text{ Нм} < 11.42 \text{ Нм}.$$

Обраний двигун проходить по нагріву оскільки умова (2.36) виконується

Висновки до розділу 2

1. Для візка типу OSD-PCC1600, що рухається під кутом визначено тягове зусилля, яке необхідне для вибору двигуна електровізка
2. Щоб зменшити необхідний момент та швидкість на валу двигуна був вибраний редуктор.
3. Розраховано номінальні параметри двигуна типу 4A80B6Y3 та перерахунок параметрів з Г-подібної схеми заміщення, в Т-подібну, які були занесені в таблицю.

3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В даному розділі буде розроблено функціональну схему (ФС) електроприводу електровізка.

Загальний вигляд ФС асинхронного ЕП електровізка зображено на рис 3.1.

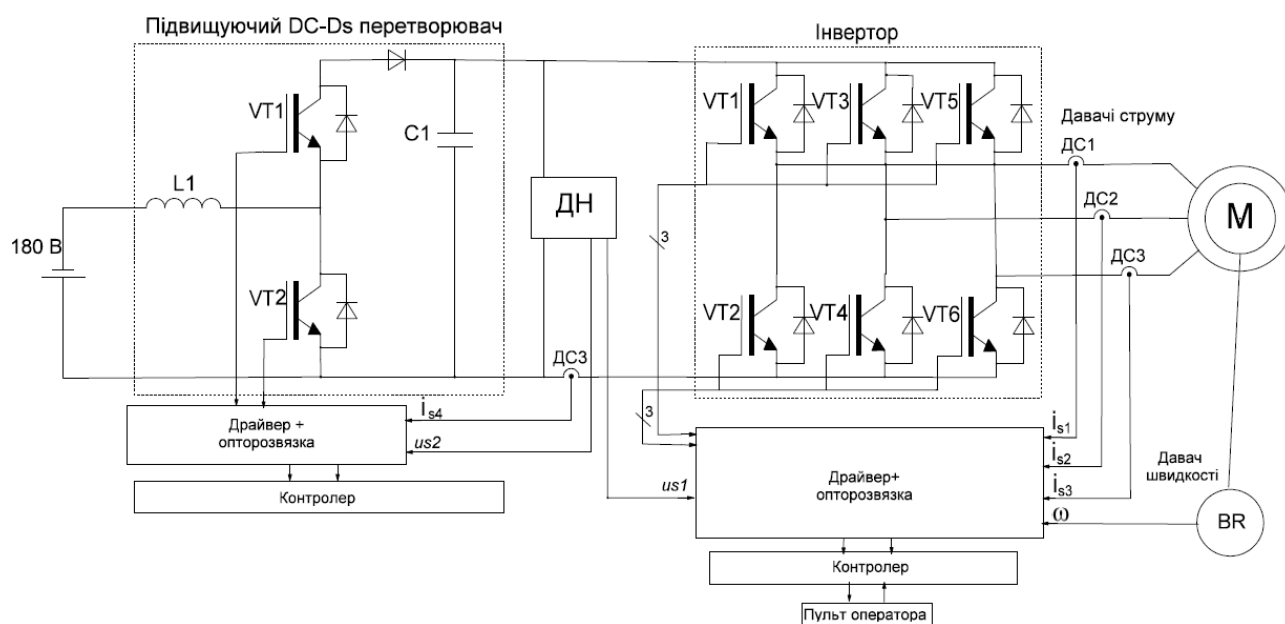


Рисунок 3.1 – Функціональна схема ЕП електровізка

Розглянемо призначення основних елементів електроприводу:

Підвищуючий ds-ds перетворювач — призначений для перетворення постійної напруги на вході 180 В на постійну на виході 540 В. Також в його наявності є індуктивність, конденсатор та діод шотоки та два керовані ключі.

Датчик напруги – призначений для передачі в керуючий контролер інформації про напругу ланки постійного струму, де вона використовується для забезпечення захисних функцій, контролю заряду ємності фільтру випрямляча, а також для генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції (ШИМ).

Інвертор – цей пристрій перетворює постійну напругу в ланці постійного струму у задану трифазну напругу на виході, результуючий

вектор якої, усереднений на періоді ШІМ, має заданий модуль, кутове положення та частоту.

Датчики струму (ДС1, ДС2, ДС3) – ці датчики призначені для передачі на керуючий контролер інформації про струми на фазах двигуна, де вона використовується для організації захисних функцій двигуна та інвертора, а також для отримання зворотних зв'язків в системі векторного керування.

Датчик швидкості – використовується для вимірювання контролером кутової швидкості або ж положення, з метою отримання зворотних зв'язків та захисних функцій [27].

Драйвери – це пристрої які, перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT) ключів. Драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Вони додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання (КЗ) інвертора.

Опторозв'язка – призначена для забезпечення гальванічної розв'язки дискретних сигналів керування з метою підвищення заводозахисту керуючого контролера, та запобігання виходу його з ладу при аварійних режимах в силовій частині. Виконується за оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності, бо допомогою оптопар [29].

Керуючий контролер – виконує всі функції автоматизації перетворювача, отримання завдання на регульовані ним координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – необхідна для приведення рівнів сигналів, які отримуються від датчиків струму та напруги до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового

перетворювача керуючого контролера. Фільтрація може застосовуватися для підвищення завадостійкості системи керування.

Інтерфейс датчика швидкості – дозволяє підключати до контролера фото імпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило містить гальванічну розв'язку.

Блок живлення – забезпечує живлення власних потреб перетворювача: драйверів, живлення контролера, зовнішні +5 В та +24 В, живлення датчиків.

Панель оператора (панель керування) – призначена для отримання та налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

Додаткові входи виходи – використовуються для керування додатковими системами, а саме: включення системи охолодження, вентиляторів, контролю спрацювання зарядного реле та ін[30].

Для вибору енкодера спершу [31] переведемо нашу швидкість холостого ходу з 104.71 (рад\с) в 1000 (об\хв) [32]. За даним пераметром вибираємо оптичний енкодер серії ARC 50 [33], параметри якого наведені в табл 3.2.

Таблиця 3.2 – Паспортні дані енкодера

Параметр	Значення
Напруга живлення	5...24 (В)
Діаметр вала	10 (мм)
Рівень захисту IP	54
Діапазон (имп.)	60
Частота	300 (кГц)
Максимально допустиме число обертів	6000 (об/хв)

При виборі теплового реле [34] розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача:

$$I_{\max} = \lambda_k I_{\text{на}} = 1.2 \cdot 4.3 = 5.1 \text{ А} \quad (3.1)$$

Отже по отриманому максимальному струму, виберемо реле [35] Аско РТ 1310 з діапазоном установок реле 4-6 А

Висновки до розділу 3

1. Зображено функціональну схему ЕП та розглянуто її елементи і їхнє призначення в ній.
2. Вибрані та розраховані такі пристрої як: енкодер серії ARC 50 та теплове реле РТ 1310.

4 СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ПРЯМОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ

В розділі буде розглянута постановка та синтез алгоритму прямого векторного керування та синтез моменту-потокозчеплення. Адже даний спосіб керування забезпечує асимптотичне відпрацювання моменту, що дозволяє забезпечити необхідні динамічні режими ТЗ, високу точність регулювання швидкості та моменту на валу двигуна, також високий ККД.

4.1 Постановка задачі керування моменту

Відповідно до методики для відпрацювання моменту-потокозчеплення [38] запишемо модель АД в обертовій системі координат (d-q):

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) \\
 M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\
 \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} - \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} - \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
 \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\
 \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1d} \\
 \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1q} \\
 \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0.
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

де $\omega_2 = \omega_0 - p_n \omega$, ω_0 – кутова швидкість довільної системи координат (d - q), ε_0 – кутове положення рухомої системи координат (d - q) відносно нерухомої системи координат статора (a - b). $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (d - q), $(\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень

ротора, $(u_{1d}, u_{1q})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, ν – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \gamma = \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right) \quad (3.3)$$

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

Для моделі прийємо наступні припущення []:

A.1 Параметри АД відомі та постійні;

A2. Кутова швидкість обмежена;

A3. Задані траєкторії потокозчеплення і моменту $\psi^* > 0$ та M^* обмежені і мають обмежені похідні $\dot{\psi}^*, \dot{\psi}^*, \dot{M}^*$;

A4. Струми статора доступні для вимірювання.

При виконанні цих припущень необхідно синтезувати нелінійний динамічний регулятор $u_1^{(d-q)} = (u_{1d}, u_{1q})^T$ на основі вимірюваного вектора змінних стану $y = (\theta, \omega, i_{1d}, i_{1q})^T$, що забезпечить:

O1. Асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій змін моменту M^* та модуля потокозчеплення ротора $\psi^*(t) > 0$, тобто забезпечити умови

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} &= 0, \quad \tilde{\psi} = |\psi_2| - \psi^*. \end{aligned} \quad (3.4)$$

O2. Асимптотичну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0. \quad (3.5)$$

ОЗ. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми керування моментом.

Базуючись на розглянутій концепції принципу розділення ідеальної орієнтації за полем машини, а також розв'язуючих властивостей лінеаризуючого алгоритму, що забезпечує декомпозицію початкової моделі (3.2) на дві підсистеми: електромеханічну та розв'язану відносно не електромагнітну, сформулюємо задачу відпрацювання моменту та модуля потокозчеплення наступним чином.

4.1.1 Синтез векторного керування моментом

Згідно принципу розділення [36], невимірювані змінні (Ψ_{2d}, Ψ_{2q}) які отримуються за допомогою нелінійного асимптотичного спостерігача потокозчеплення із властивостями експоненційної стійкості, які сформуємо у вигляді рівнянь роторного кола

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{2d} &= -\alpha\Psi_{2d} + p_n\omega_2\Psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\Psi}_{2q} &= -\alpha\Psi_{2q} - p_n\omega_2\Psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}.\end{aligned}\tag{3.6}$$

Припустимо, що зовнішні сигнали ω, i_{1a}, i_{1b} в (3.6) є обмеженими, тоді розімкнений спостерігач для системи (3.6) запишеться

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\Psi}}_{2d} &= -\alpha\hat{\Psi}_{2d} + p_n\omega_2\hat{\Psi}_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\hat{\Psi}}_{2q} &= -\alpha\hat{\Psi}_{2q} - p_n\omega_2\hat{\Psi}_{2d} + \alpha L_m i_{1q}.\end{aligned}\tag{3.7}$$

Визначивши похибки оцінювання потокозчеплень, як

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_{2d} &= \Psi_{2d} - \hat{\Psi}_{2d}, \\ \tilde{\Psi}_{2q} &= \Psi_{2q} - \hat{\Psi}_{2q},\end{aligned}\tag{3.8}$$

їх динаміка згідно (3.8), (3.7) набуває вигляду

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\Psi}}_{2d} &= -\alpha\tilde{\Psi}_{2d} - p_n\omega_2\tilde{\Psi}_{2d} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{2q} &= -\alpha\tilde{\Psi}_{2q} + p_n\omega_2\tilde{\Psi}_{2q}.\end{aligned}\tag{3.9}$$

Для аналізу стійкості системи (3.9) розглянемо наступну функцію Ляпунова :

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{\Psi}_{2d}^2 + \tilde{\Psi}_{2q}^2) > 0,\tag{3.10}$$

похідна якої вздовж траєкторій (3.9) дорівнює

$$\dot{V} = -\alpha(\tilde{\Psi}_{2d} + \tilde{\Psi}_{2q}) = -2\alpha V < 0\tag{3.11}$$

З (3.10) та (3.11) безпосереднє використання теореми Ляпунова про стійкість свідчить, що положення рівноваги $(\tilde{\Psi}_{2d}, \tilde{\Psi}_{2q})^T = 0$ є глобально експоненційно стійким. Більш того, форма (3.11) дає більш строгую оцінку у вигляді

$$e_\psi(t) \leq e_\psi(0)e^{-\alpha t}, \text{ де } e_\psi = (\tilde{\Psi}_{2d}^2 + \tilde{\Psi}_{2q}^2)^{\frac{1}{2}}\tag{3.12}$$

Таким чином, модуль похибок оцінювання $e(t)$ ψ експоненційно затухає в нуль зі швидкістю, що визначається зворотною сталою часу роторного кола АД $T_r = \alpha^{-1}$. Якщо $e_\psi(0) = 0$, то $e_\psi(t) \equiv 0 \forall t \geq 0$. З цього аналізу встановлюємо, що рівняння (3.7) описують асимптотичний спостерігач вектора потозчеплення ротора. Для того, щоб побудувати алгоритм векторного керування по вимірюваному виходу з використанням принципу розділення, використаємо в заміну реальних потোকзчеплень на їх оцінені значення

$$\cos \varepsilon_0 = \frac{\hat{\Psi}_{2d}}{|\hat{\Psi}_2|}, \quad \sin \varepsilon_0 = \frac{\hat{\Psi}_{2q}}{|\hat{\Psi}_2|} \quad (3.13)$$

$$\text{де } |\hat{\Psi}_2| = \left(\tilde{\Psi}_{2d}^2 + \tilde{\Psi}_{2q}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Динаміка синхронної системи координат запишеться:

$$\varepsilon = \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{|\hat{\Psi}_2|}. \quad (3.14)$$

Спостерігач вектору потокозчеплення ротору запишемо у вигляді

$$\left| \dot{\hat{\Psi}}_2 \right| = -\alpha \hat{\Psi}_2 + \alpha L_m \dot{i}_{1d}. \quad (3.15)$$

Після полеорієнтації за вектором потокозчеплення електромеханічна підсистема АД матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_C) \\ M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\Psi_{2d} \dot{i}_{1q} - \tilde{\Psi}_{2q} \dot{i}_{1d}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\dot{i}_{1q} = -\gamma i_{1q} - \alpha \beta \Psi_{2q} \beta p_n - \beta p_n \omega \Psi_{2d} + v_q$$

$$\dot{\tilde{i}}_{1q} = -\gamma \tilde{i}_{1q} + \alpha \beta \tilde{\Psi}_q + \beta p_n \omega (\Psi^* - \tilde{\Psi}_d) - \gamma i_{1q}^* - \dot{i}_{1q}^* + v_d \quad (3.17)$$

де i_{1q}^* визначено у вигляді

$$i_{1q}^* = \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\Psi^*}. \quad (3.18)$$

Електромагнітна система матиме вигляд

$$\begin{aligned}
|\dot{\hat{\psi}}_2| &= -\alpha\hat{\psi}_2 + \alpha L_m \dot{i}_{1d} \\
\dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \beta p_n \omega \psi_{1d} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
\dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + \alpha L_m \dot{i}_{1d}.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Згідно принципу розділення необхідно замінити в алгоритмі керування моментом та потокозчепленням реальний модуль вектора потокозчеплення $|\psi_2|$ на його оцінене значення $|\hat{\psi}_2|$, а також реальну похибку відпрацювання модуля потокозчеплення $\tilde{\psi}$ на похибку відпрацювання оціненого значення модуля потокозчеплення $\tilde{\tilde{\psi}}$, визначену як

$$\tilde{\tilde{\psi}} = |\hat{\psi}_2| - \psi^* \tag{3.20}$$

4.2.1 Синтез підсистеми потокозчеплення ротора

Для електромагнітної підсистеми на основі спостерігача

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \mathbf{u}_{1a} \\ \mathbf{u}_{1b} \end{pmatrix} &= e^{J\varepsilon_0} \left[\sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_{1q} + v_d \\ \omega_0 i_{1d} + v_q \end{pmatrix} \right], e^{J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \\
\begin{pmatrix} \dot{i}_{1d} \\ \dot{i}_{1q} \end{pmatrix} &= e^{J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} \dot{i}_{1a} \\ \dot{i}_{1b} \end{pmatrix}, e^{J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \\
\cos \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2a}}{|\hat{\psi}_2|} \\
\sin \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2b}}{|\hat{\psi}_2|}
\end{aligned} \tag{3.21}$$

визначивши похибки відпрацювання струмів статора по осі d у вигляді

$$\tilde{i}_{1d} = i_{1d} - i_{1d}^* \tag{3.22}$$

рівняння(3.16),(3.19) у формі похибок відпрацювання запишуться

$$\begin{aligned}\ddot{\tilde{\psi}} &= -\alpha\ddot{\tilde{\psi}} + \alpha L_m \ddot{\tilde{i}}_{1d} + \alpha L_m \dot{i}_{1d}^* - \dot{\psi}^* \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma\dot{\tilde{i}}_{1d} + \alpha\beta(|\tilde{\psi}_2| + \tilde{\psi}_{2d}) + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q},\end{aligned}\quad (3.23)$$

Аналогічно, як це виконано для ідеального полеорієнтування, керуюча дія формується як:

$$\begin{aligned}x_d &= k_{iid} \tilde{i}_{1d} \\ v_d &= -k_{idl} \dot{\tilde{i}}_{1d} - x_d - \gamma i_{1d}^* + \beta p_n \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^*,\end{aligned}\quad (3.24)$$

де $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора модуля потокозчеплення ротора,

Для електромагнітної підсистеми (3.17) синтезуємо:

- регулятор модуля потокозчеплення

$$\begin{aligned}i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi}) \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi},\end{aligned}\quad (3.25)$$

- регулятор струму польової компоненти вектора струму статора i_{1d}

$$\begin{aligned}\dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{1q} \\ v_q &= -k_{iq1} \dot{\tilde{i}}_{1q} - x_q - \gamma i_{1q}^* + \beta p_n \omega |\psi_2| + \dot{i}_{1q}^*\end{aligned}\quad (3.26)$$

де $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора

модуля потокозчеплення ротора, коефіцієнт пропорційності та інтегральної дії регулятора струму по осі (d), \dot{i}_{1d}^* , $(k_{idl}, k_{id}) > 0$ розраховується.

Після підстановки модифікованих (3.26) – (3.25) та отримаємо наступні рівняння похибок відпрацювання моменту

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (\tilde{i}_{1q} + \tilde{i}_{1d}) + \psi^* \tilde{i}_{1q} - \tilde{\psi}_q (\tilde{i}_{1d} + \tilde{i}_{1q}) \right] \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -k_{id} \tilde{i}_{1q} - x_q - \beta p_n \tilde{\psi}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_q \\ \dot{x}_q &= k_{iq} \tilde{i}_{1q} \end{aligned} \quad (3.28)$$

та координат електромагнітної підсистеми АД

$$\begin{aligned} \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -(\alpha + k_{\psi 1}) \tilde{\psi} - x_\psi - \alpha L_m \tilde{i}_{1d} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= k_{id} \tilde{i}_{1d} \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q} \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \tilde{\psi}_{2q} \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\varepsilon = \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*}, \quad (3.32)$$

де $k_{iq} = k_{iq1} + \gamma, k_{id} = k_{id1} + \gamma$.

Рівняння динаміки похибок відпрацювання моменту та потокозчеплення (3.27) – (3.32), в порівнянні з отриманими при вимірюванні вектора потокозчеплення, ротора мають додаткові збурення (компоненти залежні від $(\tilde{\psi}_{2d}, \tilde{\psi}_{2q})$), що є функцією похибок оцінювання потокозчеплень ротора.

Оскільки номінальна динаміка (3.27) – (3.32) при $\tilde{\psi}_{2d} = \tilde{\psi}_{2q} = 0$ є лінійною і асимптотично стійкою для всіх $(k_{\psi i}, k_{\psi 1}, k_{id}, k_{iq}, k_{ii}) > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_{2q}, \tilde{\psi}_{2q}) = 0$ з умови $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_{2q}, \tilde{\psi}_{2q}) = 0$ і слідує $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}, \tilde{\psi}) = 0$ тому що підсистема оцінювання

(3.31) є включеною послідовно з підсистемами (3.27) — (3.30). Тобто задача симптотичного відпрацювання моменту досягається. З іншого боку, оскільки $\tilde{\psi} = \tilde{\Psi} = \psi_{2q}$, то також досягається мета відпрацювання модуля потокозчеплення ротора і умови асимптотичної прямої орієнтації за вектором потокозчеплення ротора $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0$.

Об'єднані рівняння алгоритму відпрацювання моменту та потокозчеплення ротора вміщують наступні функціональні блоки.

Асимптотично лінійаризуючий регулятор за вимірюваним виходом

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}_{1d} \\ \mathbf{u}_{1q} \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 \mathbf{i}_{1q} + v_d \\ \omega_0 \mathbf{i}_{1d} + v_q \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_{2a} &= -\alpha \hat{\psi}_{2a} - \omega_2 \hat{\psi}_{2b} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1a} \\ \dot{\hat{\psi}}_{2b} &= -\alpha \hat{\psi}_{2b} + \omega_2 \hat{\psi}_{2a} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1b}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{\mathbf{i}}_{1q} \\ v_q &= -k_{iq1} \tilde{\mathbf{i}}_{1q} - x_q - \gamma \mathbf{i}_{1q}^* + \beta p_n \omega |\psi_2| + \mathbf{i}_{1q}^*. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Регулятор моменту

$$\mathbf{i}_{1q}^* \frac{1}{\mu_1 \psi^*} M^*, \quad \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}. \quad (3.36)$$

Регулятор струму по осі (d)

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{\mathbf{i}}_{1q} \\ v_q &= -k_{iq1} \tilde{\mathbf{i}}_{1q} - x_q - \gamma \mathbf{i}_{1q}^* + \beta p_n \omega |\psi_2| + \mathbf{i}_{1q}^* \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\mathbf{i}_{1d}^* = \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{M^*}{\psi^*} - \frac{\dot{M}^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right). \quad (3.38)$$

Регулятор модуля потокозчеплення

$$\begin{aligned} i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi}) \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Регулятор струму по осі (d)

$$\begin{aligned} x_d &= k_{iid} \tilde{i}_{1d} \\ v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d - \gamma i_{1d}^* + \beta p_n \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^* \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\dot{i}_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_{\psi} \left[-(\alpha + k_{\psi}) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_{1d} + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_d - x_{\psi} \right] - \dot{x}_{\psi} \right\} \quad (3.41)$$

Розрахунок коефіцієнтів зворотних зв'язків за інтегральним (k_{ii}) та позиційними (k_{iq} , k_{id}) складовими регуляторів струму визначимо наступним чином:

$$\begin{aligned} k_{ii} &= \frac{k_i^2}{2} (\xi = 0.707), \\ k_{ii} &= \frac{k_i^2}{4} (\xi = 1), \\ k_{\psi i} &= \frac{(k_{\psi} + \alpha)^2}{2} (\xi = 0.707), \\ k_{\psi i} &= \frac{(k_{\psi} + \alpha)^2}{4} (\xi = 1). \end{aligned} \quad (3.42)$$

Розділення процесів за часом у зовнішньому контурі потокозчеплення та контурі струму досягнеться за такої умови

$$\omega_{oc} \geq (2.3) \omega_{0\psi}, \quad (3.43)$$

Для підсистеми відпрацювання координат електромеханічної підсистеми (3.16) та електромагнітної (3.29)-(3.30), буде лінійно повністю розв'язаними і асимптотично стійкими

$$\begin{aligned}x_2 &= (x_\psi, \tilde{\psi}, x_d, \tilde{i}_{1d})^T = 0, \\x_1 &= (x_q, \tilde{i}_{1q})^T = 0.\end{aligned}\tag{3.44}$$

Структурна система відпрацювання моменту та потокозчеплення наведена на рис. 4.1.

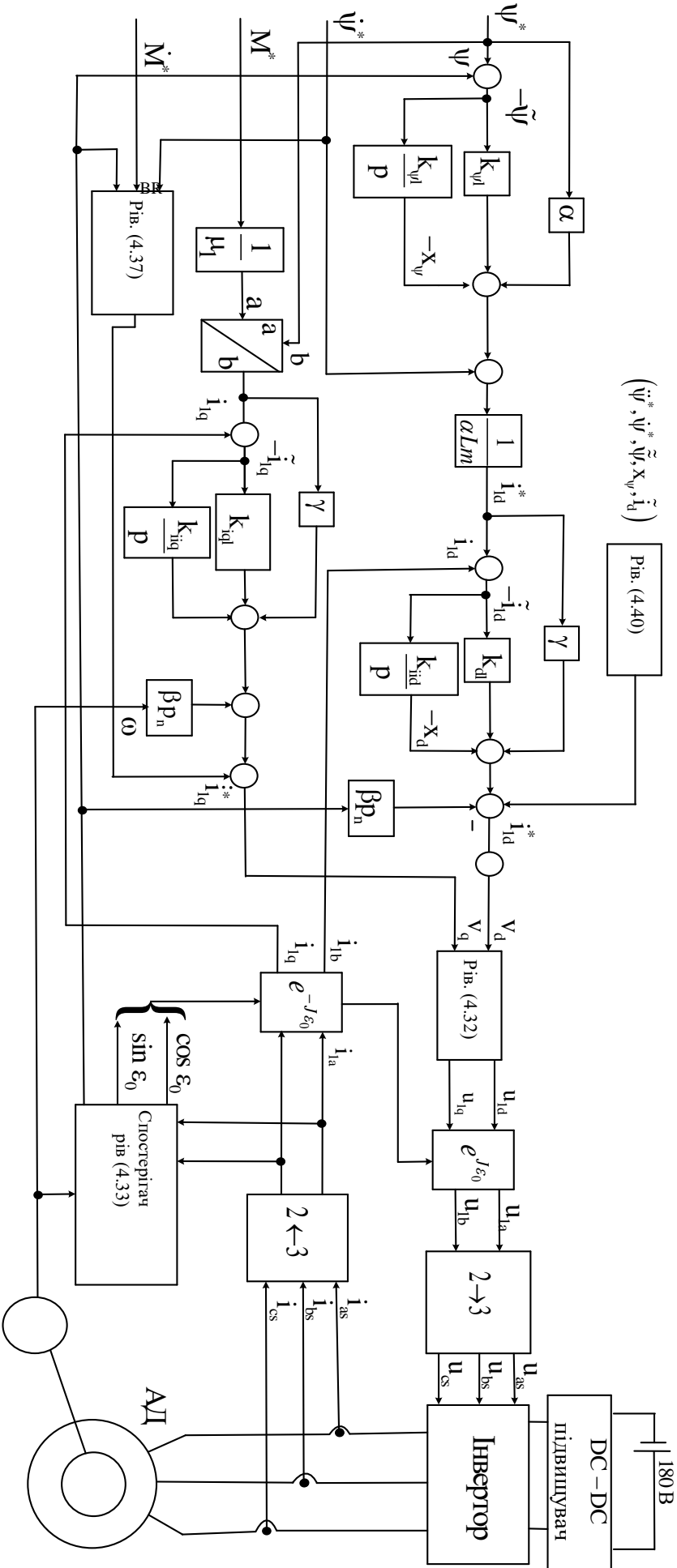


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи відпрацювання моменту та потужності

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто математичну модель прямого векторного керування моментом АД з КЗ ротором, по відпрацювання заданих траекторій моментом. Розібраний синтез алгоритму непрямого керування моментом АД.

2. Здійснений розрахунок коефіцієнтів регуляторів а саме: модульний оптимум, струмового контуру.

3. Побудована структурна схема відпрацювання моменту та потокозчеплення

5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

В цьому розділі виконується дослідження шляхом моделювання розробленої системи векторного керування моментом, при русі візка по прямій ділянці шляху та під кутом 7° .

Модель прямого векторного керування моментом, зображена на рис 5.1, виконано за допомогою "Simulink" в програмі "MATLAB" складено на основі рівнянь визначених в розділі 4 та параметрів двигуна в табл. 2.4.

Керування АД має включати в себе етапи збудження, відпрацювання заданої траєкторії моменту при розгоні, на прямолінійній ділянці, під кутом 7°

Результати моделювання під кутом 7° будуть зображено на рис. 5.2, рис. 5.6.

В нульовий момент часу двигун збуджується з початкового значення 0.02 Вб до заданого значення потокозчеплення 0.9 за 0.5 с;

Відпрацювання траєкторії моменту почнеться в 0.6 с секунду. До значення 10 Нм, за 4 с. Задані потокозчеплення та момент а також їхні похибки показано у рис 5.1.

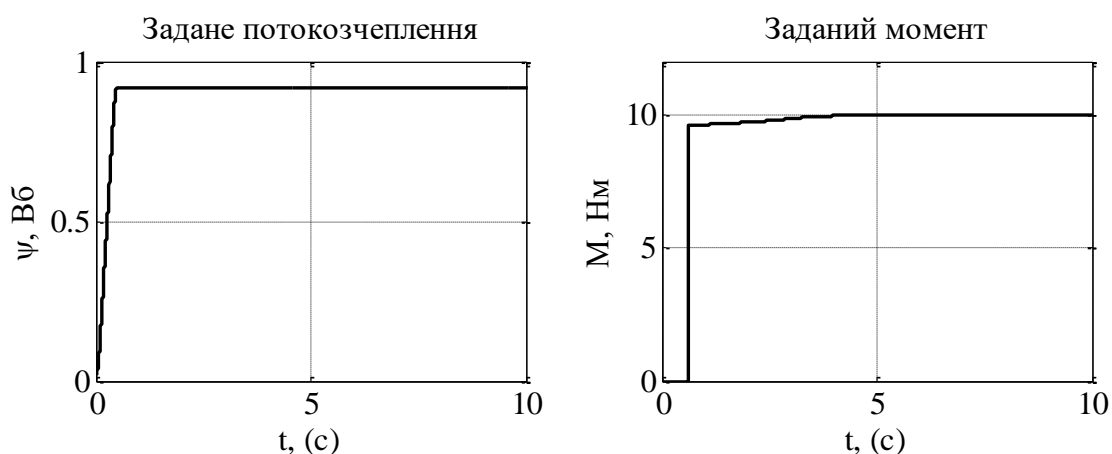


Рисунок 5.2 – Завдання відпрацювання потокозчеплення 0.9 Вб та моменту 10 Нм.

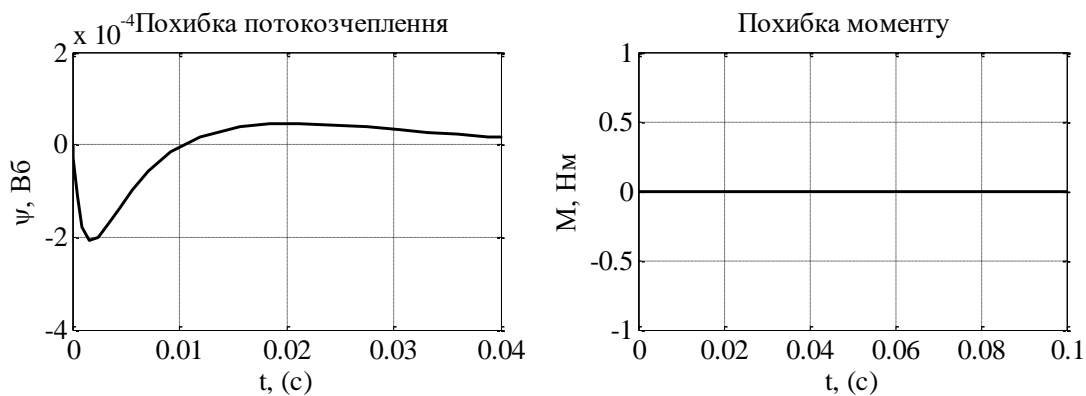


Рисунок 5.1 – Похибки відпрацювання потокозчеплення та моменту

З графіків похибок потокозчеплення та моменту, можна побачити, що похибка потокозчеплення практично нульова при -4 степені десяти, задача керування моментом повністю виконується, похибка відсутня..

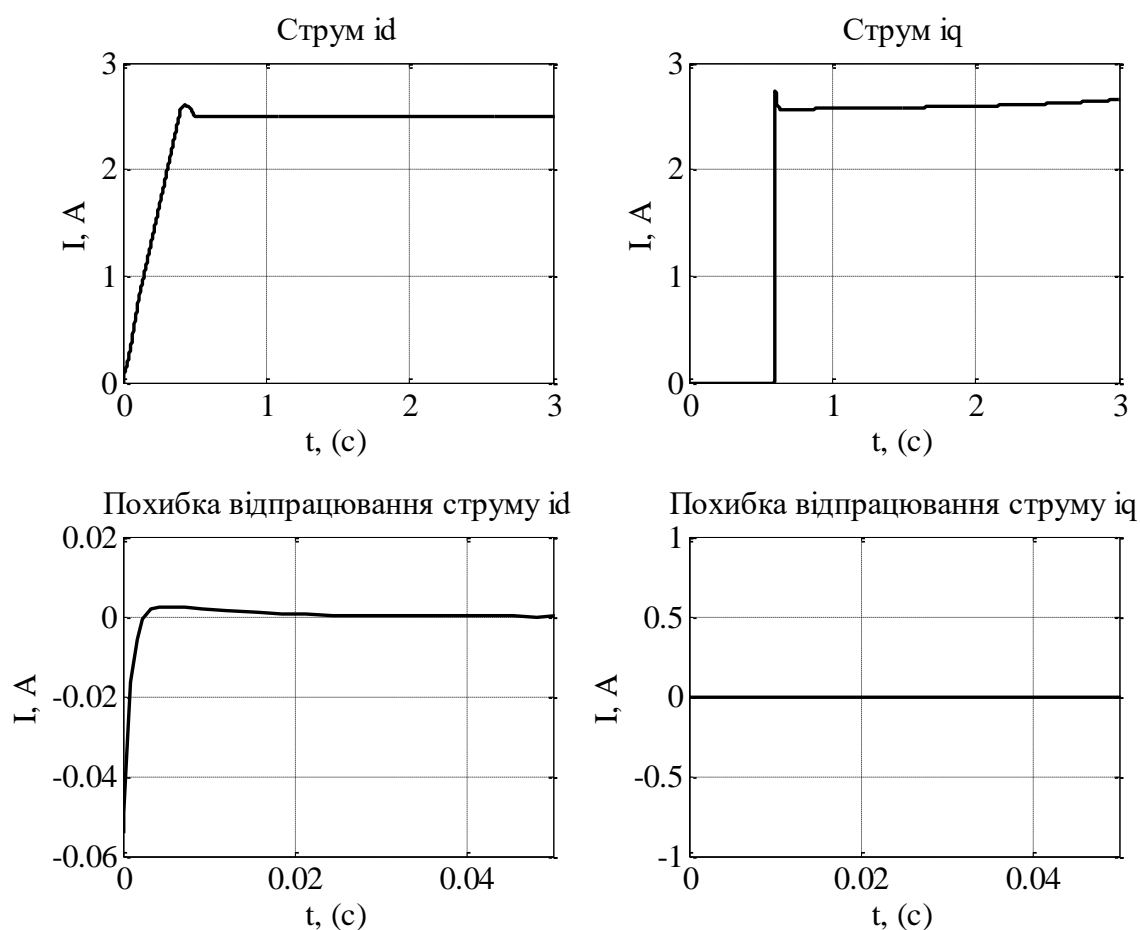


Рисунок 5.3 – Графіки відпрацювання та похибки струмів i_d , i_q

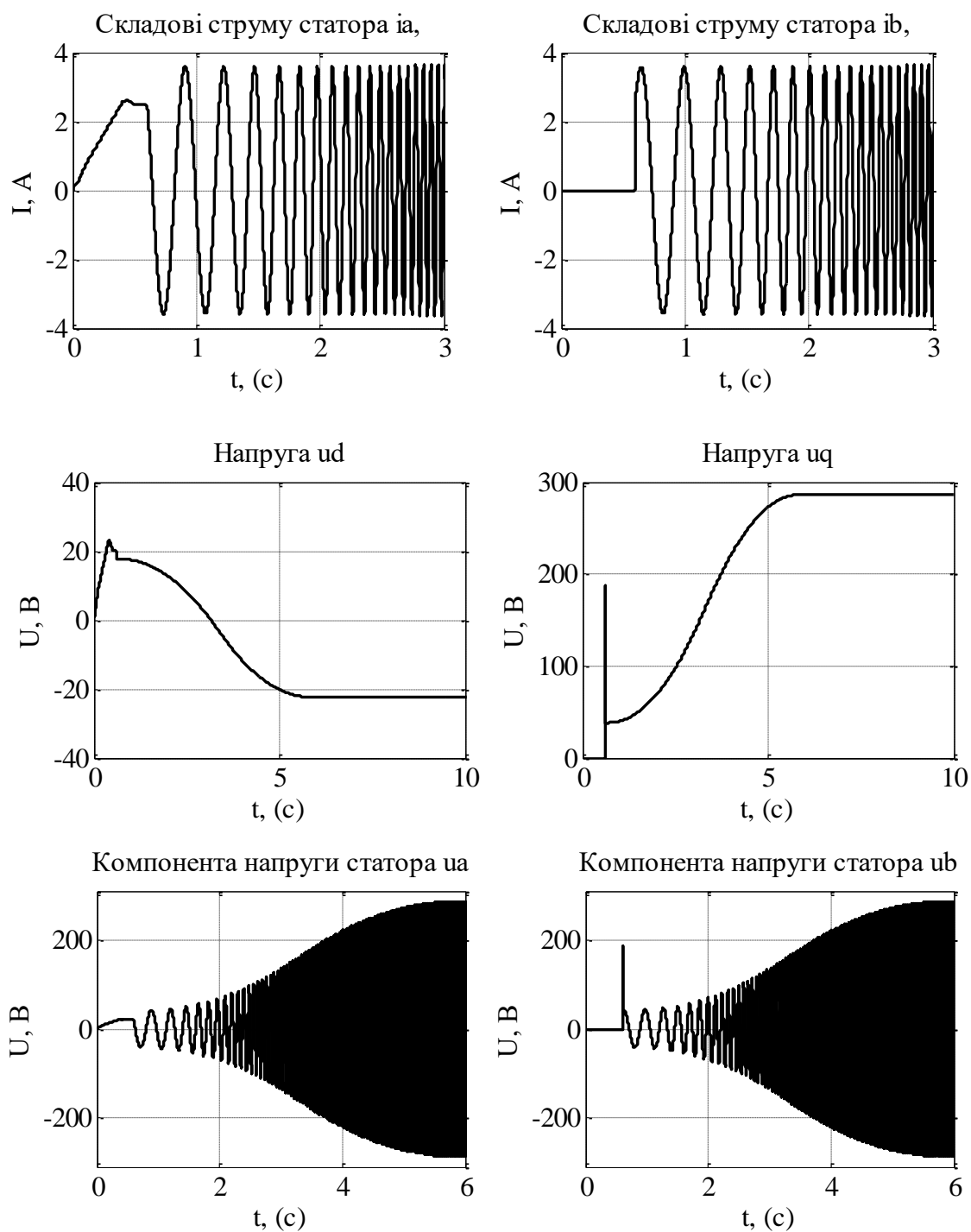


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів напруги u_d , u_q та їх компоненти напруги статора

З рис. 5.3-5.4 графіків відпрацювання та похибок струмів i_d , i_q та перехідних процесів напруги u_d , u_q їх компоненти напруги в координатах (а – б) видно, що при накиданні моменту виникає зростання напруга u_q на 22 В, що задає значення струму i_q , а напруга u_d видає керуючу дію значенням -22 В, мета

якої компенсувати появу струму i_d , що виникає при накиданні моменту, i_d^* при цьому не змінюється, про що також свідчить графік його похибки.

Розглянемо як зміниться кутова швидкість, прискорення, переміщення та кутової швидкості на рис 5.5

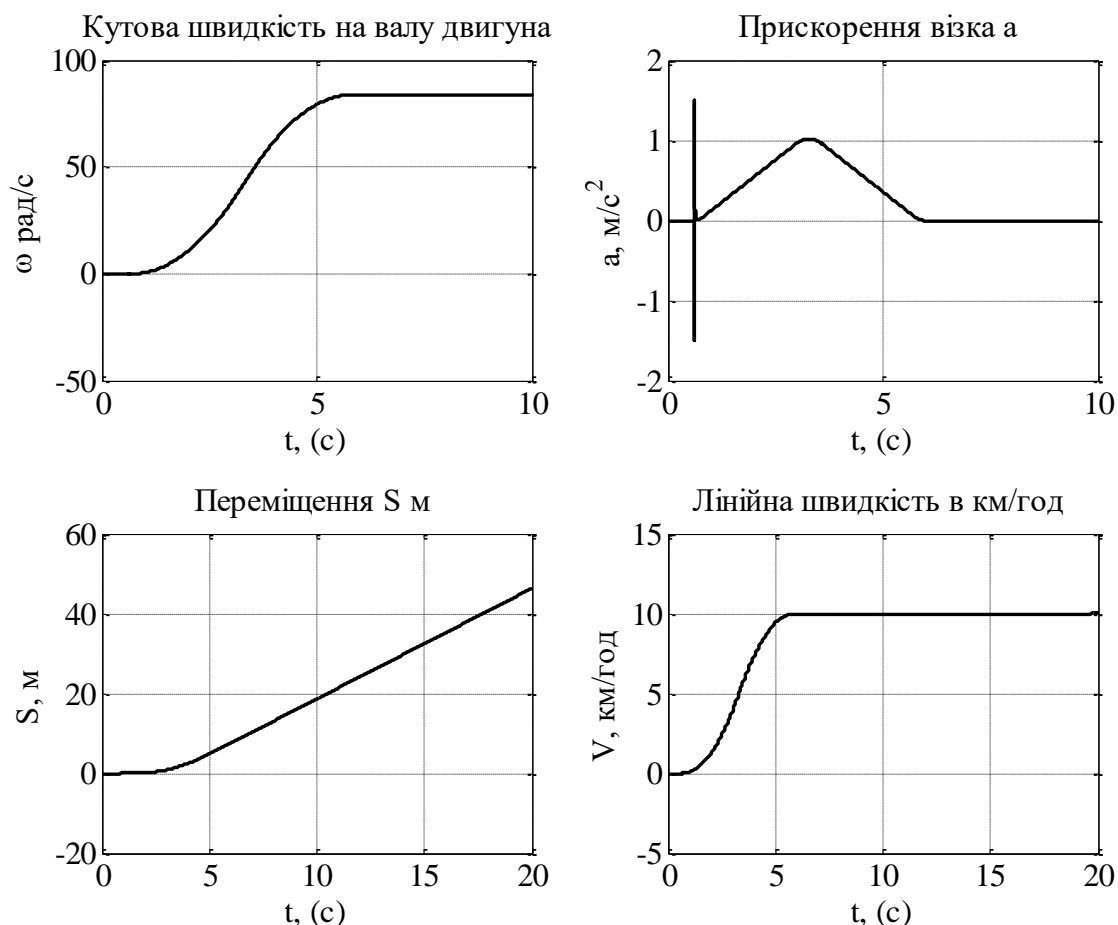


Рисунок 5.5 – Графіки кутової швидкості двигуна, прискорення, переміщення та кутової швидкості.

Кутової швидкості двигуна в момент часу накидання моменту 0.6 с почне збільшуватись по s- подібній траєкторії до усталеного значення 83 рад/с. Прискорення набуває максимального значення 1.5 м/с, при накиданні моменту а коли швидкість двигуна стає усталеною стає 1м/с і зменшується до нуля, оскільки візок розігнався і їде з усталеною швидкістю.

З рафіку переміщення видно що візок проїхав 18.5 м за 10 с. Лінійна швидкість набула максимального значення 10 км/год

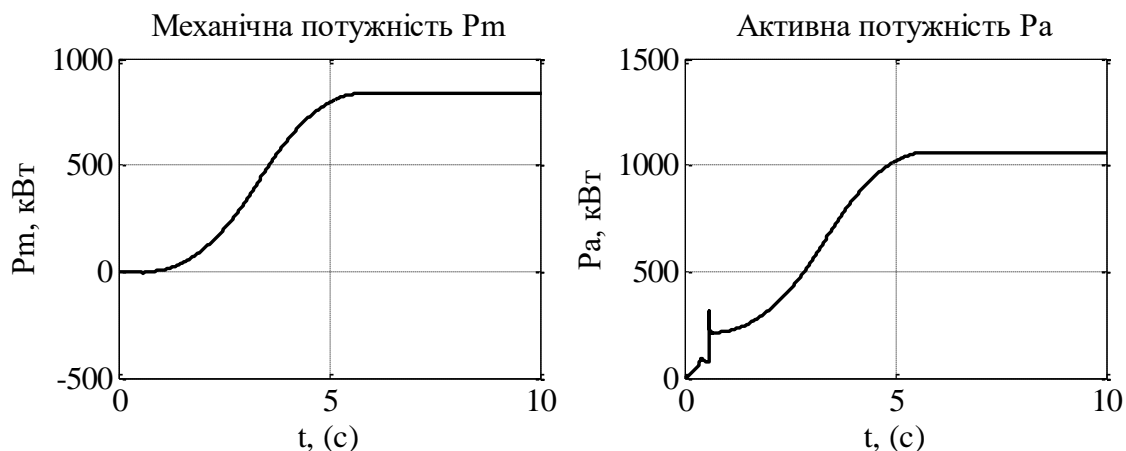


Рисунок 5.6 – Графіки перехідних процесів механічної та активної потужності

Тепер розглянемо моделювання при русі електровізка на рівній поверхні. Результати моделювання при прямолінійному русі будуть зображено на рис. 5.6-рис. 5.10.

Відпрацювання траєкторії моменту почнеться в 0.6 с секунду. До значення 1 Нм, за 4.5 с. Задані потокозчеплення та момент а також їхні похибки показано у рис 5.6.

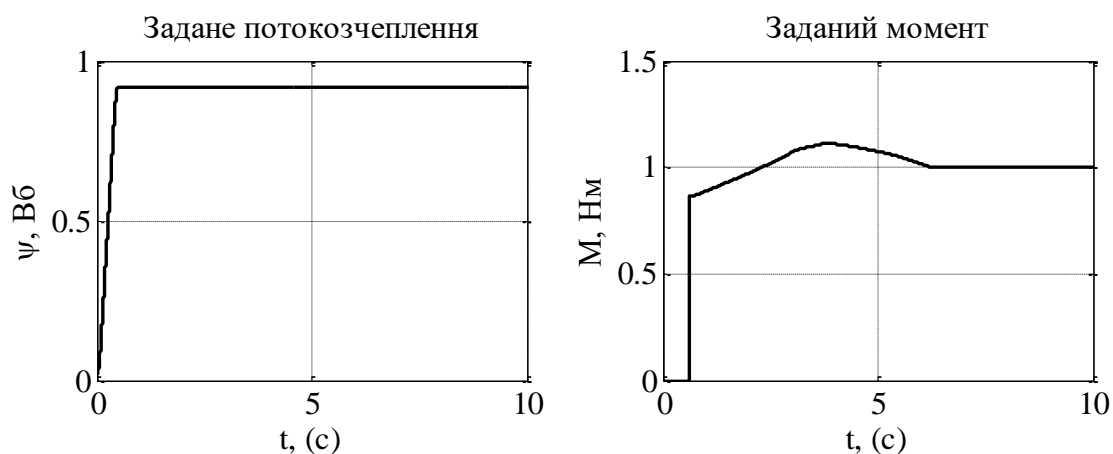


Рисунок 5.7 – Завдання відпрацювання потокозчеплення 0.9 Вб та моменту 1 Нм.

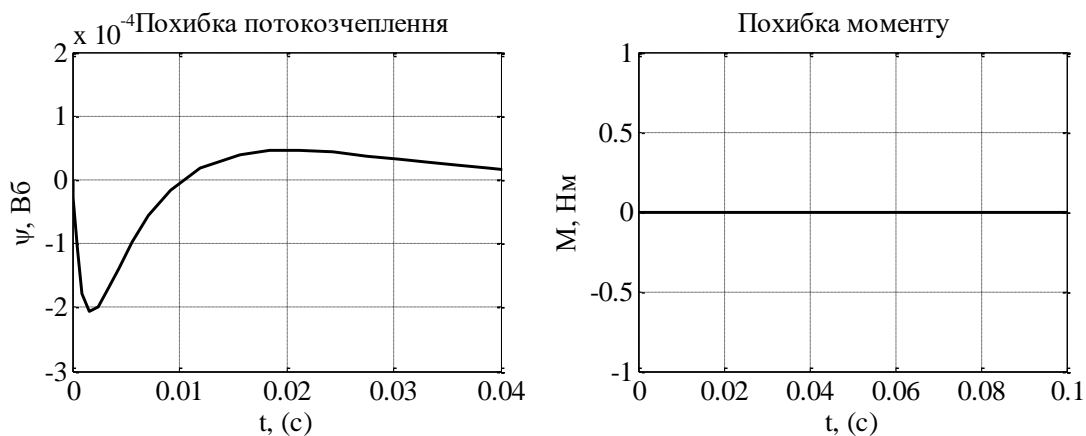


Рисунок 5.8 – Похибки потокозчеплення 0.9 Вб та моменту 1 Нм.

З графіків похибок потокозчеплення та моменту, можна побачити, що задача керування моментом повністю виконується, похибка відсутня, похибка потокозчеплення практично нульова при -4 степені десяти.

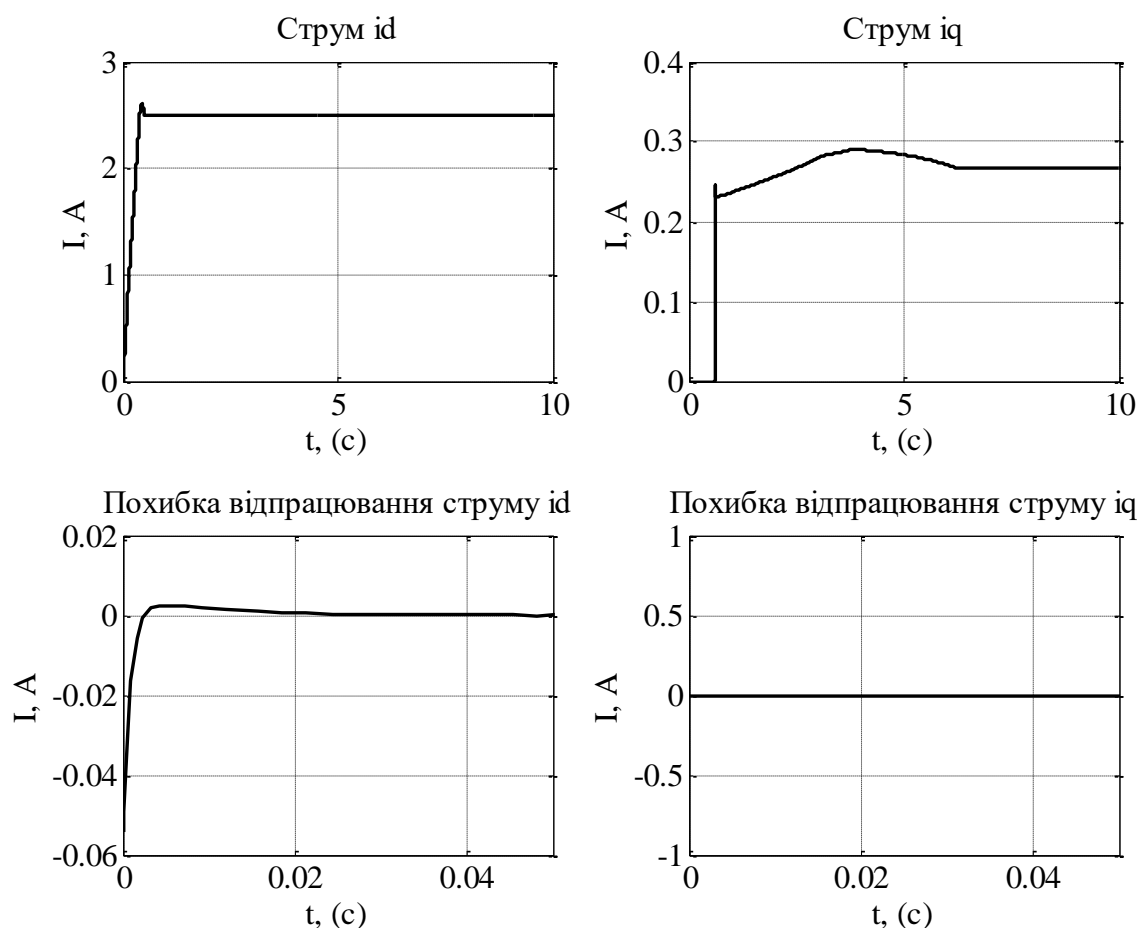


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси відпрацювання та похибки струмів i_d , i_q .

Як видно з рис 5.8 струми виходять на значення номінальні близькі до номінальних.

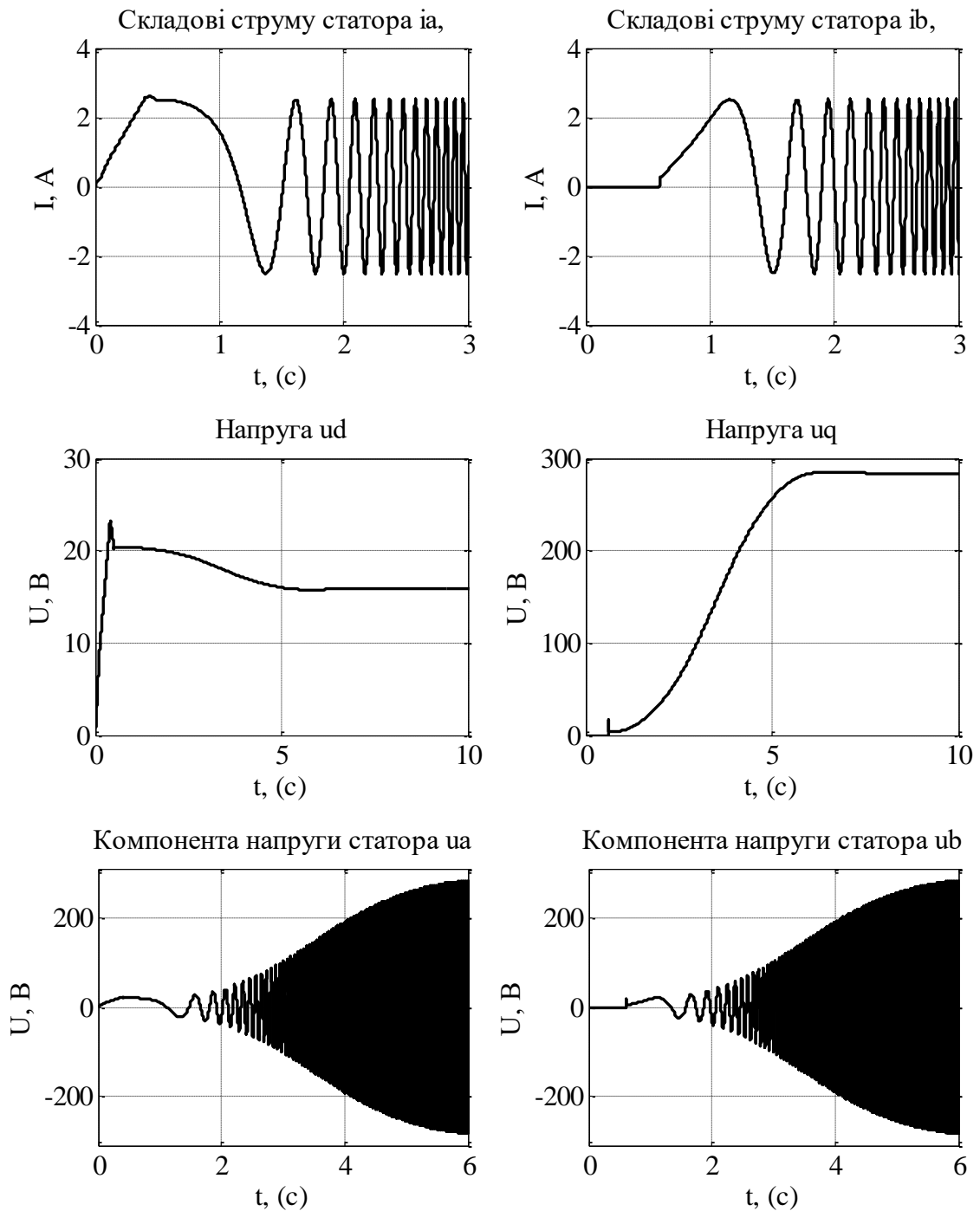


Рисунок 5.9 – Графіки перехідних процесів напруги u_d , u_q та їх компоненти напруги статора

З рис. 5.8-5.9 графіків відпрацювання та похибок струмів i_d , i_q та перехідних процесів напруги u_d , u_q їх компоненти напруги в координатах (a – b) видно, що при накиданні моменту виникає зростання напруга u_q на 23 В, що

задає значення струму i_q , а напруга u_d видає керуючу дію значенням 15 В, мета якої компенсувати появу струму i_d , що виникає при накиданні моменту, i_d^* при цьому не змінюється, про що також свідчить графік його похибки.

Графіки зміни: кутова швидкість, прискорення, переміщення та кутової швидкості на рис 5.10.

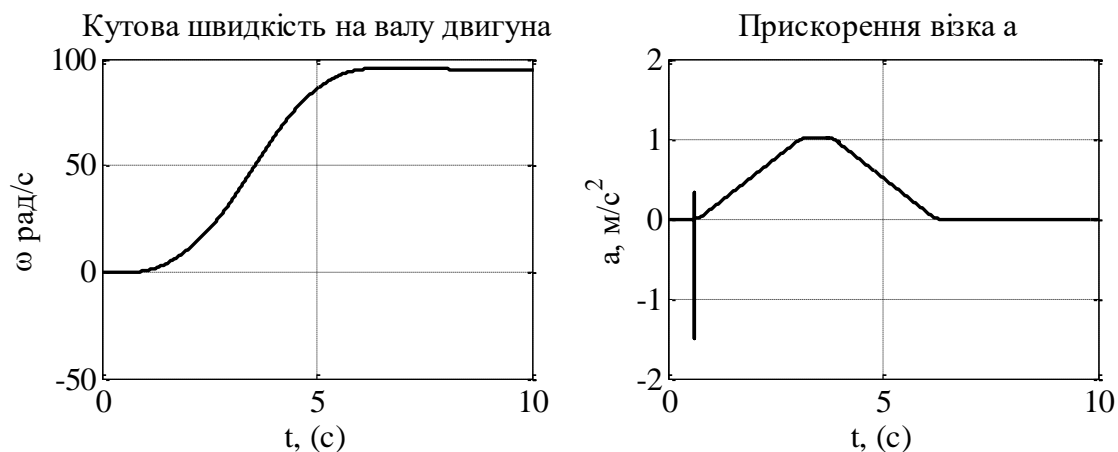


Рисунок 5.10 – Графіки кутової швидкості двигуна, прискорення

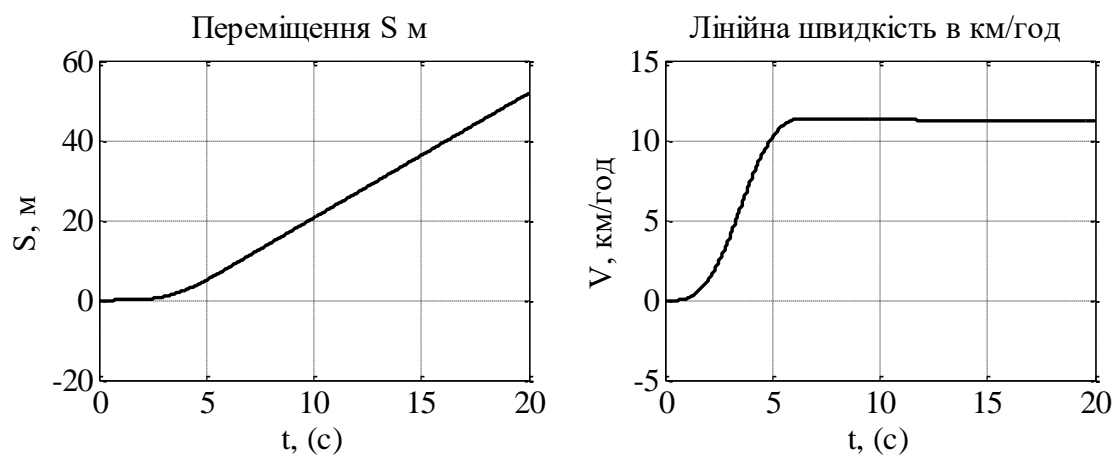


Рисунок 5.11 – Графіки переміщення та кутової швидкості.

В рис 5.10 кутова швидкості двигуна в момент часу накидання моменту 0.6 с почне збільшуватись по s- подібній траєкторії до усталеного значення 93 рад/с. Прискорення набуває значення 1 м/с, з усталенням швидкості стає рівним нулю.

З графіку, що на рис 5.11 видно що переміщення візка рівне 50 м за 20 с. А лінійна швидкість набула значення 11 км/год оскільки візок їхав по прямолінійній ділянці.

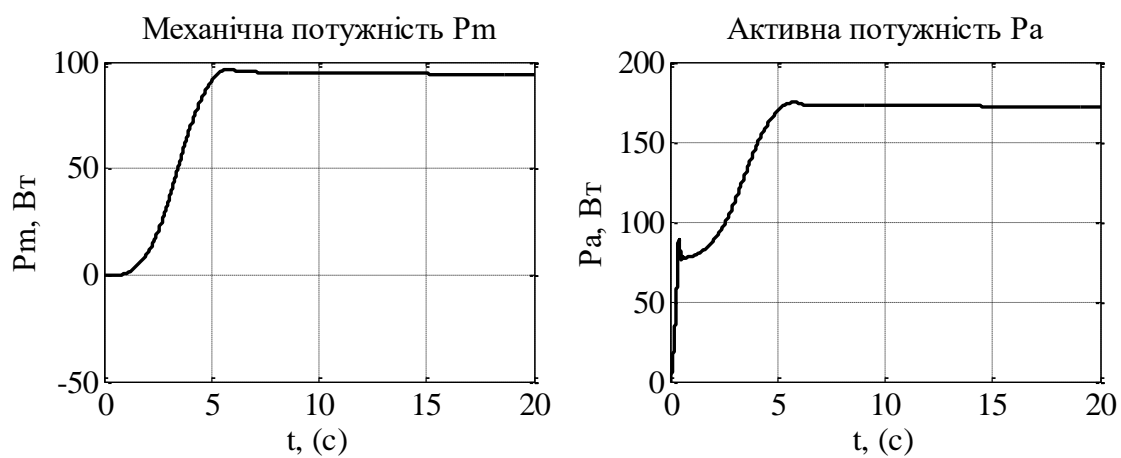


Рисунок 5.10 – Графіки перехідних процесів механічної та активної потужності

Висновки до розділу 5

1. Досліджено перехідні процеси при відпрацюванні заданих траєкторій моменту та потокозчеплення. При цьому було виявлено, що розроблена модель забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та потокозчеплення, забезпечуючих поставлену задачу.

2. За отриманими результатами моделювання дані збігаються з розрахунковими, а показники якості є задовільними для роботи електровізка.

ВИСНОВКИ

1. В першому розділі розглянули тенденції, види, типи та вимоги до електровізків, параметри, яких при виборі двигуна будуть розглянуті як критичні. також було проведено порівняльне оцінювання двигунів най підходящий з яких буде застосовуються при проектуванні електровізків. За проведеним оцінюванням був вибраний АД з КЗ ротором.

2. З розглянутих в попередньому розділі вимог до електровізка був вибраний тип візка OSD-PCC1600 для якого були розраховані зусилля і за якими був розрахований електродвигун, та редуктор. Редуктор був вибраний для того, щоб зменшити швидкість та збільшити момент на валу. Розраховані параметри двигуна і перерахунок їх з Г-подібної схеми заміщення, в Т-подібну.

3. Здійснена побудована ФС електроприводу та розрахований енкодер серії ARC 50 і теплове реле РТ 1310.

4. Розглянута постановка задачі та синтез прямого векторного керування моменту-потокощеплення. Оскільки даний спосіб керування забезпечу асимптотичне відпрацювання моменту та дозволяє забезпечити високу точність регулювання швидкості та моменту на валу двигуна. Розібраний синтез алгоритму непрямого керування моментом АД з КЗ ротором.

5. Розроблена модель прямого векторного керування моментом та потокозчепленням. Виконано дослідження шляхом моделювання розробленої системи векторного керування.

Досліджено перехідні процеси при відпрацюванні заданих траєкторій моменту та потокозчеплення. При цьому було виявлено, що розроблена модель забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформація про підприємство URL: <http://www.tems.com.ua/uk/> (дата звернення 18.05.2019)
2. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 11.04.2019).
3. Поняття електровізок та нвалідний візок для людини URL: <http://www.electra.com.ua/otovarah/elektronabor-dlya-invalidnoj-kolyaski/25-o-tovarakh.html> (дата звернення 11.04.2019).
4. Історія інвалідних візків URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 11.04.2019).
5. Керування електровізком URL: http://www.poezdvl.com/vl11/vl11_109.html (дата звернення 15.04.2019).
6. Характеристики електровізків URL: <https://ortocomfort.ua/ua/articles/view/2> (дата звернення 15.04.2019).
7. Види інвалідних візків URL: <http://www.e-bike.com.ua/viewarticle/id/480/> (дата звернення 15.04.2019).
8. Види інвалідних візків URL: http://www.poezdvl.com/vl11/vl11_09.html (дата звернення 15.04.2019).
9. Поняття диференціал URL: <https://auto.ria.com/terms/differenczial/> (дата звернення 15.04.2019).
10. Поєднання двигуна з диференціалом URL: <http://zauto.com.ua/holovna-peredacha-i-dyfereytsial-avto/> (дата звернення 15.04.2019).
11. Поняття мотор-колеса URL: <https://www.voltbikes.ru/blog/electro/chto-takoe-motor-koleso/> (дата звернення 15.04.2019).

12. Мотор колесо та його типи URL: <https://www.voltbikes.ru/blog/electro/chto-takoe-motor-koleso/> (дата звернення 16.04.2019).
13. Безредукторні та прямопривідні мотор-колеса URL: <http://www.electra.com.ua/tovarah/elektronabor-dlya-invalidnoj-kolyaski/25-o-tovarakh.html> (дата звернення 17.04.2019).
14. Інтернет магазин електровізків URL: <https://medi.org.ua> (дата звернення 17.04.2019).
15. Вимоги до електровізків URL: <https://studfiles.net/preview/3752374/page:5/> (дата звернення 20.04.2019).
16. Переваги та недоліки ДПС URL: <https://studopedia.org/4-100834.html/> (дата звернення 20.04.2019).
17. Переваги та недоліки мотор коліс URL: <http://www.electra.com.ua/ebike/196-kakoe-motor-koleso-luchshe-pryamoprivodnoe-ili-reduktornoe.html> (дата звернення 11.04.2019).
18. Переваги та недоліки АД з КЗ ротором URL: <https://studopedia.org/4-100840.html/> (дата звернення 11.04.2019).
19. Переваги та недоліки СДПМ URL: <https://studopedia.org/>(дата звернення 11.04.2019).
20. Інтернет магазин інвалідних електровізків URL: <http://www.e-bike.com.ua/motor-kolesa-i-elektrodvigateli/motor-kolesa-reduktornuue>(дата звернення 11.04.2019).
21. Розрахунок тягового двигуна URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/viewFile/1050/1026> (дата звернення 11.04.2019).
22. Каталог сайту URL: <https://baldinelli.ua/ckladnaya-kolyaska-osd-s-ielektroprivodom-rсс?gclid=CjwKCAjw8e7mBRBsEiwAPVxxiP2U> (дата

звернення

11.04.2019

).3UzEKknI0Fz83JhxxoNt59cquDtfY6LwDrJpeAks6Is7TImHhBoCw_IQAv
D_BwE (дата звернення 21.04.2019).

23. Коефіцієнт тертя. URL: <https://revolution.allbest.ru/transport/d00324056.html> (дата звернення 22.04.2019).

24. Кравчик А. Э. Шлаф М. А., Афонин В. И. Соболенская. Асинхронные двигатели серии 4А: Київ, 1982. 504с. (дата звернення 11.04.2019).

25. Магазин редукторів URL: https://prom.ua/search?sarch_term+40 (дата звернення 11.04.2019).

26. Розрахунок параметрів схеми заміщення URL: <http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/1481/1/10-11-524.pdf>(дата звернення 11.04.2019).

27. Перевірка двигуна по нагріву URL: http://ela.kpi.ua/bitstream/123789/257/1/Konstr_verstativ_mashin.pdf (дата звернення 15.04.2019).

28. Датчик швидкості URL: <https://www.taho.com.ua/datchiki-skorosti-vse-chno-puzhno-znat.html> (дата звернення 25.04.2019).

29. Компоненти перетворювача URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/IGBT> (дата звернення 25.04.2019).

30. Опторозв'язка URL: <https://radioskot.ru/publ/raznoe/optorazvjazka/18-1-0-222> (дата звернення 25.04.2019).

31. Розрахунок еncoderів URL: <https://www.translatorscafe.com> (дата звернення 11.04.2019).

32. Точний калькулятор переводу швидкості URL: <https://alldatasheet.com> (дата звернення 11.04.2019).

33. Інтернет магазин URL: <https://prom.ua> (дата звернення 11.04.2019).

34. Розрахунок теплового реле URL: <https://blog.electrostat.com.ua/teplovoe-rele.html> (дата звернення 12.04.2019).

35. Інтернет магазин URL: <https://prom.ua> (дата звернення 12.04.2019).

36. Завдання відпрацювання моменту-потоку
<http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/13141/08-Peresada.pdf?sequence=1>

URL: