

**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

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

**Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра**

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,
електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Система автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-
кур'єра

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-62

Іванов Микита Дмитрович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник **доцент, к.т.н., доцент Приймак Богдан Іванович**
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент **доцент, к.т.н., доцент Галіновський Олександр Михайлович**
(посада, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

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

Студент


(підпис)

Київ – 2020 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				141.0108.026.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Іванов М.Д.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Приймак Б.І.				2	6
Консульт.					НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС- ЕП Гр. ЕП-62	
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Система автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-кур'єра

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«__» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Іванову Микиті Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Система автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-кур'єра»

керівник проекту: Приймак Богдан Іванович, к.т.н., доц. _____,

(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 радіус колеса=27 см, максимальна маса робота = 1000 кг мінімальна маса робота = 500 кг , максимальне прискорення=1.5 м/с², максимальна швидкість робота=60 км/год, маса колеса = 17 кг

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; 1. Аналітичний огляд; 2. Вибір електро двигуна та батареї; 3. Розрахунок силового перетворювача та синтез регуляторів; 4. Дослідження динамічних процесів електромеханічної системи керування роботом; 5. Загальний висновок; 6. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Електрична схема принципова; Схема загального виду робота та функціональна схема; Результати моделювання.

6. Дата видачі завдання: 24 березня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Аналітичний огляд проблеми та формування технічних вимог до тягового асинхронного електроприводу (АЕП) робота-кур'єра	05.04.20	
2	Розрахунок потужності електродвигуна, акумуляторної батареї та вибір силового обладнання	20.04.20	
3	Побудова функціональної схеми САК АЕП робота-кур'єра	25.04.20	
4	Математичний опис об'єкта керування, розроблення структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого АЕП робота-кур'єра	10.05.20	
5	Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в САК АЕП робота-кур'єра	20.05.20	
6	Спецчастина	25.05.20	
7	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	05.06.20	

Студент


(підпис)

Микита ІВАНОВ
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Богдан ПРИЙМАК
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 80, рисунків – 33, таблиць – 7

В даному дипломному проекті було спроектовано систему автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-кур'єра. Був проведений аналітичний огляд. Зроблено вибір двигуна. Розроблена функціональна схема системи та здійснений синтез регуляторів для векторного керування. Наведено варіант енергоефективної системи автоматичного керування асинхронним електроприводом, результати моделювання підтвердили працездатність та ефективність спроектованої системи.

Розрахунок і реалізація даного дипломного проекту забезпечувались за допомогою використання наступних програм: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Matlab R2009b,

ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РОБОТ-КУР'ЄР, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ

					141.01080.026.БР		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-кур'єра		
Розроб.		Іванов М.Д.					
Перевір.		Приймак Б.І.					
Затверд.							
Затверд.		Пересада С.М.					
					Літ.	Арк.	Акрушіє
						6	80
					НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського АЕМС-ЕП ЕП-62		

In this diploma project the system of automatic control of the asynchronous electric drive of the robot-courier was designed. An analytical review was conducted. The choice of the engine is made. The functional scheme of the system is developed and the synthesis of regulators for vector control is carried out. A variant of energy-efficient system of automatic control of asynchronous electric drive is given, the simulation results confirmed the efficiency and effectiveness of the designed system. The calculation and implementation of this thesis project was provided through the use of the following programs: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Matlab R2009b,

AC ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, PULSE WIDTH
MODULATION, ELECTRICITY SAVINGS, ROBOT-COURIER, COURIER

					141.01080.026.BW					
	Letter	No of doc..	Sign.	Date						
Devel.	M. Ivanov				Automatic control system for asynchronous electric robot courier		L.	Page.	Pages	
Cheked	B. Pryimak							7	80	
							NTUU KPI them Igor Sikorsky AEMS-EP EP- g62			
N.Contr										
Approved.	S.Peresada									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1. Огляд існуючих роботів-кур'єрів.....	11
1.2. Можливості, задачі роботів та перспектива розвитку.....	14
1.3. Прототип Lotte.....	16
1.4. Формування технічних вимог до до тягового асинхронного електроприводу робота кур'єра.....	18
Висновки до 1 розділу.....	23
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА	24
2.1. Об'єкт дослідження	24
2.2. Складання моделі динаміки робота-кур'єра.....	24
2.3. Розрахунок потужності двигуна	26
2.4. Перевірка правильності вибору двигуна.....	33
2.5. Розрахунок номінальних даних двигуна.....	34
2.6. Розрахунок параметрів Т-подібної схеми.....	36
2.7. Розрахунок параметрів статора і ротора.....	38
2.8. Розрахунок потужності акумуляторної батареї	39
Висновки до 2 розділу.....	41
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ.....	43
3.1 Розрахунок некерованого випрямляча	44
3.2 Розрахунок автономного інвертора напруги.....	45
3.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторного фільтра.....	45
3.4 Розрахунок ємнісного фільтру.....	46
3.5 Розрахунок варистора та вхідного фільтру радіочастот.....	47
3.6 Розрахунок датчиків струму та напруги	48
3.7 Математичне описання АД та інвертора напруги.....	49
3.8 Побудова функціональної схеми системи.....	52

3.9	Синтез регуляторів системи векторного керування АЕП.....	55
3.9.1	Синтез регулятора струму статора I_d	55
3.9.2	Синтез регулятора струму I_d	58
3.9.3	Синтез регулятора потокозчеплення ротора ψ_r	59
3.9.4	Синтез регулятора швидкості.....	61
	Висновки до 3 розділу.....	63
РОЗДІЛ 4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ.....	64
4.1	Опис моделі САК АЕП	64
4.2	Моделювання циклу NEDC-15.....	64
4.3	Спецчастина. Дослідження енергоефективної САК АЕП робота-кур'єра.....	67
	Висновки до 4 розділу.....	72
	ВИСНОВОК.....	73
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	74
	ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА.....	77

ВСТУП

Актуальністю нашої роботи є те, що на сьогоднішній день у світі логістична сфера дуже розвинена та продовжує розвиватися, особливо – це перевезення у межах міста. Користуючись поштою яка зараз є, у межах одного міста, невеликий конверт із документами може їхати до одержувача декілька днів. Цей фактор для бізнесу може завдавати у певних ситуаціях збитків. І загалом, чим швидше відбувається доставка у межах міста, тим краще буде для клієнтів логістичної компанії. Цю проблему можна вирішити, використовуючи роботів-кур'єрів. Наразі є безліч варіантів роботів під кожную задачу яку необхідно вирішити: від перевезення піци до рухомих магазинів.

Вищенаведена проблема, перевезення документів та малогабаритних вантажів по місту, можна вирішити за рахунок нового робота Lotte від компанії Cleveron.

Індустрія роботів зараз дуже поширюється по світу й у багатьох європейських та американських великих містах такі роботи активно виконують велику кількість роботи.

Це питання є дуже актуальним у наш час, а саме у час пандемії, або інших випадках, коли люди не можуть виходити на вулицю. Такі роботи дуже полегшують життя у таких умовах.

Проаналізувавши ціни, невеликі роботи від різних виробників коштують в середньому 2500-3000 доларів. Така ціна є доступною для людей із середнім достатком. У цілому, такі роботи можуть виконувати найрізноманітніші роботи, що полегшить людям життя.

Метою роботи є проєктування та дослідження системи автоматичного керування тяговим асинхронним електроприводом робота-кур'єра з врахуванням режимів, як традиційного, так і енергоефективного векторного керування асинхронним двигуном.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Огляд існуючих роботів-кур'єрів

У світі тема роботів наразі є дуже актуальною. Оскільки роботи починають все більше захоплювати сферу перевезень продуктів, документів та іншого. Сьогодні великі логістичні центри великих компаній уже не використовують людей для перевезення вантажу, а користуються спеціальними роботами, яких на сьогодні є дуже багато. Ось деякі із них, які виконують кур'єрську доставку по місту, або виконують роль пересувного магазину.

Яндекс.Ровер, Росія



Рисунок 1.1 – Яндекс.Ровер

11 листопада 2019 Яндекс анонсував про тест робота «Яндекс.Ровер» призначеного для автономної доставки невеликих вантажів. Їх робот може розпізнавати об'єкти навколо, планувати маршрут, об'їжджати перешкоди, пропускати людей та тварин, а також відмінною його функцією є те, що це він може робити і вдень, і вночі. Наразі йде тестування по вулицям міста, але за роботом наглядає співробітник компанії [1].

EZ-Pro, Renault, Франція

Рисунок 1.2 – робот EZ-Pro

Незвичайний робот від автомобільного концерну Рено – робот EZ-Pro. Цей робот використовується, як автономна точка продажу. У цій системі є людина, але вона виконує роль не водія, а продавця. Сам робот самостійно їде до точки, а людина там виконує продажі, або видачу замовленого товару [1].

Gita, Piaggio, Італія.

Рисунок 1.3 – робот Gita

Робот Gita - це незвичайний робот-кур'єр. Робота людина може використовувати, як персональний вантажний робот. Цей вид робота самостійно адаптується до швидкості людини і рухається за нею, але для цього людина

повинна носити спеціальний пасок за яким саме і слідує робот. Також цього робота можна відправити у якусь точку і він відправиться туди самостійно [1].

Lotte, Cleveron, Естонія



Рисунок 1.4 – робот Lotte

Робот Lotte – це спеціальний робот, який призначений для доставки посилок у комерційному напрямі. Він обладнаний спеціальним маніпулятором, який іде по маршруту і збирає посилки, а потім по іншому маршруту їх розвозить [1].

Moby Mart, Wheelys, Швеція



Рисунок 1.5 – робот Moby Mart

Швецька компанія випустила автономний магазин – робот Moby Mart. Клієнт, за допомогою спеціального додатку у смартфоні, замовляє і сплачує товар, а магазин сам відслідковує наявність товару на полицях та формує список товару у додатку на телефоні, а потім видає товар покупцю [1].

Starship, Starship Technologies, США



Рисунок 1.6 – робот Starship

Робот-кур'єр Starship призначений для транспортування легких вантажів по пішохідним доріжкам, або, у майбутньому, по автомобільним дорогам, коли цей тип доставки буде активно інтегрований у суспільство і будуть створені окремі правила дорожнього руху з участю у русі роботів-кур'єрів [1].

1.2 Можливості, задачі роботів та перспектива розвитку

Можливості роботів.

Дані роботи мають багато можливостей. Із ростом технологій, можливості таких роботів збільшуються. Зараз вони можуть з легкістю будувати собі маршрути, розуміти, що відбувається навколо та з легкістю уникати перешкоди.

Одна зі складних задач цих машин – це чітко слідувати по маршруту, не виїжджаючи на автомобільні дороги, та перетинати ці автомобільні дороги, але вони це можуть.

Наразі для того, щоб робот самостійно виконував поставлений маршрут, необхідно, щоб перші декілька разів разом з ним був оператор, який у випадку будь-якої ситуації візьме керування на себе та уникне аварії. Деякі моделі роботів спроектовані для того, щоб виконувати доставки між маленькими містами на невеликі відстані. Такі моделі здатні пересуватися по автомобільним дорогам і можуть розвивати швидкість у 50 км/год. Але зараз проводять лише тести таких машин через недосконалу систему автопілоту та неможливість повністю оцінювати ситуацію на дорозі.

Задачі роботів.

Вищезазначені роботи виконують лише функцію доставки товару до клієнтів. В Америці, на складах Amazon, весь склад майже повністю автоматизований і усі дії від доставки до складу, сортування та видачі на відправку роблять роботи. Основну роботу з пересування товару по складу виконує саме робот-кур'єр. З однієї сторони, у системах де необхідна точність, такі роботи дуже корисні, але з іншого боку, вони зменшують робочі місця.

Безліч разів ми бачили в інтернеті, як недбало люди-кур'єри відносяться до посилок та нерідко, коли їх везуть або кладуть у поштову скриньку та ламають. Цю проблему також вирішує робот, оскільки весь товар доставляється у закритому контейнері.

Роботи-кур'єри можуть зменшити кількість людей на вулиці та розгрузити потік людей у густо населених містах. Однак це можливо лише при глибокій інтеграції у суспільство.

Компанії які виготовляють таких роботів продають їх у магазини, поштовим компаніям та приватним особам. Середня вартість одного робота становить 3000 доларів, а ціна однієї стандартної доставки складає 2 долари, що є меншою за звичайну доставку кур'єром.

Не слід забувати, що такі роботи використовують електричну енергію і абсолютно безпечні для довкілля, на відміну від своїх конкурентів. Оскільки більша частина доставок виконується на моторолерах або машинах, а вони засмічують навколишнє середовище викидами газу від роботи двигуна. На

сьогоднішній день це питання є дуже актуальне у всьому світі і усі намагаються якось вплинути на це. Це призвело до того, що зараз у Європейських країнах дуже активно набирає популярність електричні автомобілі.

Перспектива розвитку

Перспектива розвитку цього напрямку дуже велика. Зараз це неідеальна система і вона потребує великих зусиль для її налагодження. Над цим працює багато спеціалістів з різним напрямків діяльності. Перед інженерами стоїть питання, щодо оптимального вибору системи електроприводу, розробки нових тягових акумуляторів, які мали б менші габарити і велику ємність та розробку двигуна, який був би енергоефективним. В цілому ведеться розробка у сторону зменшення габаритів системи і збільшення моторесурсну робота.

У майбутньому, роботів обладнають системою автопілоту, GPS-системою, встановлять потужну і компактную силову установку, розроблять потужну систему орієнтації робота і він зможе самостійно, повністю автономно виконувати доставки у будь-які частини міста без попереднього ознайомлення з маршрутом та пересуватися по автомобільних дорогах, що збільшить швидкість доставки.

1.3 Прототип Lotte

Мною був обраний, як прототип для проекту, робот кур'єр від фірми Cleveron. Зовнішній вигляд робота зображений на рисунку 1.



Рисунок 1.11 - Зовнішній вигляд робота кур'єра

Такі роботи призначені для пересування по місту, по дорогам загального використання. Виробник декларує, що дана модель спроможна пересуватися по місту разом із автомобілями.

Даний робот використовується до доставок великої кількості товарів, документів та інших продуктів у комерційному напрямку. Цей робот обладнаний маніпулятором, за допомогою якого видається посилка. Для видачі цієї посилки цим роботом, клієнт повинен мати спеціальний бокс у який робот маніпулятором віддає товар, що є недоліком цієї системи, через те що вона стає дорожчою [2].

Процес доставки цього робота-кур'єра такий, що у поштовій точці розподілу його загрузають посилками і відправляють на маршрут. Коли робот приїжджає до необхідної точки, він віддає посилку за допомогою маніпулятора у спеціальний бокс та продовжує маршрут далі. У цей час клієнту приходить повідомлення, що посилку доставлено і вона може її забрати [2].

Така система може зменшити час, який необхідний для доставки за допомогою людини-кур'єра, а у сфері, де він планується застосовуватися час є дуже важливим параметром [2].

Швидкість робота регламентується правилами дорожнього руху у країні використання. Максимальна вага, яку може перевозити робот, складає 500 кілограмів.

У роботі доцільно використовувати асинхронний двигун потужністю 15 кВт, тому що через свою простоту в експлуатації, легкість у керуванні та низьку ціну, цей двигун повинен мати невеликі габарити та вагу. Двигун повинен бути вибухобезпечного виконання, через те, що робот весь час знаходиться на вулиці.

Також через постійні пуски двигуна, у системі будуть постійно присутні пускові струми, оскільки двигун починає нагріватися. Виходячи з цього, обраний двигун повинен проходити перевірку нагріву та бути вибраним із запасом. Ізоляція повинна мати відповідний клас.

У такій системі буде доцільно використовувати примусове охолодження, яке буде працювати з датчиками температури на двигуні та по всій системі.

1.4 Формування технічних вимог до тягового асинхронного електроприводу робота-кур'єра

Основні вимоги до тягових електроприводів наступні [3]:

- Простота виготовлення;
- Надійність;
- Зручність обслуговування;
- Легкість регулювання показників роботи та систем параметрів;
- Простота системи керування;
- Високий обертовий момент у всьому діапазоні частот обертання;
- Можливість здійснення рекуперативного гальмування;
- Високий коефіцієнт корисної дії [3].

Одним із перших питань вибору та проєктування силових електроприводів – це вибір двигуна та інших комплектуючих, які будуть енергоефективні та надійні [3].

Якщо порівнювати різні варіанти тягових електроприводів їх ККД поряд із власною масою, то це один із вирішальних факторів, через те, що при застосовуванні, первинні джерела енергії, тягові акумуляторні батареї, мають обмежений запас енергії й велику масу [3].

При всіх перевагах тягових електроприводів з електродвигунами постійного струму їхній основний недолік — це наявність механічного контакту в щітково-колекторному вузлі. Тому, незважаючи на складну й дорожу систему, регулювання тягового електропривода з електродвигуном змінного струму (асинхронними й синхронними) тягові електроприводи постійного струму виявляються більш надійними, легкими й довговічними [3].

При порівнянні робочих характеристик досліджуваних двигунів, ми дійшли висновку, що двигун постійного струму показує більш вигідні для рухомих електротехнічних комплексів характеристики, ніж асинхронний лише при тривалій роботі на низьких швидкостях і для широкого діапазону швидкостей при постійній потужності, що є більш характерним для вантажоперевезення [3].

Перевантажувальна здатність у короткочасному режимі залежить не тільки від параметрів двигуна, але й, у значній мірі, від характеристик перетворювача частоти. Чим ширшим є діапазон швидкостей, у якому двигун може видати максимальну потужність, тим оптимальніше такий двигун може бути адаптований до процесів, що вимагають постійний момент у всьому діапазоні швидкостей. Двигуни постійного струму мають значно меншу висоту осі обертання і масу ротора, через це мають менший момент інерції ротора, що є перевагою, адже це впливає на час розгону і динамічний відгук двигуна у всіх чотирьох квадрантах роботи під час розгінних та гальмівних процесів. Менша маса й габарити двигунів постійного струму (стандартний ступінь захисту IP 23) у порівнянні з асинхронними двигунами (стандартний ступінь захисту IP 54) особливо важливі для електротехнічних комплексів у яких двигун повинен переміщатися разом з вантажем в системах, де важливим є компактне розміщення [3].

Основним недоліком аналогових електроприводів постійного струму є низька заводостійкість, складність у налаштуванні й нестабільність параметрів. У якості датчика зворотного зв'язку по швидкості застосовується тахогенератор, що має ті ж недоліки, що і звичайний колекторний двигун. Для реверсивних тягового електроприводу, після тахогенератора, доводиться встановлювати спеціальну діодну систему на основі містка, що обмежує діапазон регулювання на малих швидкостях через особливості сигналу зворотного зв'язку. Сучасні мікроконтролери, що управляють частотним перетворювачем та тяговим електродвигуном, дозволяють обробляти дані за період у кілька десятків мікросекунд, це дозволило розширити діапазон регулювання зі зворотнім зв'язком до 1:1000 з точністю підтримки швидкості 0,2 оберту у всьому діапазоні. Це наближає частотні приводи за якістю характеристик до сервоприводів. Основу інформаційних підсистем сучасних тягового електроприводу, як правило, складають мікроконтролерні пристрої, що мають ряд істотних переваг в порівнянні з аналоговими пристроями керування, які реалізують типові арифметичні і логічні функції, обробку масивів,

регулювання електромагнітних і механічних змінних, стабілізацію, корекцію і компенсацію нелінійностей, спостереження, імітацію об'єкта керування і обробку законів роботи. Сучасні мікроконтролери є однокристальними електронно-обчислювальними машинами, цифровими сигнальними процесорами, які адаптовані до завдань керування в реальному часі з цілим рядом інтегрованих пристроїв [3]:

- аналого-цифрові перетворювачі для введення сигналів аналогових давачів;
- формувачі вихідних широтно-імпульсних сигналів для прямого цифрового керування силовими перетворювачами;
- порти для сполучення з системами керування більш високого рівня [3].

Серед переваг мікроконтролерів слід назвати [3]:

- гнучкість (можливість оперативної зміни структури, законів і параметрів системи керування);
- можливість реалізації разом з традиційними законами керування, прийнятими в аналогових системах, складніших методів для використання в адаптивних, самоналагоджувальних, взаємозв'язаних і багатоконтурних системах керування;
- оперативне тестування і діагностика поточного стану системи автоматичного керування та її елементів, що сприяє ранньому виявленню несправностей та попередженню аварій;
- висока точність обробки інформації (в цифрових системах похибки, характерні для аналогових керуючих пристроїв, відсутні);
- можливість фіксації, зберігання і візуалізації масивів параметрів процесів керування, оперативної взаємодії з обслуговуючим персоналом;
- висока надійність, зменшена маса та габарити мікроконтролерних і комп'ютерних систем керування в порівнянні з аналоговими системами [3].

Наявність в складі мікроконтролерів великого об'єму пам'яті дозволяє реалізувати складні послідовності обробки даних і робити енергетичні об'єкти доступними за широким комплексом інформації з мікроконтролерів, що може

характеризувати дані об'єкти. При цьому, навіть за використання відомих методів прямого вимірювання необхідних для керування величин, стає можливим, маючи невелике число давачів (переважно електричних величин) і, відповідно, каналів збору первинної інформації, визначати необхідну додаткову інформацію за допомогою обчислень в реальному часі. Така тенденція підкріплюється наявністю недоліків підходу прямого використання значної кількості давачів для вирішення завдань регулювання в системах змінного струму [3]:

- високі вимоги до роздільної здатності первинних вимірювачів;
- необхідність побудови додаткових гальванічних розв'язок для підключення давачів;
- складність сполучення різних систем давачів в одному контурі регулювання [3].

Перехід до цифрового керування відкриває можливості реалізації складних законів керування, які раніше було практично неможливо застосовувати. Інші типи електродвигунів змінного струму (синхронні, індукторні), у багатьох аспектах поступаються асинхронному двигуну за якістю характеристик, проте продовжують вивчатися стосовно до використання в тягових системах. Виконаємо порівняльний аналіз різних типів двигунів однієї потужності (табл. 1.1) [3].

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики тягових електродвигунів

Тип двигуна	Маса, кг	Середній ККД	Відносна вартість
Колекторний, постійного струму	99	0,84	1,0
Асинхронний з короткозамкнений ротором	45	0,935	0,26
Синхронний з електромагнітним порушенням	55	0,93	0,32
Синхронний з постійними магнітами	45	0,935	0,26
Синхронний дисковий з постійними магнітами	34	0,96	0,20

З наведеної табл. 1 видно, що за однієї встановленої потужності тягового двигуна двигуни змінного струму мають значно меншу масу та вартість при більш високому ККД, ніж двигун постійного струму [3].

Згідно з існуючими рекомендаціями щодо проектування тягових систем, потужність тягового привода визначають виходячи з умови забезпечення заданого середнього прискорення до певної швидкості. Далі на підставі розрахунків середньоквадратичного струму на еквівалентній ділянці шляху визначають потужність тривалого режиму роботи тягових електроприводів. Слід звернути увагу на наступне, основний режим роботи рухомого електротехнічного комплексу — це рух з експлуатаційною або близькою до неї швидкостями. Тому на такому електротехнічному комплексі слід застосовувати привод, який забезпечує оптимальні енергетичні показники в зазначеному режимі роботи. При виборі потужності тягового привода також слід приділяти увагу конфігурації електротехнічного комплексу. Закордонний досвід показує, що техніко-економічні й споживчі властивості рухомих електротехнічних комплексів визначаються умовами їх експлуатації. Як правило, компанії купують невеликі по чисельності серії певних електротехнічних комплексів. Однак ці системи сконструйовані й обладнані з врахуванням всіх специфічних вимог замовника. В таких умовах для істотного зменшення капітальних витрат була запропонована й одержала широкий розвиток концепція модульних платформ, коли рухомий електротехнічний комплекс фактично комбінується зі стандартного ряду уніфікованих модулів різного призначення. Сьогодні це типовий розв'язок, пропонований практично всіма провідними світовими виробниками електротехнічних комплексів для перевезення пасажирів, вантажу, виконання сільськогосподарських робіт, тощо [3].

В результаті проведеного аналізу, отримала подальший розвиток методика визначення типу та параметрів тягових двигунів рухомого електротехнічного комплексу шляхом врахування заданих вимог з боку виконавчого механізму. Зокрема, проведено аналіз практичного досвіду вибору тягових двигунів та узагальнення методики визначення виду та параметрів тягових двигунів при

заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу, що дозволяє проводити точний вибір типу та параметрів двигуна в залежності від умов експлуатації електротехнічного комплексу [3].

Аналізуючи наведений вище матеріал, можна написати вимоги до електроприводу робота:

- висока миттєва та питома потужність електропривода;
- момент на малих швидкостях для старту і для підйому вгору робота;
- великий діапазон швидкостей, який включає першу та другу керувальні зони;
- відповідне швидкості відпрацювання моменту;
- при широкому діапазоні швидкості та моменту високий ККД;
- при рекуперативному гальмуванні високий ККД;
- гарна надійність і міцність для різних умов експлуатації робота;
- невелика вартість.

Висновки до розділу 1

1. Огляд сучасного ринку роботів-кур'єрів показав, що вони мають великий шанс повністю замінити людей-кур'єрів. Вони мають значну кількість переваг у порівнянні з людьми, які виконують таку ж роботу.

2. Об'єктом дослідження обрано робот малої потужності **Lotte**, який призначений для подолання невеликої відстані. Робот призначений для використання у кур'єрській роботі переважно для роботи по місту.

3. Наведені вимоги до тягового електроприводу електротранспорту. В якості двигунів в роботах широко використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Через невелику ціну, велику надійність, та невеликими масо-габаритними показниками. Та через досягнення у силовій електроніці є можливість робити перетворювачі та алгоритм керування як складні так і прості.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження нашої роботи обраний робот-кур'єр Lotte від фірми Cleveron. Технічні характеристики даного робота записані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Технічні характеристики робота Lotte

Масо – габаритні показники	
Маса пустого робота, кг	500
Маса при макс. навантаженні m_{max} , кг	1000
Довжина, мм	2500
Ширина, мм	1400
Висота, мм	1300
Двигун і трансмісія	
Тип двигуна	3-фазний, асинхронний
Номінальна напруга, В	380
Передатне число редуктора	2,5
Передатне число диференціала	2
Максимальна швидкість	60 км/год
Передатне число зниженої передачі	2,15
Радіус колеса, м	0,27

2.2 Складання моделі динаміки робота-кур'єра.

Сила для опору кочення.

Сила для опору кочення – це процес тертя коліс об дорогу, що включає тертя в підшипниках та передачі і т.п. Дана сила є приблизно постійною і залежить від ваги робота і покриття поверхні. Сила для початку руху:

$$F_{rr} = K_{ок} mg,$$

де $K_{ок}$ коефіцієнт для опору кочення, m – маса, g -прискорення вільного падіння.

Сила аеродинамічного опору.

Аеродинамічний опір називають так звану силу, яка перешкоджає безпосередньо руху тіла в рідинах або газах. Вона залежить від швидкості тіла. Для визначення її використовують формулу:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$$

де $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^2$ - середня щільність повітря, S – площа лобової частини робота, а C_x - коефіцієнт аеродинамічного опору, який залежить від форми кузова, V - лінійна швидкість

Гравітаційна складова для опору руху.

Це компонента загальної сили опору яка у цілому обумовлена тим, що робот має рухатися вгору. Ця сила залежить від маси робота та кута нахилу поверхні. Рівняння для знаходження цієї сили буде мати вигляд:

$$F_{gp} = mg \sin(\alpha)$$

де, α – кут нахилу.

Динамічне зусилля.

Це сила, яка забезпечує лінійне прискорення робота. Якщо змінюється миттєва швидкість ($v \neq const$), розуміємо, що на робот діє сила інерції. Вона має математичний опис за законом Ньютона:

$$F_{ta} = ma.$$

де, a - прискорення

Сила інерції внаслідок кутового прискорення: ця сила охоплює інерцію, яка виникає під час прискоренні обертових частин і приблизно дорівнює 5% від лінійної.

Через складність отримання цих значень, наближення до реальності, задається так, що сила складає 5% від прискорення робота, внаслідок чого загальна сила інерції становить:

$$F_{інерції} = 1.05ma$$

З усіма описаними компонентами перепишемо заново баланс сил, внаслідок чого:

$$F_{av} = fmg\cos\alpha + \frac{1}{2}\rho SC_x v^2 + mgsin\alpha + 1.05 ma$$

де, f - коефіцієнт тертя кочення.

Для проведення моделювання динамічних процесів руху робота, ми визначаємо сумарний момент інерції, який буде зведений до ротора двигуна і згідно з формулою визначається:

$$J_{av} = m \frac{r^2}{i_p^2} + J_p + 4m_k \frac{r^2}{i_p^2}$$

де, r - радіус колеса, i_p - передатне число редуктора, m_k - маса колеса, J_p - момент інерції редуктора

Формулою введено припущення - момент інерції редуктора буде відповідати моменту інерції ротора, також буде враховано інерцію усіх чотирьох коліс робота.

Для повністю завантаженого робота сумарний момент інерції асинхронного двигуна буде:

$$J_{max} = J_p + J_{av,max} = 0.1 + 1000 \frac{0.27^2}{2.5^2} + 0.1 + 4 \cdot 17 \frac{0.27^2}{2.5^2} = 8.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для пустого робота сумарний момент інерції асинхронного двигуна буде мати вигляд:

$$J_{min} = J_p + J_{av,min} = 0.1 + 500 \frac{0.27^2}{2.5^2} + 0.1 + 4 \cdot 17 \frac{0.27^2}{2.5^2} = 4.2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Під час налаштування регулятора швидкості в системі автоматичного керування асинхронним двигуном буде використовувється середнє значення моменту інерції, яке вимірюється таким чином:

$$J_{\text{серед}} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{8.3 + 4.2}{2} = 6.69 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

2.3 Розрахунок потужності двигуна

Для розрахунку та визначення потужності двигуна нами обрана траєкторія швидкості NEDC-15, що відповідає міському циклу руху транспортного засобу

[4]. Траєкторія зміни швидкості (рисунок 2.2) та тахограма, яка передбачена для руху на першій (тяговій) передачі (рисунок 2.3) наведені нижче.

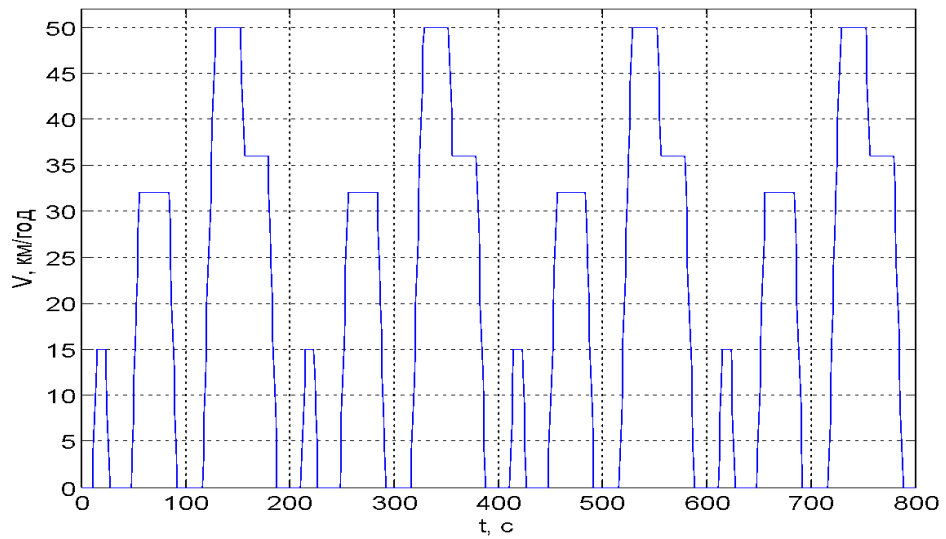


Рисунок 2.1 – Траєкторія зміни швидкості робота NEDC-15

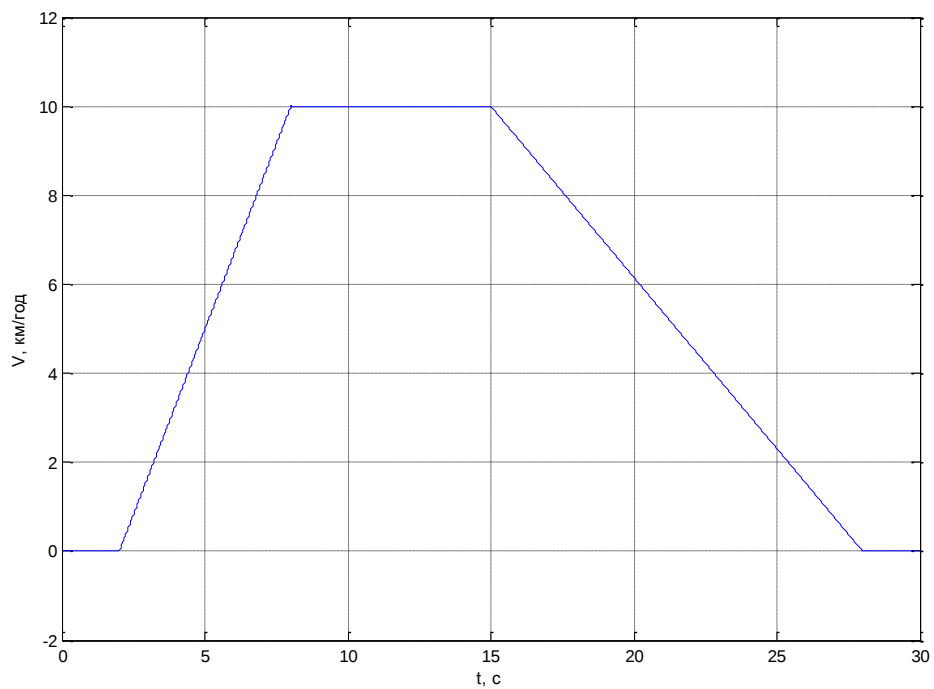


Рисунок 2.2 – Траєкторія зміни швидкості робота на першій передачі

Основні кінематичні параметри траєкторії, наведеної на рисунку 2.2 записані в таблиці 2.2 [4].

Таблиця 2.2 – Кінематичні параметри траєкторії руху NEDC-15

Тривалість руху, с	800
Час руху автомобіля, с	516
Максимальна швидкість V_{max} , м/с	16.6

Ми можемо отримати траєкторію зміни прискорення транспортного засобу за допомогою диференціювання траєкторії зміни швидкості (рисунок 2.4-2.5).

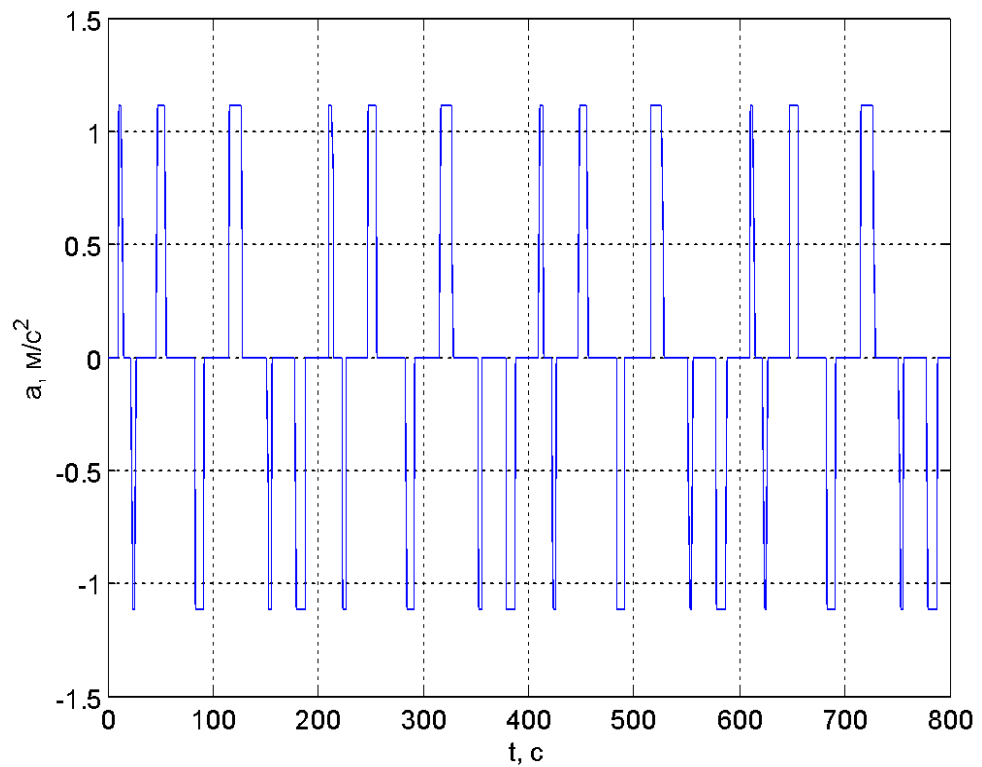


Рисунок 2.3 – Траєкторія зміни прискорення робота NEDC-15

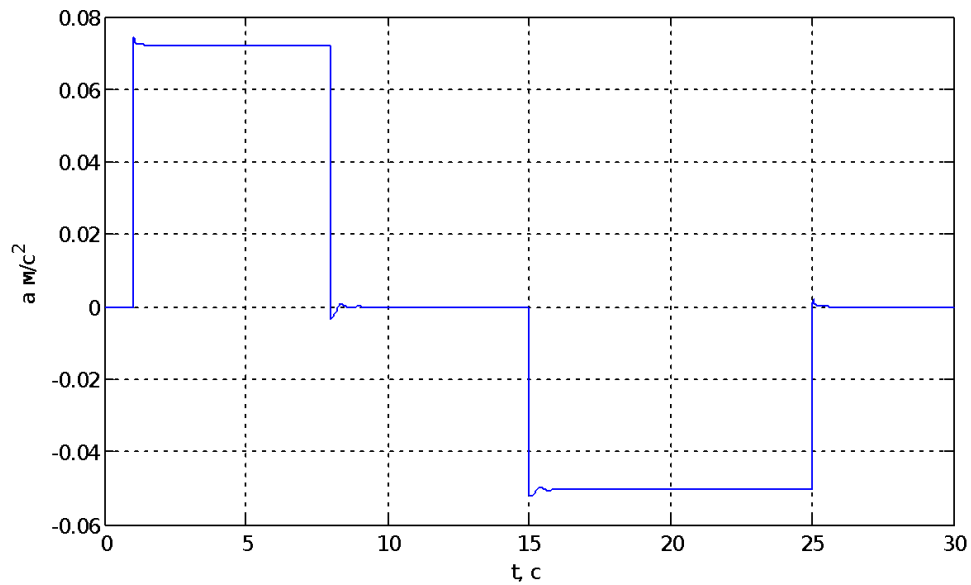


Рисунок 2.4 – Траєкторія зміни прискорення робота при руху під гору

Щоб визначити статичну складову тягового моменту M_T , яке має розвивати двигун, використовується методика наведена в [5]. При цьому прийнято, що робот може здійснює рух під кутом рівним 25° при швидкості $V=10$ км/год. Отже, що визначити статичний тяговий момент ми використовуємо формулу (2.1):

$$M_{ст} = \frac{(f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + C_x \cdot \frac{V^2}{2} \cdot S \cdot \rho) \cdot r}{i} \quad 2.1$$

де, $i = i_p \cdot i_d \cdot i_r$ - повне передатне число (де i_p - передатне число редуктора, i_d - передатне число диференціала, i_r - передатне число першої або другої передачі).

Ми підставили всі значення та отримали наступну формулу:

$$M_{ст} = \frac{(0.0135 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot \cos(\alpha) + 1000 \cdot 9.81 \cdot \sin(\alpha) + 0.7 \cdot \frac{V^2}{2} \cdot 2.87 \cdot 1.29) \cdot 0.27}{i}$$

Динамічний момент можна розрахувати за формулою (2.2):

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \varphi \quad (2.2)$$

де J сумарний момент інерції, φ – кутове прискорення

Сумарний момент, який необхідний для руху ми розраховували за формулою(2.3):

$$M = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} \quad (2.3)$$

Навантажувальні діаграми двигуна, які отримані відповідно до сформованого моменту (рисунки 2.5-2.6).

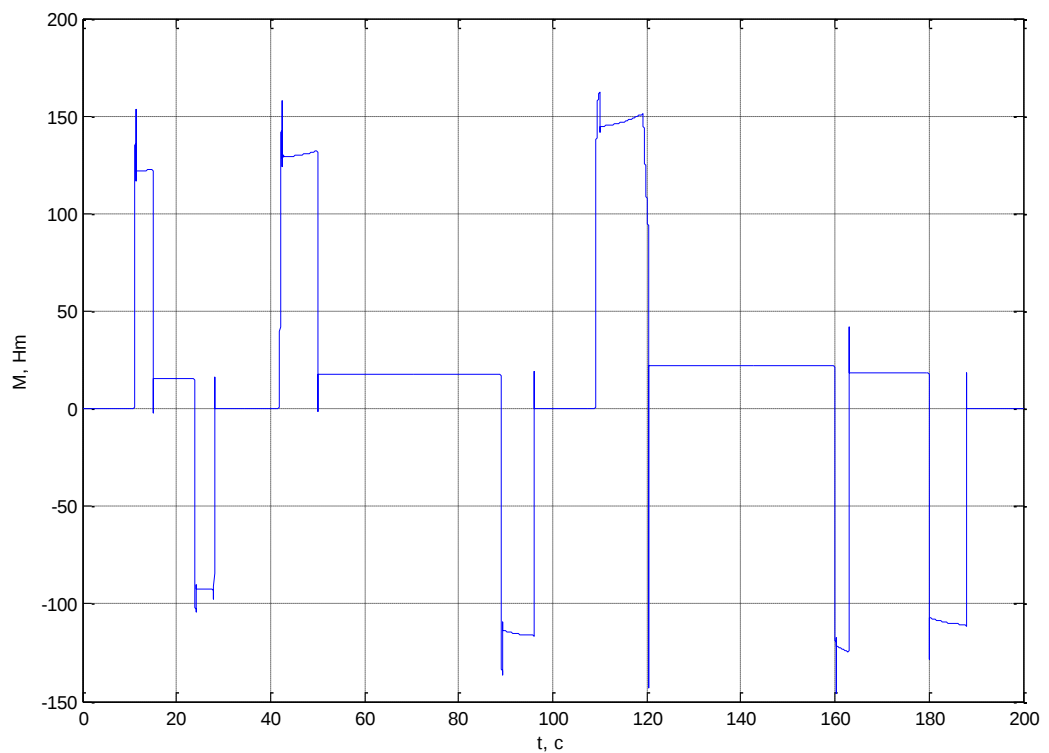


Рисунок 2.5 – Навантажувальна діаграма двигуна NEDC-15

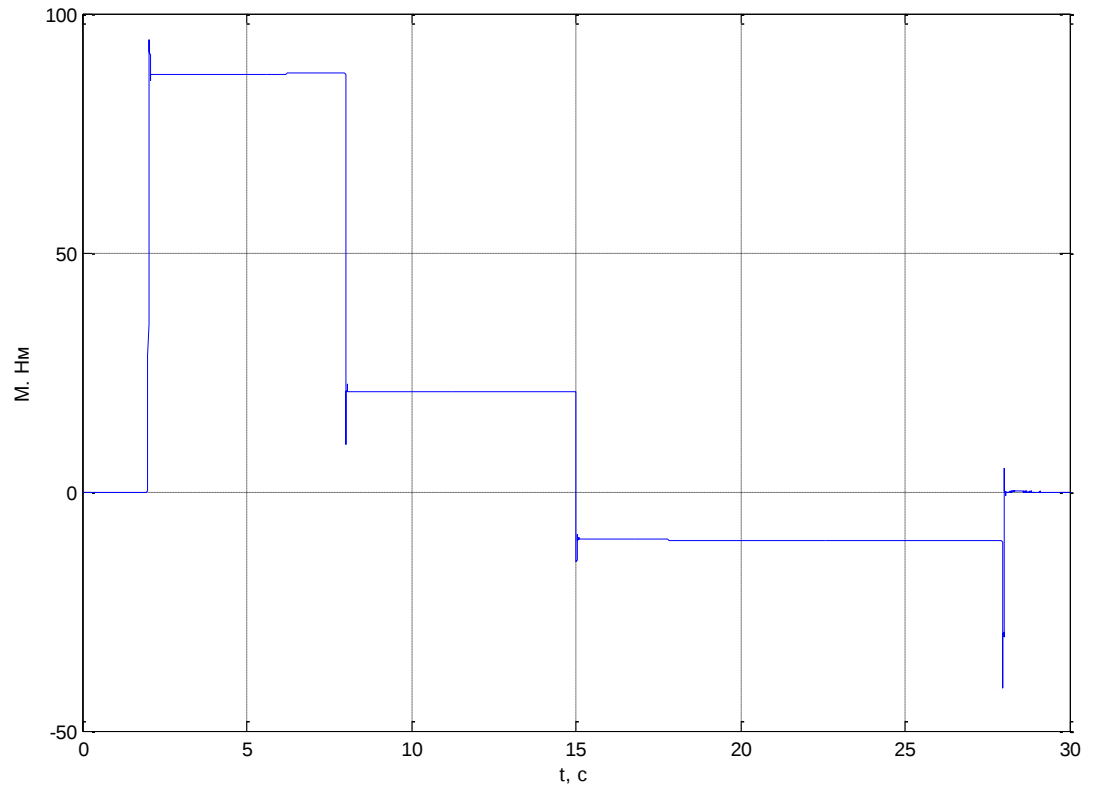


Рисунок 2.6 – Навантажувальна діаграма двигуна при русі на першій передачі

Еквівалентний момент двигуна, який визначається згідно з навантажувальної діаграми, що розраховується за формулою (2.4) [6]:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} M^2(t) dt}, \quad (2.4)$$

де M - момент двигуна на ділянці навантажувальної діаграми, t_u - час дії моменту двигуна.

Еквівалентний момент двигуна, який визначено в MATLAB за допомогою функції «trapz». Значення еквівалентного моменту двигуна, приведені нижче, розраховані для NEDC-15 ($M_{екв1}$) та руху на першій передачі ($M_{екв2}$):

$$M_{екв1} = 80,73 \text{ Нм}$$

$$M_{екв2} = 83,2 \text{ Нм}$$

Максимальна швидкість обертання двигуна визначається таким співвідношенням (2.5):

$$\omega_{max} = \frac{V_{max} \cdot i}{r} \quad (2.5)$$

де V_{max} - максимальна лінійна швидкість транспортного засобу.

$$\omega_{max1} = \frac{16.6 \cdot 2.5}{0.27} = 153.7 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{max2} = \frac{2.7 \cdot 2.5}{0.27} = 25 \text{ рад/с}$$

Визначається потужність двигуна, яка необхідна для здійснення даного циклу руху за цією формулою (2.6) [6]:

$$P_{\partial в} = K_з \cdot M_{екв} \cdot \omega_p, \quad (2.6)$$

де $K_з = 1,1 - 1,3$ - коефіцієнт запасу, $M_{екв}$ - розрахований еквівалентний момент двигуна, ω_p - номінальна робоча швидкість двигуна.

$$P_{дв1} = 1,1 \cdot 80.73 \cdot 153.7 = 13649 \text{ Вт}$$

$$P_{дв2} = 1,1 \cdot 83.2 \cdot 25 = 22260.5 \text{ Вт}$$

Як видно з розрахунків, найважчий режим – є перший режим, тому двигун обирається відповідно до розрахунків для цього режиму руху.

Вищенаведені розрахунки є основою для обрання загальнопромислового призначення 4A160S4Y3. Параметри цього двигуна, наведені у таблиці 2.3 [7].

Таблиця 2.3 - Паспортні дані двигуна 4A160S4Y3

Номінальна потужність	$P_{2n}=15000 \text{ Вт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n}=380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$P_n=2$
Момент інерції	$J_r=0,1 \text{ кг/м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta=0,885$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi=0,88$
Перевантажувальна здатність	$\lambda=2,3$
Номінальне ковзання	$s_n=2,3\%$
Критичне ковзання	$s_k=33\%$
Номінальна частота напруги статора	$f=50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$X'_1=0,081$
Активний опір статора	$R'_1=0,047$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$X''_2=0,13$
Приведений активний опір ротора	$R''_2=0,025$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$X_\mu=4$

2.4 Перевірка правильності вибору двигуна

Перевірка двигуна виконується згідно методики. Для цієї перевірки двигуна за навантажувальною здатністю, із навантажувальної діаграми обирається момент M_1 , який має максимальну величину і порівнюється з максимальним моментом вибраного двигуна. При цьому повинна виконуватись умова (2.7) [8]:

$$M_H > M_{\text{екв}} \quad (2.7)$$

де $M_{\text{max}} = \lambda M_H$ – максимальний момент двигуна, M_1 – максимальний момент з навантажувальної діаграми.

Умова перевантажувальної здатності виконується:

$$M_{max} > M_1 = 225 \text{ Нм} > 155 \text{ Нм}$$

Повинна виконуватися умова, коли відбувається перевірка двигуна за нагрівом (2.8):

$$M_H > M_{екв} \quad (2.8)$$

Дана умова виконується:

$$M_H > M_{екв} = 97.7 \text{ Нм} > 83 \text{ Нм}$$

Ці дві перевірки виконуються. Ми можемо стверджувати, що двигун обрано вірно.

2.5 Розрахунок номінальних даних двигуна

Розрахунок параметрів вибраного двигуна проводився за методикою, яка наведена в [9]. Початкові дані взяті з таблиці 2.2.

Описана кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159 \text{ рад/с}$$

Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ рад/с}$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - s_n) = 157(1 - 0.023) = 153,46 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{15000}{153,46} = 97.7 \text{ Нм}$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda M_n = 2.3 \cdot 97.7 = 224 \text{ Нм}$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

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

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos \varphi} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0.885 \cdot 0.88} = 29.1 \text{ А}$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 29.1 = 41.15 \text{ А}$$

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

$$\psi_{xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310,269}{314,159} = 0,99(\text{Вб}).$$

2.6 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми

Ми приведемо параметри Г-подібної схеми заміщення та параметри якої вказані в таблиці 2.3 до параметрів Т-подібної схеми.

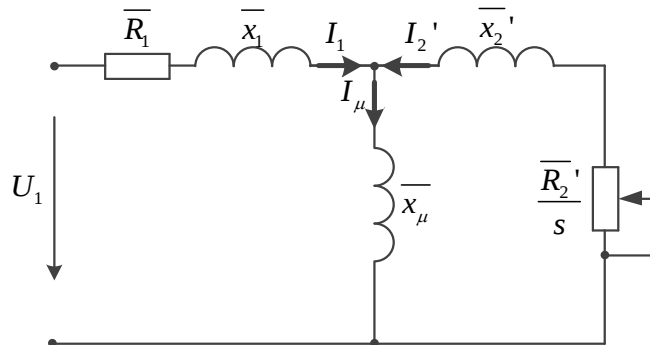


Рисунок 2.7 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

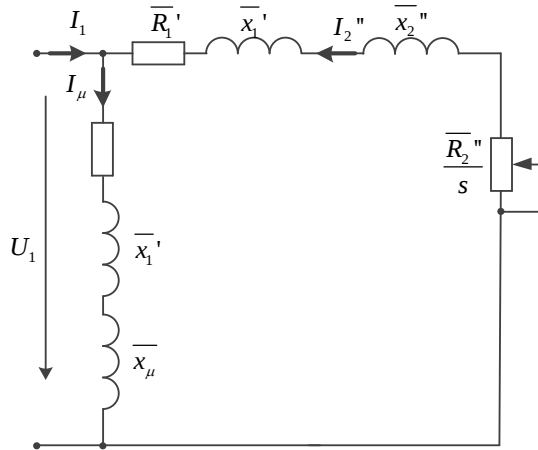


Рисунок 2.8 - Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

$$c_1 = \frac{\bar{X}_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X_1'\bar{X}_\mu}}{2\bar{X}_\mu} = \frac{4 + \sqrt{4^2 + 4 \cdot 0.081 \cdot 4}}{2 \cdot 4} = 1,01$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{X_1} = \frac{X'_1}{c_1} = \frac{0,081}{1,01} = 0,598 \text{ Ом}$$

$$\overline{R_1} = \frac{R'_1}{c_1} = \frac{0,047}{1,01} = 0,046 \text{ Ом}$$

$$\overline{X_2}' = \frac{X_2''}{c_1^2} = \frac{0,13}{1,01^2} = 0,012 \text{ Ом}$$

$$\overline{R_2}' = \frac{R_2''}{c_1^2} = \frac{0,025}{1,01^2} = 0,025 \text{ Ом}$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$X_1 = \overline{X_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,598 \cdot \frac{219}{29,1} = 0,59 \text{ Ом}$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,046 \cdot \frac{219}{29,1} = 0,347 \text{ Ом}$$

$$X_2' = \overline{X_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,12 \cdot \frac{219}{29,1} = 0,946 \text{ Ом}$$

$$R_2' = \overline{R_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,025 \cdot \frac{219}{29,1} = 0,181 \text{ Ом}$$

$$X_\mu = \overline{X_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 4 \cdot \frac{219}{29,1} = 29,98 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{0n}} = \frac{0,59}{314,15} = 0,0019 \text{ Гн}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2'}{\omega_{0n}} = \frac{0,946}{314,15} = 0,003 \text{ Гн}$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{29.98}{314,15} = 0,095 \text{ Гн}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,0019 + 0,095 = 0,097 \text{ Гн}$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0,003 + 0,095 = 0,098 \text{ Гн}$$

2.7 Розрахунок параметрів статора і ротора

Значення параметрів ротора:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,3477}{0,097} = 3.56 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right)$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0,098 \left(1 - \frac{0,095^2}{0,097 \cdot 0,098} \right) = 0,0049 \text{ Гн}$$

$$\beta_1 = \frac{L_m}{L_2 \sigma_1} = \frac{0,095}{0,098 \cdot 0,0049} = 198.7 \text{ Гн}^{-1}$$

$$\gamma_1 = \frac{R'_2}{\sigma_1} + \alpha_1 \cdot L_m \cdot \beta_1 = \frac{0,181}{0,0049} + 3.56 \cdot 0,095 \cdot 198.7 = 104.93 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}$$

Значення параметрів статора:

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0,181}{0,098} = 1,8 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0,097 \left(1 - \frac{0,095^2}{0,097 \cdot 0,098} \right) = 0,0048 \text{ Гн}$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0,095}{0,098 \cdot 0,0048} = 200,95 \text{ Гн}^{-1}$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0,3477}{0,0048} + 1,8 \cdot 0,095 \cdot 200.96 = 107.82$$

Результати розрахунків зведені до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Параметри двигуна 4A160S4Y3

P_{2n} , кВт	15	$R_{1,}$ Ом	0,347
ω_{xx} , рад/с	157,07	$R_{2,}$ Ом	0,18
ω_n , рад/с	153,46	$L_{1,}$ Гн	0,097
M_n , Нм	97,7	$L_{2,}$ Гн	0,098
M_k , Нм	224,48	L_m , Гн	0,095
I_{na} , А	41,15	α_1 , Ом/Гн	3.5
ψ_{1xx} , Вб	0,988	α , Ом/Гн	1.8
η , %	0,885	β , 1/Гн	200.96
$\cos\phi$	0,88	γ , Ом/Гн	107,82
J_r , кг·м ²	0,1	σ , Гн	0,0048
λ	2.3		

2.8 Розрахунок потужності акумуляторної батареї

Наш розрахунок ми проводимо на основі експериментального графіку швидкості робота по циклу NEDC-15 (рис. 2.1). Графік пройденого шляху за цикл зображений на рисунку 2.9.

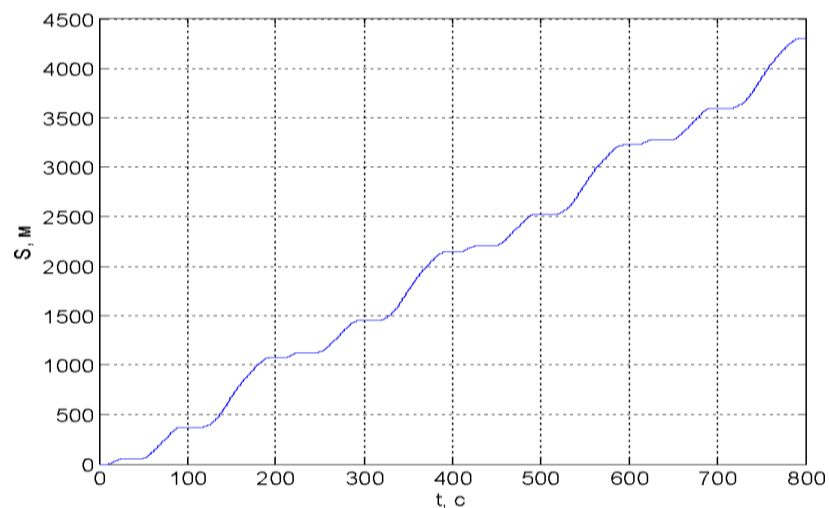


Рисунок 2.9 – Шлях пройдений за один цикл

Енергія, яка витрачається при русі робота, буде складатися з витрат під час перетворення електричної енергії в кінетичну і навпаки. І витрат енергії на

тертя та аеродинамічний опір. Отже, необхідна енергія акумуляторної батареї буде розраховується за формулою :

$$W_{\text{аккумулятор}} = W_{\text{тертя}} + W_{\text{ел}}$$

де $W_{\text{тертя}}$ – енергія втрат, за рахунок сил тертя та аеродинамічним опором; $W_{\text{вл}}$ – втрати в електричному обладнанні та трансмісії. Використавши формулу для розрахунку потужності [9], складемо вираз :

$$W_{\text{тертя}} = \frac{1}{T} \int_0^T (mgf + \frac{1}{2} \xi C_W A_f V^2) \cdot V dt$$

де $T = 800$ с — кінцевий час циклу; $g = 9.81$ — прискорення вільного падіння.

Під час перетворення електричної енергії батареї в кінетичну енергію потрібно враховувати ККД перетворювача, електричного двигуна та редуктора. Прийmemo, що ККД інвертора $\eta_{\text{інв}} = 0,97$, ККД двигуна $\eta_{\text{дв}} = 0,93$, ККД редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0,98$

Сумарний ККД становить:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}} = 0,97 \cdot 0,93 \cdot 0,98 = 0,88$$

Виходячи з вищезазначеного, енергія, що витрачається під час перетворення з електричної в кінетичну розраховується за цією формулою:

$$W_{\text{ел}} = (1 - \eta_{\Sigma}) \frac{1}{T} \int_0^T m \frac{dV}{dt} \cdot V dt$$

Підставивши відомі нам коефіцієнти та розрахувавши інтеграли, ми можна знайти потрібний нам запас енергії акумуляторної батареї для подолання 50 км шляху:

$$W_{50} = \frac{W_{\text{аккумулятор}} \cdot 50}{S} = 154.44 \text{ МДж}$$

де $W_{\text{аккумулятор}} = 13,28 \text{ МДж}$ — для маршрутного циклу, $S=4.3 \text{ км}$ — пройдена відстань за повний цикл.

Виходить заряд, який необхідний, щоб подолати маршрут у 50 км для робота, при умові, що постійна напруга акумуляторної батареї $U_{dc} = 540 \text{ В}$, становить:

$$Ih = \frac{W_{50}}{3600 \cdot U_{dc}} = \frac{154.4 \cdot 10^6}{3600 \cdot 550} = 77.08 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Виберемо елемент типу SSK 80/C–Ah-550 V з каталогу [10], параметри якого наведені в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 Параметри акумулятора SSK 80/C–Ah-550 V

Найменування	Номинальна ємність, C_3 , Ач	Масогабарит на ширина W, мм	Масогабарит на довжина L, мм	Масогабаритна висота H, мм	маса m, кг
SSK 80/C–Ah-550 V	80	1240	230	1000	242

Висновки до розділу 2

1. Для нашого дослідження системи ми обрали траєкторію руху NEDC – 15, яка відповідає міському циклу руху робота та режим руху під гору. Нами

було побудовано графіки траєкторії руху, прискорення, моменту для NEDC – 15, а також руху на пониженій передачі.

2. На цій основі траєкторії руху, яка відбувається на пониженій передачі, нами проведено розрахунок потужності електродвигуна, завдяки методу еквівалентного моменту, а також обрано двигун 4A160S4Y3. Було розраховано сумарний момент інерції даного механізму.

3. Виходячи з отриманої потужності обрано АД 4A160S4Y3 загальнопромислового призначення. Нами були виконані розрахунки параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна і перевірка правильності вибору двигуна.

4. Обрано батарею для робота на якій він зможе проїхати 50 км на одному заряді.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ

Розрахунок основних елементів перетворювача здійснюється за допомогою наступних параметрів: напруга та кількість фаз мережі живлення, потужність двигуна, ККД двигуна та номінальний струм двигуна[11].

Ми розглянемо розрахунок силової частини перетворювача для двигуна 4A160S4Y3 з параметрами, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 3.1. Паспортні дані двигуна 4A160S4Y3

Номінальна потужність	15 кВт
Номінальна лінійна напруга статора	380 В
Число пар полюсів	2
Момент інерції	0,1 кг м ²
Коефіцієнт корисної дії	0.885
Коефіцієнт потужності	0.88
Перевантажувальна здатність	2.3
Номінальне ковзання	0.023
Критичне ковзання	0.085
Номінальна частота напруги статора	50 Гц

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора[11]:

$$U_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.39 \text{ В}$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{15000}{3 \cdot 219 \cdot 0.885 \cdot 0.88} = 29.1 \text{ А}$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора[11]:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 219 = 309.7 \text{ В}$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 29 = 41 \text{ A}$$

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ovl} , яка, в нашому випадку складає $k_{ovl} = 1.4 - 2$ [11].

3.1 Розрахунок некерowanego випрямляча

Правильний вибір діодів для випрямляча постійного струму, залежить від розрахунку величини діючого струму, який протікає через діод, з урахуванням коефіцієнтів запасу. Для цього необхідно зробити наступне [11]:

Розрахунок номінального значення випрямленого струму [11].

$$U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} = \sqrt{2} \cdot 380 = 540 \text{ B}$$

$$I_{dcn} = \frac{k_{ovl} P_{2n}}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{2 \cdot 15000}{540 \cdot 0.885 \cdot 0.88} = 78.5 \text{ A}$$

При виборі силових діодів і IGBT транзисторів для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима зворотна напруга має бути мінімум у 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто $U_{ce} > 1.5 U_{dcmax}$ [11].

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів має приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням [11].

Таким чином,

$$U_{ce} = 1.5 \cdot U_{max} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ B}$$

Вибір силових діодів здійснюється за критерієм [11]

$$I_{VD} > I_{max}, U_{VDmax} > U_{ce},$$

де I_{VD} та U_{VDmax} – тривалий струм діода та зворотна напруга, які вказані в паспортних характеристиках діода. Вибираємо по каталогу діод від виробника BY880-1200-DIO і основними параметрами [11,12]: ,

$$I = 80 \text{ A}$$

$$U = 1200 \text{ (V)}$$

3.2 Розрахунок автономного інвертора напруги

Прийнявши перевантажувальну здатність $k_{ovl} = 2$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача[11]

$$I_{max} = k_{ovl} \cdot I_{na} = 2 \cdot 41 = 82 \text{ A}$$

Вибір IGBT здійснюється за таким критерієм[11]:

$$I_C > I_{max}, U_{ce max} > U_{ce},$$

де I_C та $U_{ce max}$ – це тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку[11].

Вибираємо IGBT модуль типу SKM100GAL12T4 [13] з параметрами $U_{ce} = 1200 \text{ (V)}$, $I_C = 100 \text{ (A)}$

3.3 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторного фільтра

При включенні перетворювача потрібно забезпечити заряд конденсаторів з обмеженим струмом. Для цього включається в ланку постійного струму резистор з шунтуючим контактом (рисунок 3.16) [11].

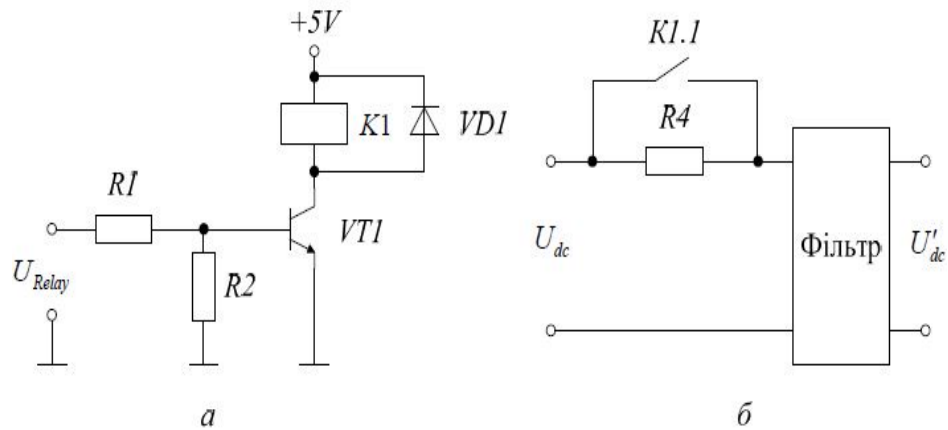


Рисунок 3.1 - Зарядне коло конденсаторів фільтра

По напрузі U_{KE} , та по максимальному струму колектора, що відповідає пусковому струму реле $I_{Kmax} = I_{\text{реле.пуск}}$ вибирається польовий транзистор VT1 IRF3717TRPBF-1 з наступними паспортними даними [11,14]:

$$U_{KE} = 20(B),$$

$$I_D = 16(A) \text{ при } T_A = 70(^{\circ}C).$$

3.4 Розрахунок ємнісного фільтра

Ємність випрямляча визначається за формулою[11]

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot k_p \cdot m \cdot f \cdot R_0},$$

де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який вибирають в діапазоні (0.02 - 0.05), m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі живлення, R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму[11].

Для визначення R_0 розраховується значення струму ланки постійного струму з урахуванням перевантаження[11].

$$I_{dcn} = \frac{k_{ovl} P_{2n}}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{2 \cdot 15000}{540 \cdot 0.885 \cdot 0.88} = 78.5 \text{ A}$$

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dcn}} = \frac{540}{78.5} = 6.8 \text{ Ом}$$

Тоді:

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 6.8} = 3300 \text{ мкФ}$$

3.5 Розрахунок варистора та вхідного фільтру радіочастот

Розрахунок робочого режиму варистора через його нелінійну характеристику є досить складно. Метою цього розрахунку є вибір оптимального значення класифікаційної напруги варистора. Робочий струм варистора це важливий параметр, який має бути мінімально можливим, з ціллю недопущення перегріву варистора. З іншої сторони при заниженому струмі через варистор рівень напруги збільшується, який він обмежує при виникненні імпульсу перенапруги, іншими словами захисні функції погіршуються[11].

Для орієнтовних розрахунків рекомендується, щоб постійна робоча напруга не перевищувала 0,85 Укл, а на змінному струмі діюче значення робочої напруги не перевищувало 0,6 Укл[11].

Процедура проектування фільтру електромагнітних перешкод передбачає[11]:

1. Вибір ємності Х-конденсаторів у діапазоні від 0.01. мкФ до 2.2 мкФ в залежності від потужності[11];
2. Вибір ємності Y-конденсаторів в залежності від допустимого витоку за формулою[11]:

$$C_Y = \frac{I_{доп}}{2\pi fU},$$

Де, $I_{доп}$ – допустимий струм витоку, U – діюче значення напруги відносно землі, f – частота напруги[11].

3. Вибір синфазного дроселя в залежності від величини струму; в перетворювачах частоти синфазний дросель має в кожній фазі по кілька витків,

виконаних дротом, діаметр якого розраховується у відповідності з номінальним вхідним струмом перетворювача[11].

Вибираємо по каталогу радіочастотний 3-фазний фільтр типу MIF3800 з номінальною робочою напругою 310/530 В[11].

3.6 Розрахунок датчиків струму та напруги

Вибір датчиків струму виконується за максимальним значенням струму, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим за максимально допустимий струму у мережі. Для вимірювання струму на виході перетворювача частоти, використовують значення максимального струму[11].

Якщо для керування координатами двигуна використовують методи, що не потребують зворотних зв'язків за струмом, а вимірювання струму здійснюється лише, щоб захистити системи, то для здешевлення перетворювача частоти датчики на виході інвертора можна не встановлювати і обмежитися лише датчиком струму в ланці постійного струму[11].

По розрахованому значенню $I_{dc} = 78,5 \text{ А}$ вибираємо датчик струму типу Т- 0,66-1 100/5 0.5S номінальний первинний струм якого складає 78,5 А, а вторинний дорівнює 5 А. Необхідно два датчика струму даного типу для організації зворотних зв'язків за струмом[11].

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV 25NP [15], схема підключення якого показана на рис. 3.2[11].

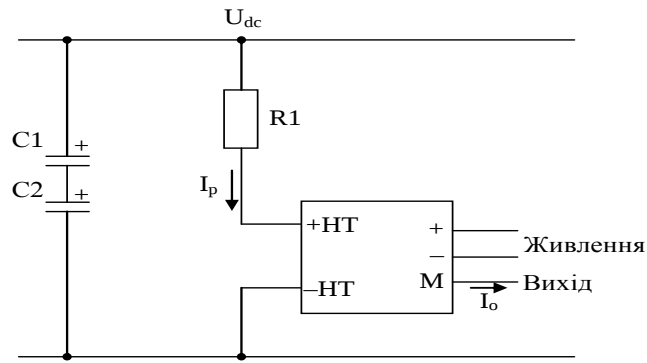


Рисунок 3.2 – Підключення датчика напруги

Максимальний струм первинного кола $I_{p.max} = 14(\text{мА})$. Тому значення опору резистора R_1 дорівнює[11]:

$$R_1 = \frac{U_{DCmax}}{I_{p.max}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом}$$

З-зі стандартного ряду резисторів вибираємо резистор серії 5W56KJ [16]:

$$R_1 = 56 \text{ кОм}$$

3.7 Математичне описання АД та інвертора напруги

При синтезі векторного керування АД базовим є математичний опис ідеалізованої асинхронної машини [17-19]. У системі рухомих координат (d, q) , що обертається зі швидкістю ω_0 , електромагнітні та електромеханічні процеси в АД з короткозамкненим ротором можна описати системою диференціальних рівнянь [17-19].:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + d\psi_{sd}/dt - \omega_0 \psi_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + d\psi_{sq}/dt + \omega_0 \psi_{sd}; \\ 0 &= R_r I_{rd} + d\psi_{rd}/dt - (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rq}; \\ 0 &= R_r I_{rq} + d\psi_{rq}/dt + (\omega_0 - z_p \omega) \psi_{rd}; \\ d\omega/dt &= (M_e - M_L)/J_r, \end{aligned} \quad (3.1)$$

та алгебричними співвідношеннями

$$\psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad (3.2)$$

$$\psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad \psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \quad (3.3)$$

$$\psi_{md} = L_m I_{md}; \quad \psi_{mq} = L_m I_{mq}; \quad (3.4)$$

$$I_{md} = I_{sd} + I_{rd}; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq}; \quad (3.5)$$

$$M_e = (3z_p/2)K_r(\psi_{rd}I_{sq} - \psi_{rq}I_{sd}), \quad (3.6)$$

де індексами d та q позначені проекції на однойменні координатні осі узагальнених векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора $\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$, струму ротора $\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$, струму намагнічування $\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$, потокозчеплення статора $\bar{\psi}_s = [\psi_{sd}, \psi_{sq}]^T$, потокозчеплення ротора $\bar{\psi}_r = [\psi_{rd}, \psi_{rq}]^T$; основного потокозчеплення $\bar{\psi}_m = [\psi_{md}, \psi_{mq}]^T$; M_e – електромагнітний момент двигуна; M_L – момент навантаження АД; z_p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість ротора; J_r – момент інерції ротора двигуна; R_s, R_r – активні опори фаз статора і ротора, зведеного до статора; L_m – індуктивність намагнічування; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз статора та ротора, де $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно; $K_r = L_m/L_r$ [17-19] .

Якщо система рухомих координат зорієнтована за вектором потокозчеплення ротора, що математично виражається у вигляді умов [17-19]

$$\psi_{rq} = 0; \quad d\psi_{rq}/dt = 0; \quad \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|, \quad (3.7)$$

то із (3.1) отримаємо модель АД у вигляді системи диференціальних рівнянь (3.8)-(3.11)

$$d\psi_r/dt = -\psi_r/T_r + I_d L_m/T_r; \quad (3.8)$$

$$dI_d/dt = -I_d R'_s/L' + U_d/L'_s + (\omega_0 L'_s I_q + K_r \psi_r/T_r)/L'_s; \quad (3.9)$$

$$dI_q/dt = -I_q R'_s/L'_s + U_q/L'_s - (\omega_0 L'_s I_d + K_r \psi_r z_p \omega)/L'_s; \quad (3.10)$$

$$d\omega/dt = (M_e - M_L)/J, \quad (3.11)$$

де $\psi_r \equiv \psi_{rd} = |\bar{\psi}_r|$; $I_d \equiv I_{sd}$, $I_q \equiv I_{sq}$, $U_d \equiv U_{sd}$, $U_q \equiv U_{sq}$ – відповідно потокова і моментна компоненти вектора струму та компоненти вектора напруги статора АГ; $T_r = L_r/R_r$ – стала часу ротора; $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$. При цьому швидкість обертання $\bar{\psi}_r$ та момент визначатимуться як [17-19]

$$\omega_0 = z_p \omega + K_r R_r I_q / \psi_r, \quad M_e = (3/2) z_p K_r I_q \psi_r. \quad (3.12)$$

Для живлення обмоток статора АД трифазною напругою з регульованими частотою, амплітудою та фазою використовується транзисторний інвертор напруги (ІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Динамічні властивості такого ІН можна описати ланкою часового запізнення з передатною функцією[20]:

$$W_{in}(p) = K_u e^{-T_u p}, \quad (3.13)$$

де K_u – коефіцієнт передачі ІН; T_u – час запізнення, що дорівнює періоду ШІМ. Використовуючи ряд Паде, ланку часового запізнення можна апроксимувати аперіодичною ланкою 1-го порядку, стала часу якої дорівнює часу запізнення. Отже опис ІН в двофазних координатах матиме вигляд диференційних рівнянь (3.14), (3.15) [21]:

$$dU_d/dt = -U_d/T_u + u_d K_u/T_u; \quad (3.14)$$

$$dU_q/dt = -U_q/T_u + u_q K_u/T_u, \quad (3.15)$$

де u_d, u_q – сигнали керування компонентами вектора напруги статора двигуна U_d, U_q відповідно[21].

Опис (3.1)-(3.15) успішно використовується при проектуванні систем традиційного векторного керування, де швидкість ротора змінюється в широкому діапазоні, а потокозчеплення ротора стабілізується на номінальному рівні ψ_{rn} (індексом n позначаються номінальні значення величин). За цих умов можна прийняти $L_m = \text{const} = L_{mn}$. Проте при енергетично оптимальному

керуванні магнітний потік двигуна істотно змінюється і виникає потреба врахування ефекту насичення заліза АД. У цьому разі L_m можна визначити як $L_m(\psi_m) = \psi_m / I_m(\psi_m)$, де $\psi_m = |\bar{\psi}_m|$; $I_m = |\bar{I}_m|$; $I_m(\psi_m)$ – обернена крива намагнічування АД. Функцію $L_m(\psi_m)$ зручно апроксимувати поліномом [21]:

$$L_m = L_{mn} \sum_{i=0}^p a_i \psi_m^{p-i} \quad (3.16)$$

де a_i – коефіцієнти, p – степінь полінома, $\psi_m = \sqrt{\psi_r^2 + (K_r L_{r\sigma} I_q)^2}$.

Індуктивності $L_{s\sigma}$ та $L_{r\sigma}$ змінюються мало, а тому вважаються постійними.

За умов істотних варіацій L_m ускладняється задача оцінювання $\bar{\psi}_r$, яка має важливе значення для забезпечення високої якості векторного керування АД та точності оптимізації втрат. Застосування в цьому разі оцінювачів (спостерігачів) потокозчеплення ротора, розроблених для $L_m = \text{const}$ [22, 23], призводитиме до значних відхилень між реальним ψ_r та його оцінкою $\hat{\psi}_r$, саме яка є сигналом зворотного зв'язку для регулятора потокозчеплення. Звідси ясно, що в САК АЕП з енергоефективним алгоритмом керування доцільно використовувати оцінювач $\bar{\psi}_r$, що враховує криву намагнічування. Оцінювач вектора потокозчеплення ротора з врахуванням кривої намагнічування асинхронної машини запропоновано в. Проте в даній роботі з метою спрощення будемо вважати, що $L_m = \text{const} = L_{mn}$ [24].

3.8 Побудова функціональної схеми системи

Побудова функціональної схеми САК АЕП робота-кур'єра ґрунтувалася на основі класичної теорії систем векторного керування асинхронними машинами [17-19]. Ця схема зображена на рис. 3.3. У функціональній схемі системи умовно можна виділити наступні частини:

- частину векторних перетворень;
- силову частину;

- частину регулювання.

Силова частина системи складається з АД, акумуляторної батареї (АБ) та інвертора напруги з ШІМ (ІН).

Частина векторних перетворень складається з: блоків перетворення кількості фаз (ПФ1 та ПФ2), блоків перетворення координат (ПК1 та ПК2), блоку компенсації зворотних зв'язків (БКЗ) та спостерігача потокозчеплення ротора АД. У ПФ2 виміряні фазні струми статора I_A , I_B трифазної системи А,В,С перетворюються у фазні струми статора I_α , I_β двофазної системи α,β використовуючи співвідношення (3.17) [17-19].

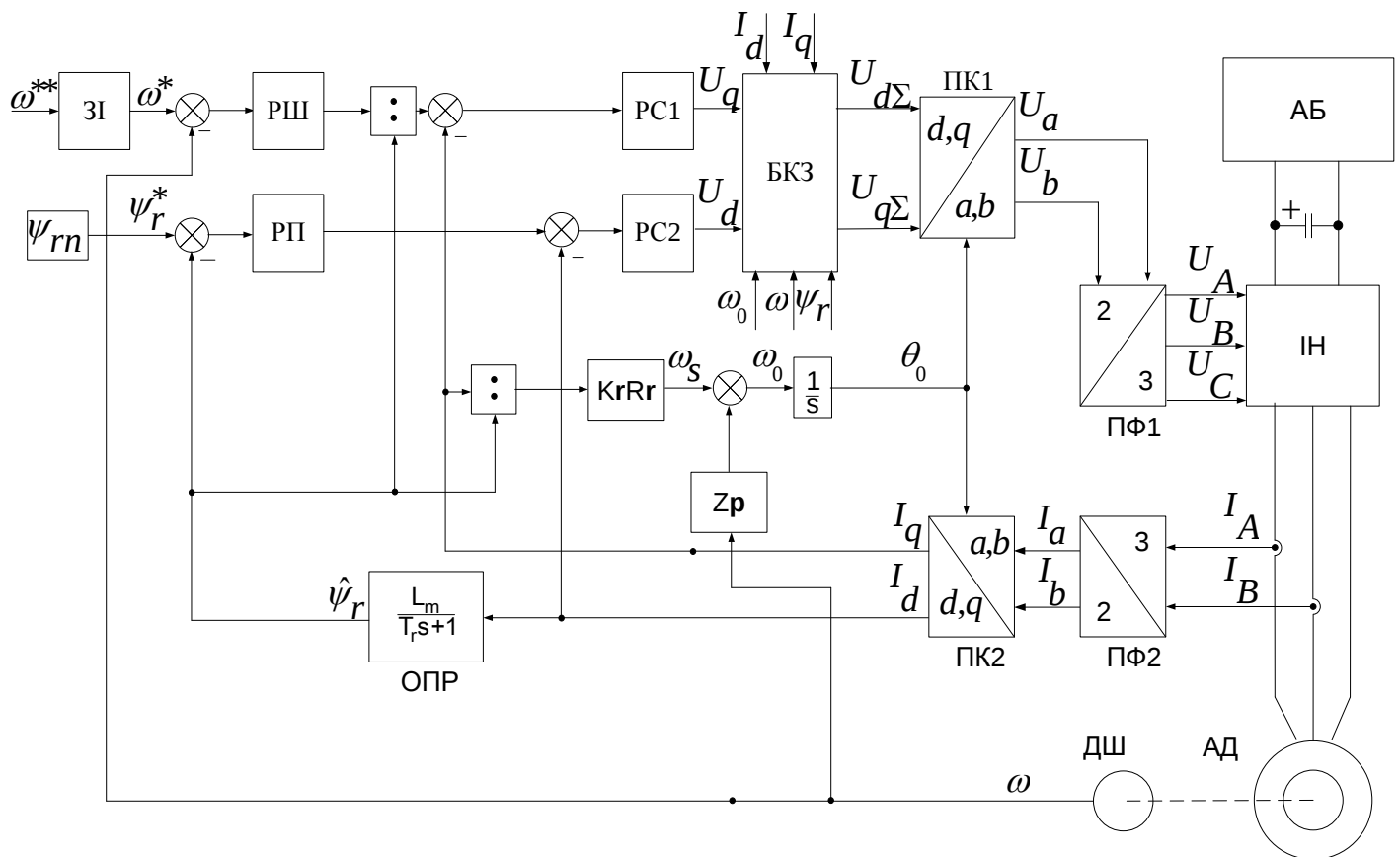


Рисунок 3.3 – Функціональна схема САК АЕП робота-кур'єра

$$I_\alpha = I_A; I_\beta = \frac{(I_A + 2I_B)}{\sqrt{3}} \quad (3.17)$$

Блок ПК2 використовується для перетворення координат, тобто для перетворення струмів I_α , I_β із нерухомої системи α,β у струми I_d , I_q вже в рухомій системі координат d,q використовуючи наступне співвідношення (3.18) :

$$I_d = I_\alpha \cos \theta_0 + I_\beta \sin \theta_0; \quad I_q = I_\beta \cos \theta_0 - I_\alpha \sin \theta_0, \quad (3.18)$$

де θ_0 — кут повороту вектора $\bar{\psi}_r$. У БКЗ обраховуються сигнали u_{dk}, u_{qk} і являються компенсаціями внутрішніх зв'язків (3.9-3.10) моделі АД (компоненти рівнянні 3.9-3.10, що розміщенні у дужках):

$$u_{dk} = -\frac{L'_s \omega_0 I_q + \frac{K_r \psi_r}{T_r}}{K_u}; \quad u_{qk} = \frac{L'_s \omega_0 I_d + K_r z_p \omega \psi_r}{K_u}, \quad (3.19)$$

де K_u — коефіцієнт передачі ІН. Після розрахунків u_{dk}, u_{qk} у БКЗ визначається $u_{d\Sigma}, u_{q\Sigma}$ за виразом (3.20):

$$u_{d\Sigma} = u_d + u_{dk}; \quad u_{q\Sigma} = u_q + u_{qk} \quad (3.20)$$

У ПК1 виконується зворотнє перетворення струмів із системи координат d,q у систему координат α, β використовуючи наступне співвідношення (3.21) [19]:

$$u_\alpha = u_{d\Sigma} \cos \theta_0 - u_{q\Sigma} \sin \theta_0; \quad u_\beta = u_{d\Sigma} \sin \theta_0 + u_{q\Sigma} \cos \theta_0 \quad (3.21)$$

У ПФ1 виконується перетворення двофазної системи α, β в трифазну А,В,С, тобто сигнали u_α, u_β перетворюються у завдання напруги статора АД u_A, u_B, u_C використовуючи співвідношення (3.22), яке наведено нижче [19]:

$$u_A = u_\alpha; \quad u_B = \frac{-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta}{2}; \quad u_C = \frac{-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta}{2} \quad (3.22)$$

У спостерігачі вектора потокозчеплення ротора двигуна обчислюється модуль ψ_r та кут θ_0 вектора $\bar{\psi}_r$ згідно наступними виразами:

$$\psi_r(s) = I_d(s) \cdot \frac{L_m}{T_r s + 1}; \quad \theta_0(t) = \int_0^t \omega_0(\tau) d\tau, \quad (3.23)$$

де s — змінна перетворення Лапласа. Оцінка $\hat{\psi}_r$ визначається в оцінювачі потокозчеплення ротора (ОПР).

Частину регулювання системи, яка зображена на рисунку 3.3, складають 4 ПІ-регулятори з відповідними їм елементами підсумовування – регулятори складових вектора струму статора двигуна РС1, РС2, регулятор швидкості РШ та регулятор потоку РП, також наявний давач швидкості двигуна ДШ та задавач інтенсивності зміни швидкості ЗІ, який забезпечує трансформацію прямокутної форми сигналу завдання ω^{**} у трапецієвидну форму сигналу ω^* швидкості двигуна [19].

Необхідно відмітити, що для вдалого функціонування цієї системи необхідно здійснювати адаптацію параметрів оцінювача $\bar{\psi}_r$ до реальних значень опору ротора АД, який істотно змінює значення при змінах теплового стану двигуна. Але, оскільки розгляд алгоритмів адаптації до змін R_r виходить за межі даної роботи, то підсистема адаптації не зображена.

3.9 Синтез регуляторів системи векторного керування АЕП

3.9.1 Синтез регулятора струму статора I_d

Регулятор струму статора I_d має вигляд, як на рисунку 3.4 [21].

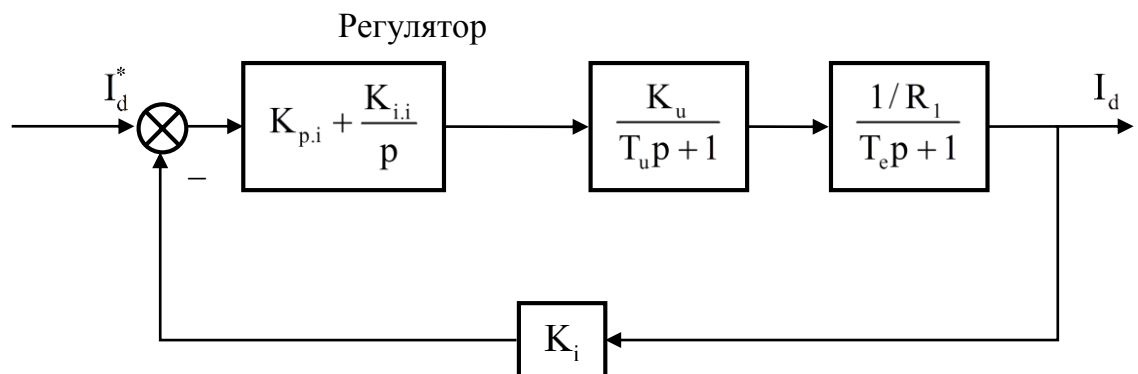


Рисунок 3.4 — Контур регулювання струму I_d

Передаюча функція об'єкту регулювання має вигляд (3.24) [21]:

$$W_{\text{роз.с}}(z) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (3.24)$$

Налаштування контуру виконується на модульний оптимум. Регулятор матиме вигляд [21]:

$$W_{\text{пер.і}}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2 T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i p} \quad (3.25)$$

Отримали ПІ-регулятор струму:

$$W_{\text{роз.і}}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}$$

де,

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i}; \quad K_{i.i} = \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i}; \quad R_1 = R_c + \left(\frac{L_M}{L_2}\right)^2 R_r \quad (3.26)$$

$$R_1 = 0.347 + \left(\frac{0.095}{0.098}\right)^2 \cdot 0.181 = 0.51 \text{ Ом}$$

$$K_u = 311 \text{ (В)}; \quad T_u = 0.001 \text{ (с)}$$

$$T_e = \frac{L_{1\sigma} + \frac{L_M}{L_2} L_{2\sigma}}{R_1}$$

$$T_e = \frac{0.0019 + \frac{0.095}{0.098} \cdot 0.003}{0.51} = 0.0095 \text{ с}$$

Для того, щоб спростити моделювання коефіцієнт зворотного зв'язку K_i приймаємо рівним 1 [21].

Підставимо значення розрахованих параметрів R_1 , K_u , T_u , T_e , K_i до формул 3.26 отримаємо значення коефіцієнтів ПІ-регулятора [21]:

$$K_{p.i} = \frac{0.0095 \cdot 0.51}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.008$$

$$K_{i.i} = \frac{0.51}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0,83$$

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи має вигляд [21]:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)} \quad (3.27)$$

а замкненої:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1) + 1} \quad (3.28)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2 \cdot 0.001 \cdot p^2 + 0.001p + 1}$$

Оскільки $(T_u)^2$ значно менша за T_u , то нею можна знехтувати. Тоді передатна функція системи матиме наступний вигляд:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1} \quad (3.29)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0.002p + 1}$$

3.9.2 Синтез регулятора струму I_q .

Контур регулювання струму статора I_q є таким же як і контуру регулювання струму I_d . Через синтез виконується за такою ж методикою [21].

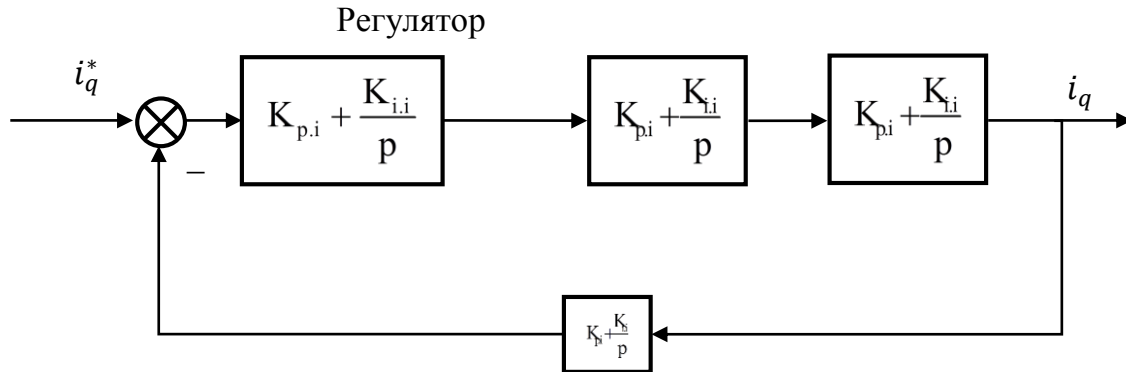


Рисунок 3.5 — Контур регулювання струму I_q

Передаточна функція об'єкту регулювання [21]:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (3.30)$$

Налаштування контуру виконується модульний оптимум. Регулятор матиме вигляд [21]:

$$W_{\text{пер.і}}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2T_u K_u K_i p} \quad (3.31)$$

Маємо ПІ-регулятор струму:

$$W_{\text{пер.і}}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}$$

$$R_1 = 0.51 \text{ Ом}; K_u = 311 \text{ В}; T_u = 0.001 \text{ с}; T_e = 0.0095 \text{ с}. \quad (3.32)$$

Щоб спростити моделювання коефіцієнт зворотного зв'язку K_i приймемо рівним 1.

Отримаємо значення коефіцієнтів ПІ-регулятора:

$$K_{p.i} = 0.008; \quad K_{i.i} = 0.83$$

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи має вигляд [21]:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)} \quad (3.33)$$

а замкненої системи:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u + 1} \quad (3.34)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0.002p + 1}$$

3.9.3. Синтез регулятора потокозчеплення ротора ψ_r .

Контур регулювання потокозчеплення ротора ψ_r зображений на рисунку 3.6.

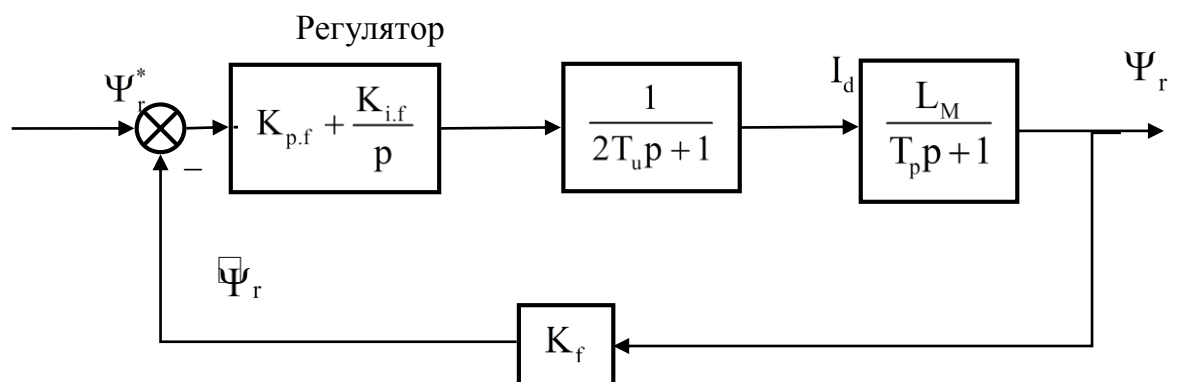


Рисунок 3.6 — Контур регулювання потокозчеплення ротора ψ_r

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд 3.35

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{L_M K_f}{(2T_u p + 1)(T_r p + 1)} \quad (3.35)$$

Контуру налаштований на модульний оптимум, тому регулятор має вигляд [21]:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = \frac{T_r p + 1}{4T_u L_M K_f p} = \frac{T_r}{4T_u L_M K_f} + \frac{1}{4T_u L_M K_f p} \quad (3.36)$$

Отримали ПІ-регулятор потокозчеплення ротора:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p} \quad (3.37)$$

$$K_{p.f} = \frac{T_r}{4T_u L_M K_f}; \quad K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_M K_f}$$

$$T_r = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0.098}{0.181} = 0.53 \text{ с}; \quad L_M = 0.095 \text{ Гн}$$

Щоб спростити моделювання коефіцієнт зворотного зв'язку K_i приймаємо рівним 1 [21].

Підставивши розраховані параметри T_u, T_r, L_M, K_f до формул (3.37), отримаємо значення коефіцієнтів ПІ-регулятора [21]:

$$K_{p.f} = \frac{0.53}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.095 \cdot 1} = 1418; \quad K_{i.f} = \frac{1}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.095 \cdot 1} = 2631$$

Передатна функція розімкнутої системи разом із регулятором має вигляд:

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1)} \quad (3.38)$$

а замкненої:

$$W_{\text{зам.п}}(p) = \frac{1}{T_u p (2T_u p + 1) + 1} \quad (3.39)$$

$$W_{\text{зам.п}}(p) = \frac{1}{1 \cdot 10^{-3} p^2 + 0.001 p + 1}$$

3.9.4. Синтез регулятора швидкості

Контур регулювання швидкості електроприводу ω має вигляд, показаний на рисунку 3.7.

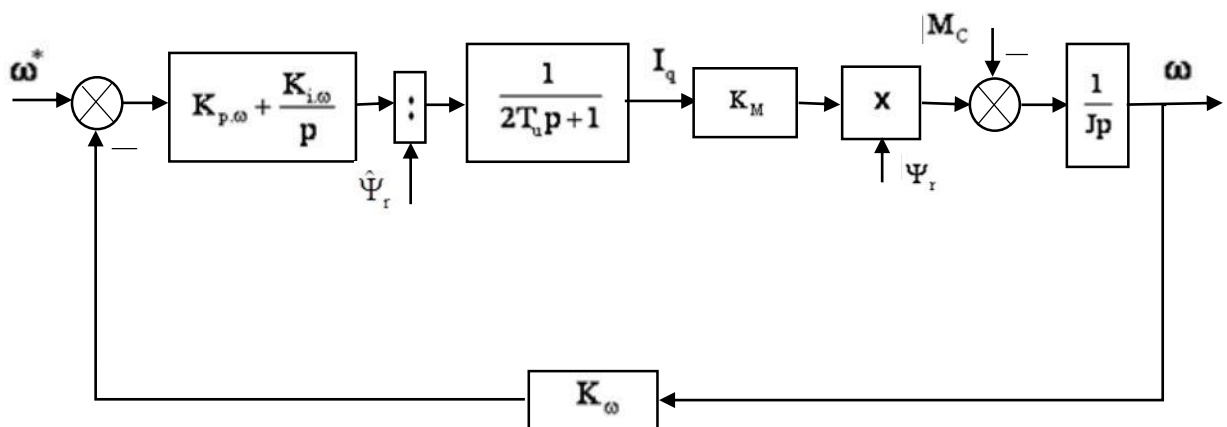


Рисунок 3.7 — Контур регулювання швидкості ω

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{\text{роз.ш}}(p) = \frac{K_M K_\omega}{(2T_u p + 1) J p} \quad (3.40)$$

Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = \frac{J(8T_u p + 1)}{32T_u^2 K_M K_\omega p} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega} + \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega p} \quad (3.41)$$

Маємо ПІ-регулятор швидкості:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = K_{p.\omega} + \frac{K_{i.\omega}}{p}$$

$$K_{p.\omega} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega}; \quad K_{i.\omega} = \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega} \quad (3.42)$$

$J_\Sigma = 6.69 \text{ кг/м}^2$ — середній момент інерції двигуна та механізму;

$$K_M = \frac{3 \cdot p n \cdot L_m}{2L_2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.095}{2 \cdot 0.098} = 2.9368$$

Для спрощення моделювання приймаємо коефіцієнт зворотного зв'язку $K_\omega = 1$. Через це на вхід контуру подається номінальне значення швидкості [21].

Підставивши числові значення T_u, K_M, K_ω, J до формул, отримаємо числові значення коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості:

$$K_{p.\omega} = \frac{J}{4 \cdot T_u \cdot K_M \cdot K_\omega} = \frac{6.69}{4 \cdot 0.001 \cdot 2.936 \cdot 1} = 570$$

$$K_{i.\omega} = \frac{J}{32 \cdot T_u^2 \cdot K_M \cdot K_\omega} = \frac{6.69}{32 \cdot 0.001^2 \cdot 2.936 \cdot 1} = 71261$$

Висновки до розділу 3

1. На основі розрахунків двигуна нами були розраховані основні елементи для силового перетворювача, а саме для ланки постійного струму і інвертора, які обрані давачі струму та напруги.

2. Наведений математичний опис асинхронного двигуна та інвертора напруги.

3. Побудована функціональна схема та зроблений її опис. Також синтезовані регулятори струму, потокозчеплення та швидкості. І розраховані відповідні коефіцієнтів для цих регуляторів.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ

4.1 Опис моделі САК АЕП

Для проведення досліджень системи була побудована модель яка відтворювала функціональну схему системи на рисунку 3.3

В моделі синтезовано чотири регулятори : два регулятори струму, один регулятор потокозчеплення та один регулятор швидкості. Також є блок компенсації зворотної ЕРС, два блоки перетворення координат ($d, q \rightarrow a, b$; $a, b \rightarrow d, q$), модель інвертора та модель асинхронного двигуна. Керовані величини виведені на осцилографи для постійного спостереження за моделювання системи. Ще в моделі: повний розрахунок витраченої енергії електроприводом, який складається з інтегрування витраченої потужності; розрахунок пройденого шляху; миттєві значення струму та швидкості. Траєкторія руху задається за допомогою блоку Signal Builder.

Силову частину моделі зібрано з асинхронного двигуна, акумуляторної батареї, та інвертора напруги з ШІМ.

4.2 Моделювання циклу NEDC-15

На першому етапі досліджувалась робота системи зі стандартним алгоритмом векторного керування де завдання потокозчеплення постійне і дорівнює номінальному значенню.

Моделювання було виконано для циклу NEDC-15 (рисунок 2.2) при повному завантаженні робота. Отримані результати представленні на рисунку 4.1.

На рисунку 4.1 графіки перехідних процесів при традиційному керуванні. Графіки перехідних процесів складаються з: 1) графік швидкості; 2.) графік моменту; 3.) графік струмів I_d та I_q ; 4.) похибка швидкості; 5.) графік потокозчеплення фази А; 6.) графік напруги фази А; 7.) графік струму фази А; 8.) графік спожитої потужності.

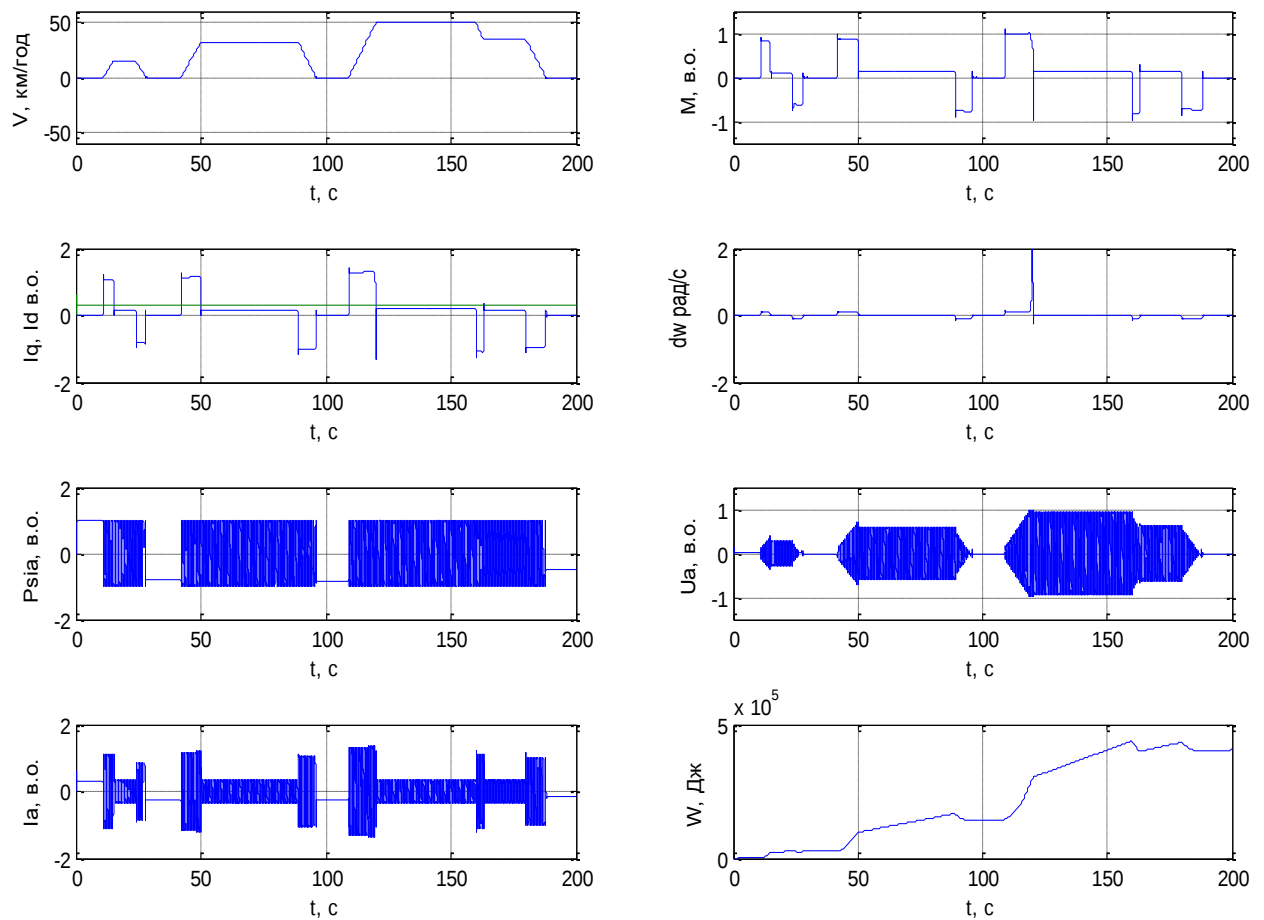


Рисунок 4.1 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні заданої траєкторії руху NEDC-15

З рисунку 4.2 видно, що момент досягає номінального значення. І у деяких моментах на мале значення перевищує номінальне значення.

Потокозчеплення відповідно до завдання стало весь час роботи двигуна. Напруга також не перевищує номінальне значенні на номінальній швидкості А похибка відпрацювання швидкості дуже мала. З рисунку 4.1 можна зробити висновок, що при відпрацюванні системою траєкторії NEDC-15, система стійка, і з достатньо високою точністю відпрацьовує завдання.

На другому етапі моделювання було зроблено моделювання руху під гору, з кутом нахилу дороги 25 градусів, та на швидкості 10 км/год. З стандартним

векторним керуванням з постійним значенням потокозчеплення. Та повністю завантаженим роботом.

На рисунку 4.2 графіки перехідних процесів при традиційному керуванні. Графіки перехідних процесів складаються з: 1) графік швидкості; 2.) графік моменту; 3.) графік струмів I_d та I_q ; 4.) похибка швидкості; 5.) графік потокозчеплення фази А; 6.) графік напруги фази А; 7.) графік струму фази А; 8.) графік спожитої потужності.

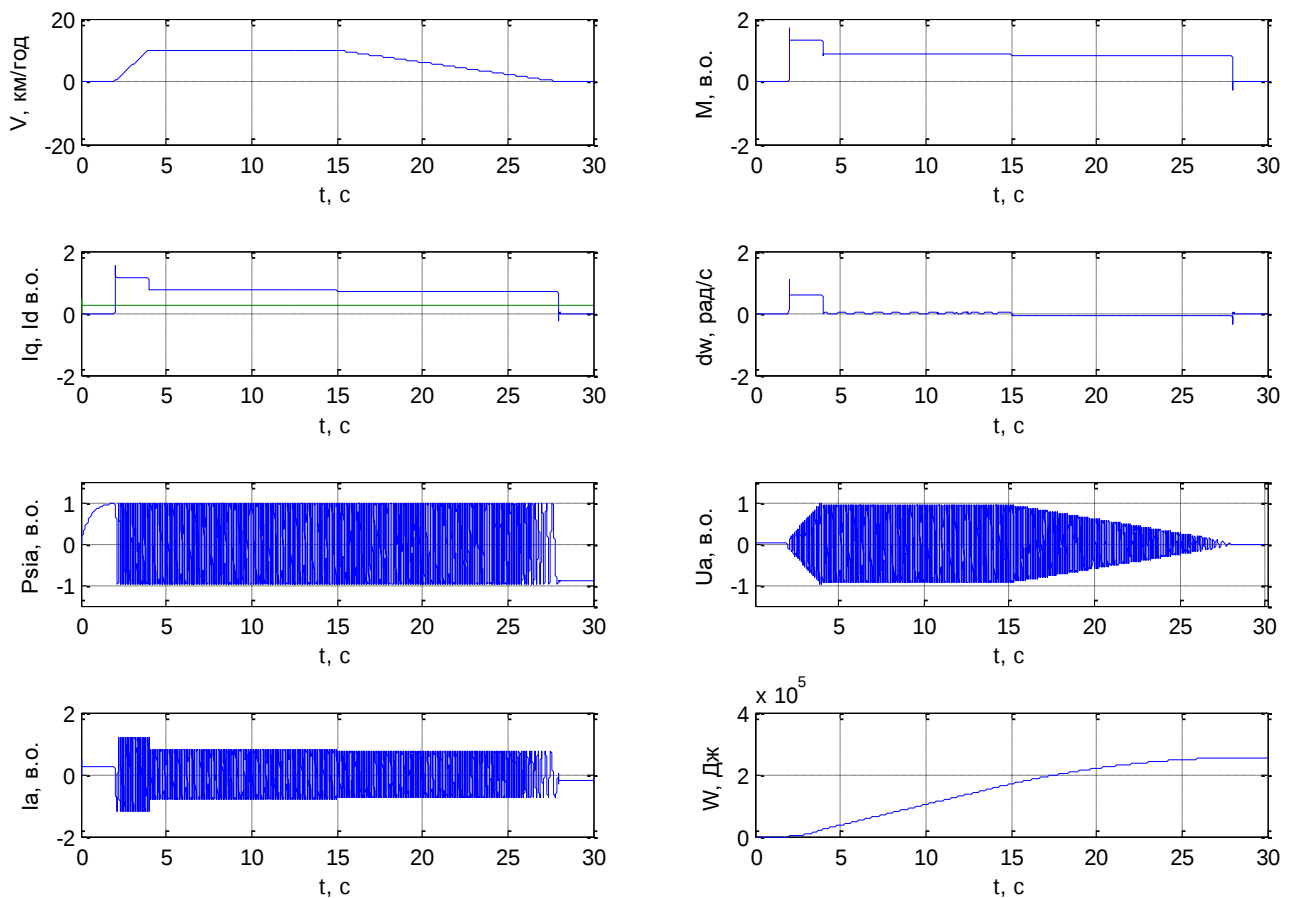


Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів при руху під гору

З рисунку 4.2, можна побачити що двигун відпрацьовує задану траєкторію швидкості. Момент двигуна при русі під гірку з кутом нахилу дороги 25 градусів, та швидкості 10 км/год, складає 1.4 від номінального моменту під час розгону. Та 0.85 від номінального моменті під час усталеного руху.

Потокозчеплення відпрацьовується правильно, з постійним значенням під час усього часу роботи двигуна.

З рисунку 4.2 видно, що система відпрацьовує задану траєкторію руху, з нормальним потокозчепленням, та з малою похибкою відпрацювання швидкості, що свідчить про стійкість системи.

4.3 Спецчастина. Дослідження енергоефективної САК АЕП робота-кур'єра

У цьому підрозділі ми розглянемо модифікацію САК АЕП робота-кур'єра в якій здійснюється мінімізація втрат потужності в усталених режимах роботи АД та проведемо дослідження енергоефективного режиму роботи системи.

Електромагнітні втрати потужності в АД, які охоплюють електричні втрати в активних опорах статора та ротора (втрати в міді) та магнітні втрати у залізі статора і ротора (втрати в залізі або в сталі) можуть бути врахованими за допомогою схеми заміщення фази АД, що представлена на рис. 4.3 [25]. У цій схемі R_m – це опір, що враховує магнітні втрати в АД; $S = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$ – ковзання двигуна.

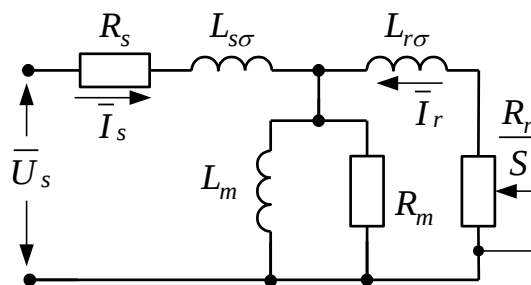


Рисунок 4.3 – Т-подібна схема заміщення фази АД

Магнітний опір за нехтування незначною складовою магнітних втрат у роторі можна обчислювати як [26]:

$$R_m(f_0) \approx (K_h / f_0 + K_e)^{-1}, \quad (4.1)$$

де K_h – коефіцієнт втрат від гістерезису; K_e – коефіцієнт втрат від вихрових струмів; $f_0 = |\omega_0|/2\pi$ – частота напруги живлення АД [26].

В [27] отримано вираз для визначення оптимального значення Ψ_r^{opt} модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r за критерієм мінімуму сумарних втрат потужності асинхронної машини (втрати у міді та в сталі машини) в усталених процесах :

$$\Psi_r^{opt} \cong |I_q| \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + 2K_e R_r^2)}{R_s/L_m^2 + K_h z_p |\omega| + K_e z_p^2 \omega^2}} \quad (4.2)$$

Модифікуємо наведену на рис. 4.1 функціональну схему системи таким чином, щоб вона відповідала режиму роботи з мінімізацією втрат в АД. Отримана функціональна схема енергоефективної САК АЕП робота-кур'єра зображена на рис. 4.4.

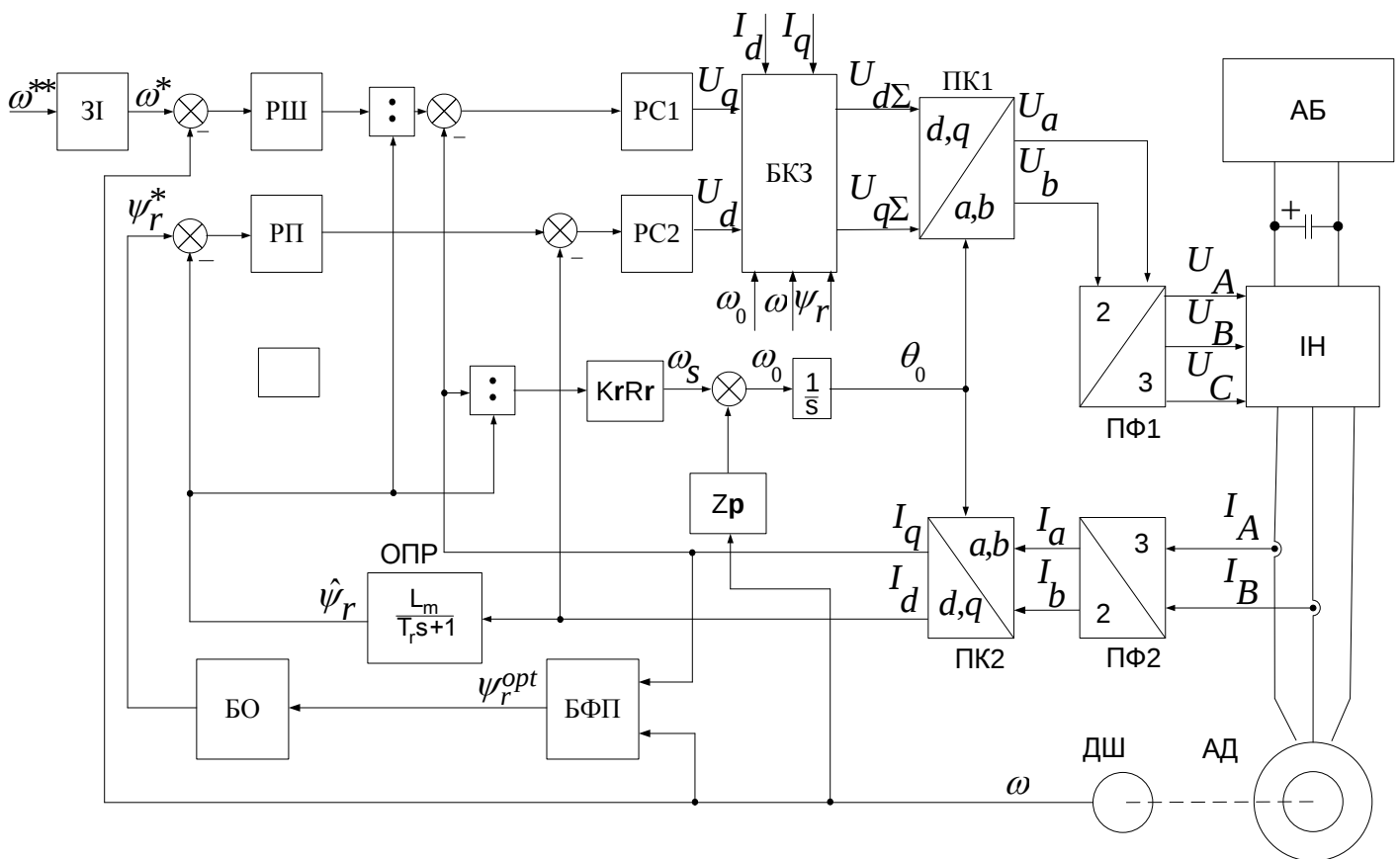


Рисунок 4.4 – Функціональна схема енергоефективної САК АЕП
робота-кур'єра

У цій схемі, на відміну від попередньої схеми класичного векторного керування АД на рис. 3.3, наявні два нових блоки. Перший блок це блок функціонального перетворення (БФП) в якому визначається оптимальне потокозчеплення за алгоритмом (4.2). Другий блок це блок обмеження (БО), де сигнал завдання потокозчеплення Ψ_r^* , що поступає на регулятор, обмежується зверху на рівні номіналу, а знизу – на рівні допустимого розмагнічування магнітопроводу двигуна.

Модель САК АЕП робота-кур'єра в Simulink була модифікована у відповідності зі схемою на рис. 4.4 і за її допомогою було проведено дослідження енергоефективного режиму роботи системи.

У першому досліді система відпрацьовувала діаграму швидкості міського циклу при завантаженому роботі. Отримані результати моделювання наведені на рис. 4.5-4.6.

На рисунку 4.5-4.6 графіки перехідних процесів при енергоефективному керуванні. Графіки перехідних процесів складаються з: 1) графік швидкості; 2.) графік моменту; 3.) графік струмів I_d та I_q ; 4.) похибка швидкості; 5.) графік потокозчеплення фази А; 6.) графік напруги фази А; 7.) графік струму фази А; 8.) графік різниці споживаної енергії при традиційному керуванні та при енергоефективному керуванні.

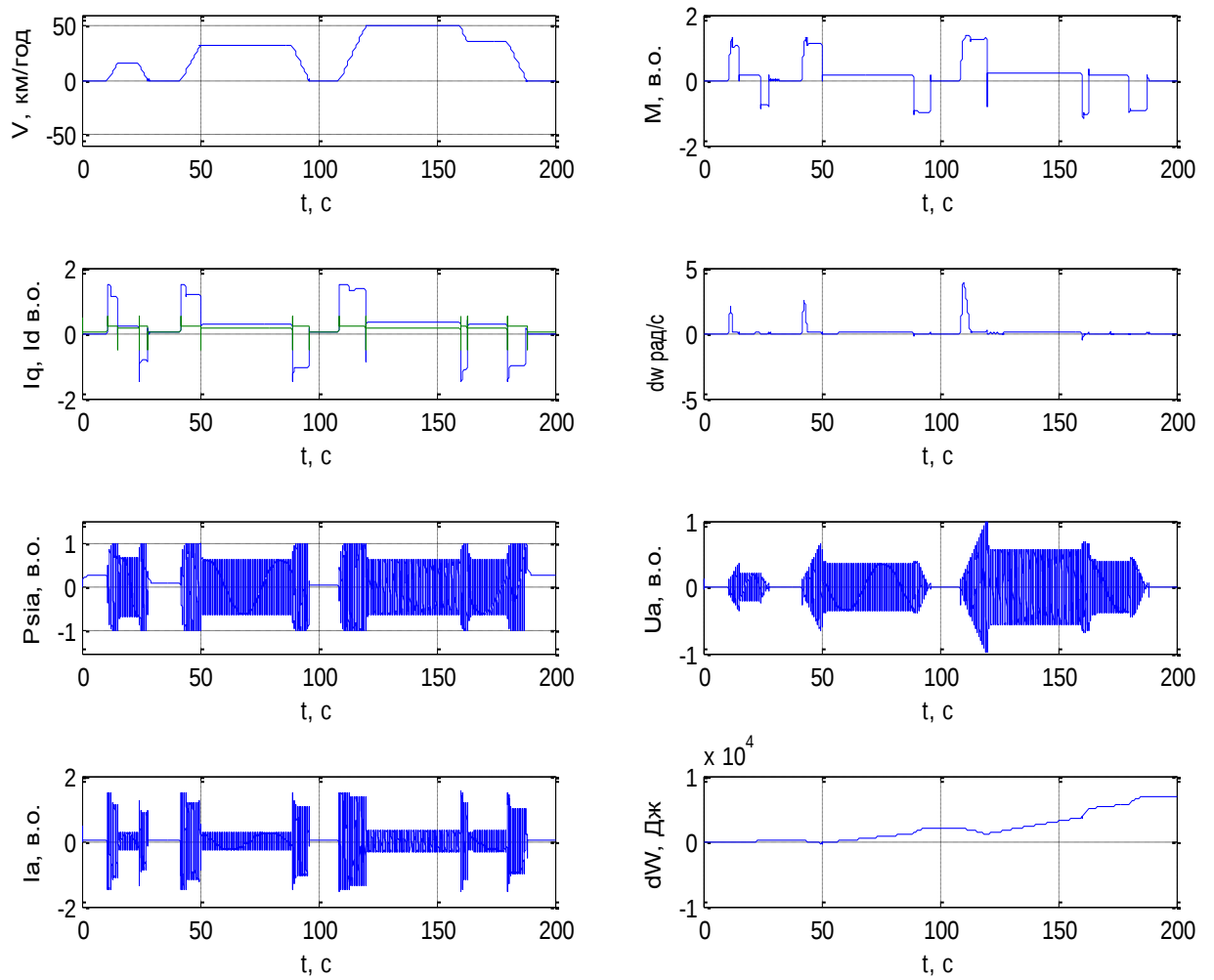


Рисунок 4.5 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні заданої траєкторії руху NEDC-15 при економічному керуванні та з вантажем

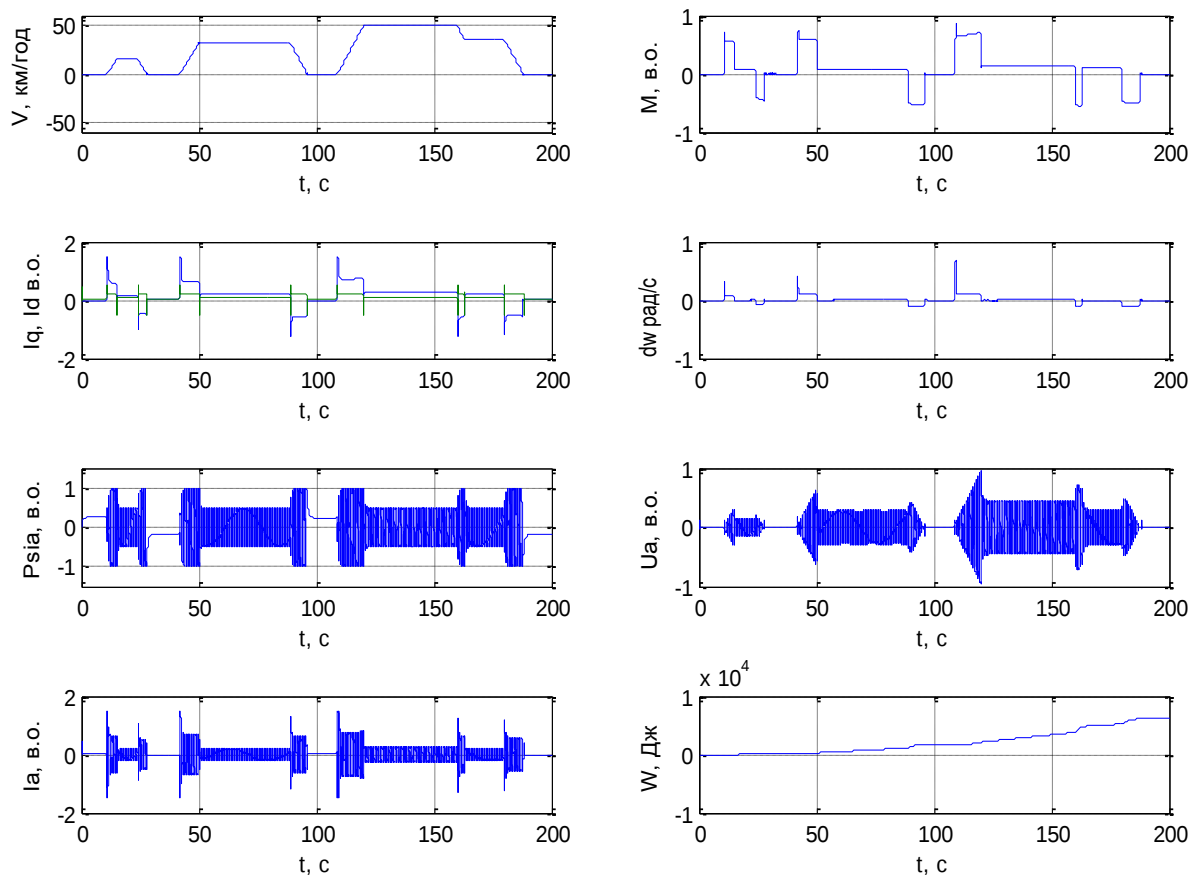


Рисунок 4.6 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні заданої траєкторії руху NEDC-15 при економічному керуванні без вантажу

В режимі енергоефективного керування в системі не виникає схильність до коливань, динаміка задовільна, струму та напруги не виходять за межі. Економію видно через зміну потоку та через падіння навантаження.

Графік різниці спожитої енергії dW показує скільки економить система за допомогою системи енергоефективного керування поточкозчепленням.

З графіків видно, що енергоефективність має місце на великих швидкостях руху, та зменшенні навантаження. Економія енергії починається коли двигун виходить на швидкість понад 30 км/год. За один цикл NEDC-15 система економить біля 8 кДж. Оскільки моделюється тільки один з 3 циклів, то отриманий результат можна до множити на три і отримати значення економії енергії за весь цикл, а саме біля 24 кДж. З рисунків 4.5-4.6 видно, що при

завантаженому роботі момент зростає у два рази у порівнянні з не завантаженим роботом.

Також якщо перевести джоулі у вати, то буде можливо порахувати, скільки власник буде економити при використанні цієї системи. Оскільки 24 кДж це значення при проходженні робота 4,3 км, а батарея робота розрахована на 50 км. То за один заряд економія приблизно складає 0,1 кВт·год. Також якщо взяти, що робот заряджається на спеціальних комерційних зарядних станціях де один кіловат/година коштує 9.90 гривень. Це є не дуже багато, але із додатковим заряджанням робота за один день, він може проїжджати близько 250 км за день і за один день один робот може економити 0.5 кВт·год. Але якщо цих роботів використовує комерційна організація яка потребує великої кількості перевезень, або поштова служба, ці компанії можуть мати у власності не одного робота, а 100, особливо якщо це велика поштова компанія. То за один день 100 роботів економлять 50 кВт·год. Що також не є великою сомою, за місяць роботи економлять 15 000 гривень. І за 5 місяців використання роботів, за допомогою енергоефективного керування з економити вартість одного робота.

Висновки до розділу 4

1. У данному розділі було здійснено моделювання системи керування роботом та дослідження енергоефективного керування.

2. З дослідів можна побачити, що система стійка, та повністю відпрацьовує задану траєкторію швидкості. Було досліджено траєкторію руху NEDC-15 та траєкторію руху робота у гору. По графікам видно, що система стійка та потужності двигуна достатньо, що показує що двигун вибраний правильно.

3. Було розроблену функціональну схему для енергоефективного керування системою.

4. Моменту двигуна достатньо для відпрацювання траєкторії NEDC-15. Ми показали, що система енергоефективного керування дійсно корисна і те, що вона може зменшувати витрати енергії у системі, що у свою чергу зменшить фінансові витрати власника при групі роботів.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було спроектовано електромеханічну систему автоматичного керування електроприводу робота-кур'єра на основі асинхронного двигуна. Сформована модель традиційного векторного керування та енергоефективного векторного керування. На основі результатів моделювання підтверджена ефективність енергоефективного керування АЕП робота-кур'єра. При виконанні дипломного проекту були отримані наступні висновки та результати.

1. Здійснено аналітичний огляд, який підтвердив актуальність проблеми, дозволив сформулювати вимоги до ЕП та вибрати прототип на основі робота Lotte.

2. Побудовано модель руху робота в умовах міського циклу дозволила отримати навантажувальну діаграму двигуна необхідну для його вибору.

3. Розрахована необхідна ємність акумуляторної батареї для руху повністю завантаженого робота на відстань в 50 км. Для даних умов обрано акумулятор SSK 80/C–Ah-550 V.

4. Для реалізації системи векторного керування на практиці розраховано та вибрано елементи силового перетворювача. Наведена математична модель об'єкта та розроблена функціональна схема САК АЕП.

5. Виконано синтез регуляторів струму, швидкості, потокозчеплення для реалізації векторного керування асинхронним електроприводом робота.

6. Побудована модель САК АЕП в середовищі Simulink та за її допомогою виконано дослідження властивостей системи при традиційному векторному керуванні та при енергоефективному векторному керуванні АЕП робота-кур'єра. Результати моделювання підтвердили ефективність енергоефективного керування і показали, що можна за 5 місяців на зекономлені кошти придбати нового робота.

7. Розроблено схему електричну принципову силової частини електропривода та виконано креслення зовнішнього вигляду робота-кур'єра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Robotrends. Уличные роботы-курьеры : логистика и роботы. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/ulichnye-roboty-kurery> .
2. VC. прототип робота от Cleverton. URL: <https://vc.ru/future/52425-kompaniya-cleveron-predstavila-svoy-prototip-robota-kurera> .
3. Куліган Д. О., Чернецький Б. С. Особливості вибору тягових електроприводів для побудови систем рухомих електротехнічних комплексів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. №2/1(22). С. 9-12.
4. Міський цикл руху NEDC-15. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle [Останній доступ 01.11.2018].
5. Угловая и линейная скорости. *SolverBook - онлайн сервисы для учебы*. 2015. URL: <http://ru.solverbook.com/spravochnik/mexanika/kinematika/uglovaya-linejnaya-skorosti/>
6. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода : учебник для вузов. Москва : Энергоиздат, 1981. 576 с.
7. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии А4 : справочник. Москва : Энергоатомиздат. 1982. 504 с.
8. Попович М. Г. Теорія електропривода: підручник / за ред. М. Г. Поповича. Київ : Вища школа, 1993. 494с.
9. Теорія мехатронних систем – 1: методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702. "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. Київ : НТУУ "КПІ", 2011 р. 96 с.
10. Сильноточные батареи : сайт производителя SSK. URL: http://www.sskgroup.ru/pages/silnotochnie_batarei.html
11. Функціональна схема та спрощений розрахунок силового перетворювача електроприводу змінного струму. Методичні вказівки до

виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку 6.050702-
 ”Електромеханіка” спеціальність 7.05070204 “Електромеханічні системи
 автоматизації та електропривод” / Уклад С.М. Ковбаса. Київ: НТУУ “КПІ”, 2013
 р. 22 с.

12. Диод стандартный : магазин imrad. URL:
<https://imrad.com.ua/ru/dsi2x55-12a>

13. IGBT силовой модуль : магазин imrad. URL:
<https://imrad.com.ua/ru/skm75gb176d>

14. Мосфет Infineon : Mouser Electronics. URL:
<https://eu.mouser.com/ProductDetail/InfineonIR/IRF3717TRPBF?qs=2r01AXMCG3MFnQf5ZjYoTA%3D%3D>

15. LV 25-P. Датчик нагрузки. URL : <https://www.lem.com/en/lv-25p>.

16. Резистор SQP-5W56KJ : магазин Анион электроникс. URL:
[https://www.anion.ru/katalog/rezistory/keramicheskie-importnye/rezistor-sqp-5w56kj-\(5vt,-56k,-5\)-34432-37208.html](https://www.anion.ru/katalog/rezistory/keramicheskie-importnye/rezistor-sqp-5w56kj-(5vt,-56k,-5)-34432-37208.html)

17. Novotny D. W., Lipo T. A. Vector control and dynamics of AC drives. Oxford: Clarendon press, 2005. 440 p.

18. Vas P. Vector Control of Alternating Current Machines. Oxford University Press, 1990. 332 p.

19. Соколовський Г. Г. Електроприводи переменного тока с частотным регулированием : учеб. Москва : 2006. 265 с.

20. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов : учебник. Москва : Машиностроение, 1990. 304 с.

21. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ: Либідь, 2007. 656с.

22. Verghese G. C., Sanders S. R. Observers for flux estimation in induction machines. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 1988. Vol. 35. No1. P. 85 –94.

23. Atkinson D. J., Acarnley P. P., Finch J. W. Observers for induction motor state and parameter estimation. *IEEE Transaction on Industrial Applications*. 1991. Vol. 27. No6. P. 1119 –1127.

24. Приймак Б. І. Оцінювання потоку ротора асинхронного двигуна з врахуванням нелінійності магнітного кола. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 4. С. 51-57.
25. Вольдек А. И. Электрические машины. Ленинград : Энергия, 1974. 840 с.
26. Sousa G. C. D., Bose B. K., Cleland J. Loss modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive // Proc. of IECON'92 Conf., IEEE, New York, 1992, Vol.1, P.114-120.
27. Приймак Б. І. Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 29-38.

Додаток А Графічна частина

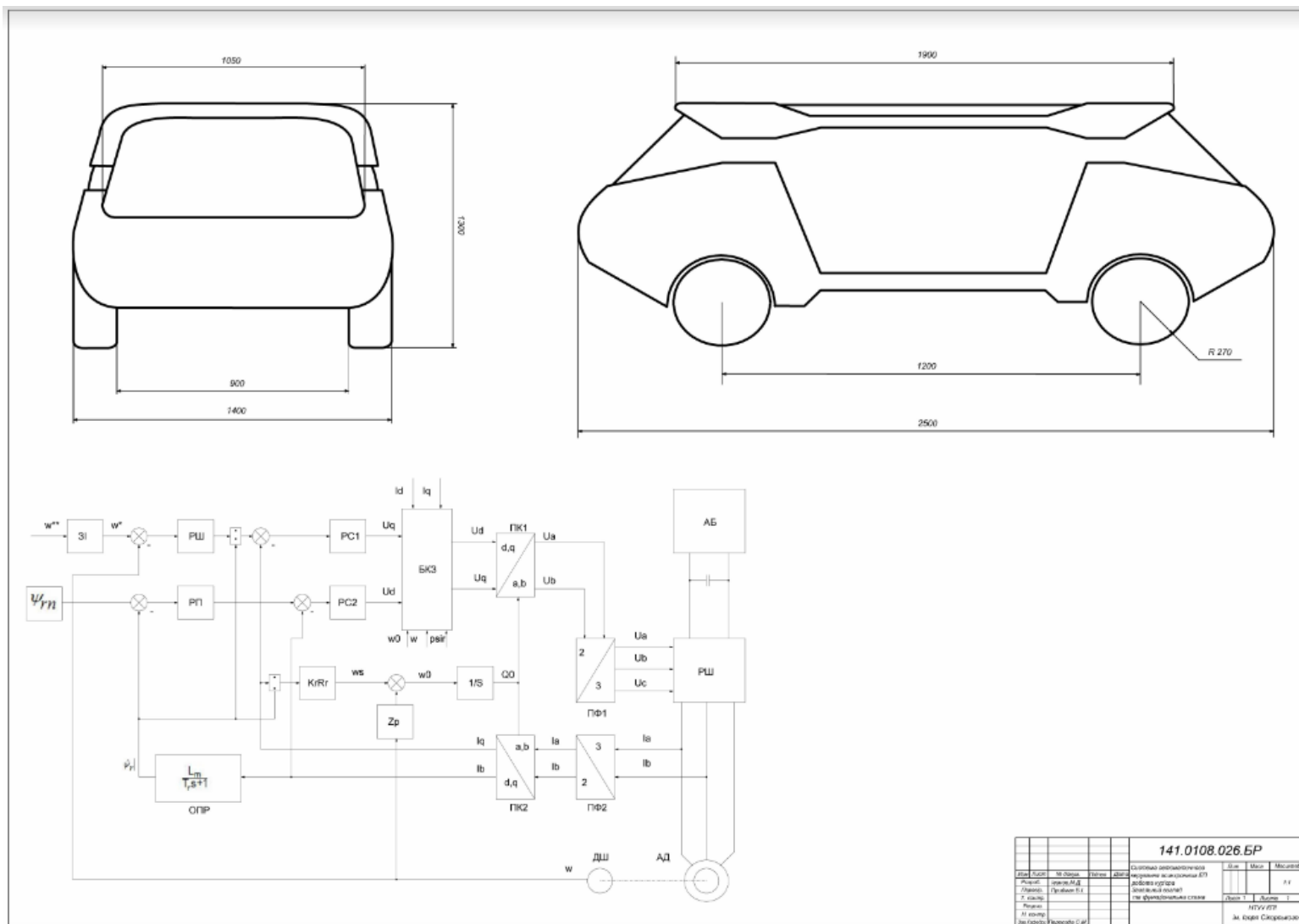


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд та функціональна схема

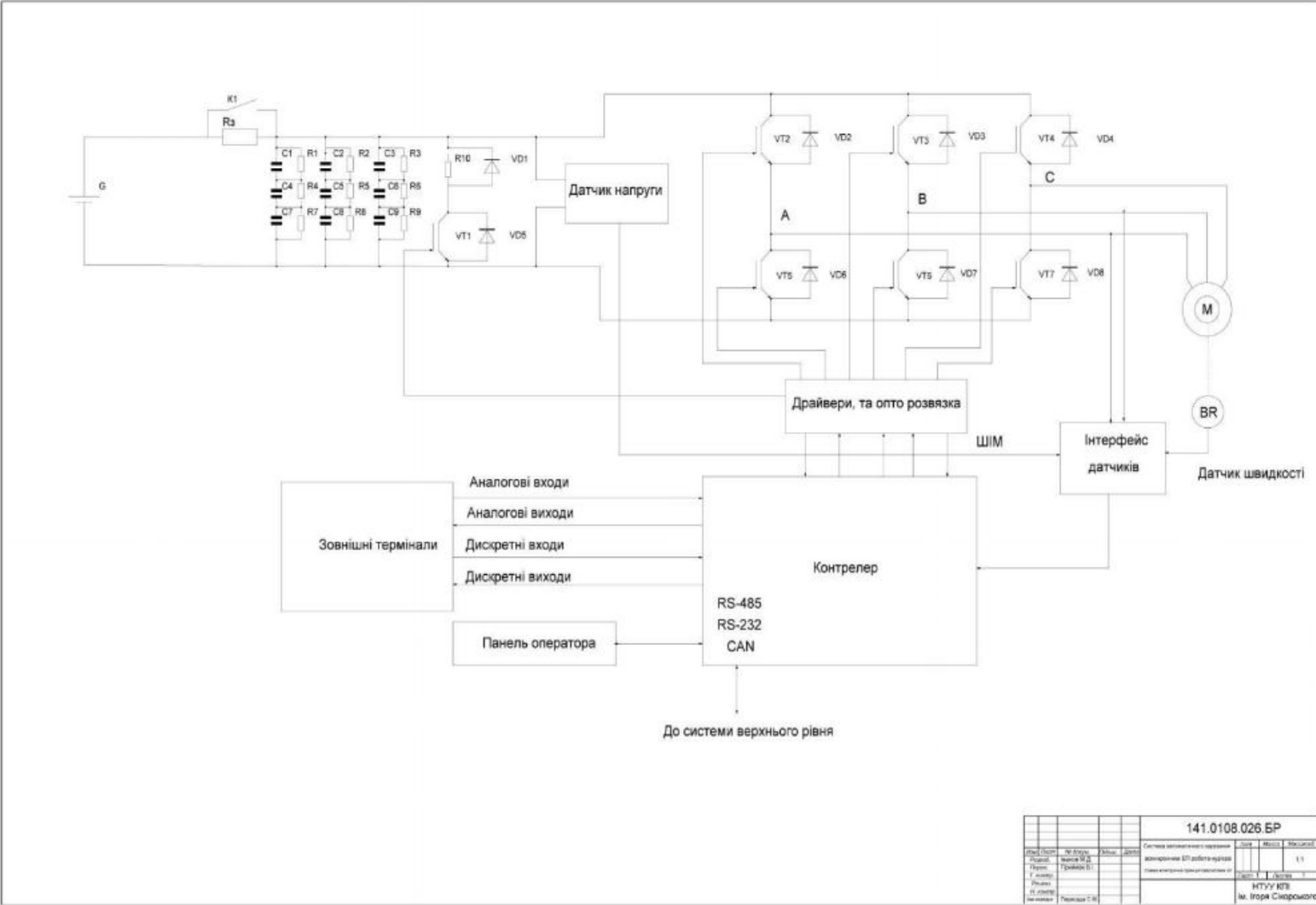


Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд та функціональна схема

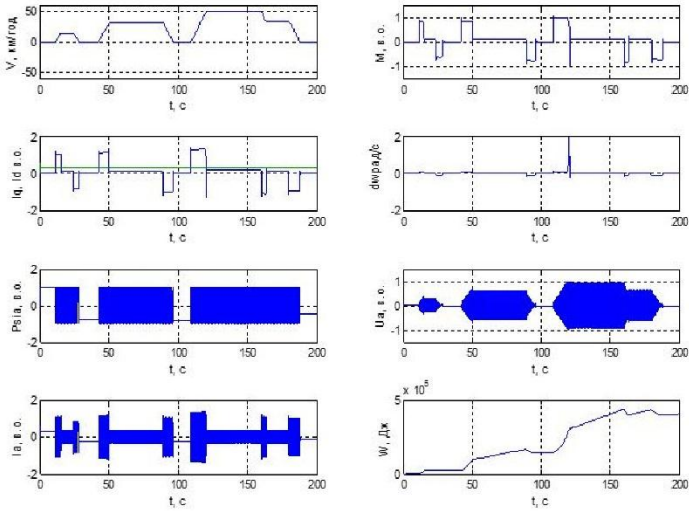


Рисунок 1 - Результати моделювання траєкторії NEDC-15

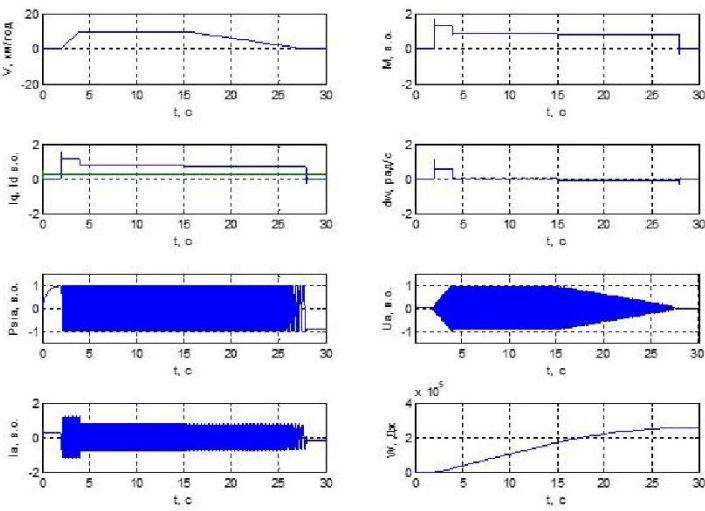


Рисунок 2 - Результати моделювання траєкторії руху у гору

				141.0108.026.БР		
				Основа для розробки курсової роботи з предмету		
				Результати моделювання		
				Всього: 3		
				Всього: 3		
				Всього: 3		
				Всього: 3		
				Всього: 3		
				Всього: 3		
				Всього: 3		

Рисунок 5.3 – Результати моделювання

