

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

Частотно-керований електропривод електровозу типу АРП 14

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-21ск

Владислав ЗАКУРЕНКО

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор КОТОВ

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор КОТОВ

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗАКУРЕНКО Владислав Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Частотно-керований електропривод електровозу типу АРП 14

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація електромеханічної системи. Завданням є розрахунок характеристик та дослідження роботи автоматизованого електромеханічного комплексу на новій елементній базі
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз тягових електроприводів змінного струму для рудничних акумуляторних електровозів; II. Дослідження статичних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14; III. Дослідження динамічних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Механічні характеристики АД; II. Графіки енергетичних характеристик; III. Функціональна схема перетворювача частоти із шім; IV. ПРИНЦИПОВА Схема моделі силової схеми тягового електропривода змінного струму із гнучкою структурою; V. Діаграма напруги на статорі АД з живленням від ПЧ із ШІМ; VI. Електромагнітний момент і частота обертання при пуску АД з живленням від ПЧ із ШІМ.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор КОТОВ		
II	Ігор КОТОВ		
III	Ігор КОТОВ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Обґрунтування параметричного ряду електровозів	10.05.24
2	Вимоги до тягового електропривода	12.05.24
3	Обґрунтування застосування тягового електропривода з асинхронними двигунами	17.05.24
4	Технічні характеристики електровоза АРП 14	24.05.24
5	Розрахунки параметрів схеми заміщення тягового електропривода	26.05.24
6	Аналіз статичних характеристик	31.05.24
7	Розробка математичної моделі електропривода	04.06.24
8	Дослідження динамічних режимів	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Владислав ЗАКУРЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор КОТОВ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Частотно-керований електропривод електровозу типу АРП 14»

Об'єкт дослідження – електропривод змінного струму двохосьових видів електровозів.

В першому розділі представлена інформація про електропривод двохосьових видів електровозів, надано загальний вигляд, кінематика, розглянуті вимоги. На основі аналізу вимог до електропривода двохосьових електровозів обрано систему ПЧ-АД, яка дозволяє забезпечити необхідні режими роботи доменної печі, високий ККД та потрібну жорсткість статичних характеристик.

У другому розділі проведено аналіз статичних характеристик ТЕП із твердим зв'язком валів через рейку й нерівномірності навантаження при їхній параметричній несиметрії.

У третьому розділі виконано дослідження на математичних моделях ТЕП при параметричній несиметрії двигунів. На підставі даних моделювання динамічних режимів нерівномірності навантаження двигунів ТЕП регресійні моделі мають вигляд квадратичного полінома при коефіцієнті детермінації 0,99. Синтез моделей здійснюється з використанням методу найменших квадратів.

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЕЛЕКТРОВАЗ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-01	К.
мн.	Арк.А	Лист	опис	Дата		

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз тягових електроприводів змінного струму для рудничних акумуляторних електровозів	9
1.1. Обґрунтування параметричного ряду електровозів з урахуванням умов підземних рудників	9
1.2. Вимоги до тягового електропривода рудничних акумуляторних електровозів	12
1.3. Обґрунтування застосування тягового електропривода з асинхронними двигунами на рудничному електровозі.....	16
1.4. Технічні характеристики електровоза АРП 14	17
Розділ 2. Дослідження статичних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14	19
2.1. Розрахунки параметрів схеми заміщення тягового електропривода....	19
2.2. Аналіз статичних характеристик тягового електропривода.....	21
Розділ 3. Дослідження динамічних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14	28
3.1. Розробка системи вирівнювання навантаження при параметричній несиметрії електродвигунів.....	28
3.2. Розробка математичної моделі тягового електропривода	30
3.3. Дослідження динамічних режимів вирівнювання навантаження при параметричній несиметрії електродвигунів	32
Висновки	44

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-01	К.
мн.	Арк.А	Лист	дпис	Дата		

Вступ

Електричний транспорт вже багато років використовується як основний при видобутку корисних копалин.

Переважна більшість таких установок містить застаріле обладнання у своєму складі.

Отже впровадження сучасних систем електроприводу на транспортних засобах які використовуються для перевезення гірської породи при її видобутку є актуальною задачею.

Електромеханічні системи транспортних засобів які використовуються для перевезення гірської породи при її видобутку дотепер базуються на електроприводі з двигунами постійного струму.

Підвищення ефективності такого електроприводу можливо завдяки використанню насамперед імпульсного регулювання частоти обертання тягових електродвигунів.

Цей підхід добре зарекомендував себе з огляду простоти його реалізації.

Подальше поліпшення експлуатаційних показників тягових електромеханічних систем можливе за рахунок впровадження нових видів тягових електродвигунів.

Нові типи електричних двигунів які розроблено спеціально для умов транспортних засобів мають поліпшену структуру магнітопроводу та підвищену перевантажувальну здатність.

Переважна більшість таких структур базується на системах змінного струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-01	К.
мн.	Арк.А	Лист	дпис	Дата		

Впровадження систем змінного струму для транспортних засобів які використовуються для перевезення гірської породи при її видобутку мають певні ускладнення.

Річ в тім що контактна мережа що експлуатується натеper є мережею постійного струму.

Тому при використуванні її як джерела живлення виникає необхідність додаткового перетворення параметрів напруги живлення тягових електродвигунів.

Також виникає необхідність додаткового узгодження характеристик джерела та навантаження у вигляді тягових електродвигунів змінного струму на відміну від застосованих постійного.

Тому для впровадження електромеханічних систем з новими типами електричних двигунів використовують попередній розрахунок таких систем та вибір складових обладнання.

На практиці такі конструкторські розробки виконують попередньо із застосуванням обчислювальної техніки.

На відміну від промислових електроприводів в яких системи змінного струму займають переважну першість у транспортних установках які використовуються для перевезення гірської породи при її видобутку вони мають одиничні прояви застосування.

Як було зазначено що факт приналежності джерела до систем постійного струму обумовлює поставати перед певним вибором забезпечення якості споживання електричної енергії.

Вихід з такої ситуації можливий завдяки використуванню електровозів з автономним джерелом живлення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-01	К.
мн.	Арк.А	Лист	опис	Дата		

Такий підхід забезпечує можливість відмовитись від застарілих систем живлення.

Крім того електричний транспорт з автономним джерелом живлення набуває певної мобільності та маневреності відносно його контактного застосування.

Крім поліпшення умов та якості споживання електричної енергії також підвищується надійність експлуатації транспортних засобів які використовуються для перевезення гірської породи від місця її видобутку до розвантажувального пункту.

Доцільність впровадження електромеханічних систем на транспортних засобах які використовуються для перевезення гірської породи доводиться математичним моделюванням перехідних характеристик в усіх режимах роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-01	К.
МН.	Арк.А	Лист	опис	Дата		

Розділ 1. Аналіз тягових електроприводів змінного струму для рудничних акумуляторних електровозів

1.1. Обґрунтування параметричного ряду електровозів з урахуванням умов підземних рудників

Як вже було обумовлено для електроприводу транспортного засобу який використовується для перевезення гірської породи найбільш сприятливим буде його експлуатація з двигунами змінного струму, наприклад асинхронними.

Для реалізації впровадження систем змінного струму найбільш підходить електровозний транспорт що містить автономне джерело електричної енергії.

Тому надалі з усього переліку номенклатури електровозного транспорту зосередимо увагу на використанні саме акумуляторних електровозів шахтного виконання як базову платформу для модернізації тягової електромеханічної системи.

При розгляді техніко-економічних показників при русі транспорту слід враховувати умови експлуатації.

На шахтних виробітках має прояв погіршений стан рейкового полотна та наявність агресивного середовища.

Отже при впровадженні нових типів електромеханічних систем у структуру шахтного електричного транспорту слід враховувати ці особливості та вносити відповідне корегування при розрахунку та перевірці таких систем.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02				
<i>Зм.З</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Пі</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	Заквренко В.В.					Розділ 1	<i>Літ.</i>	<i>ЛистАр</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>	Котов І.А.							99	10
<i>Реценз.</i>							КНУ		
<i>Н. Контр.</i>	Котов І.А.						ЗЕЕМ-21ск		
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.								

Представлена у додатку інформація щодо параметрів електроприводу шахтного акумуляторного електровозу буде використана для його розрахунку.

Годинний струм буде визначено за виразом.

$$I_{\text{ч}} = \frac{F_{\text{ч}} V_{\text{ч}}}{U \eta_{\text{д}} \eta_{\text{н}}}, \text{ А} \quad (1.1)$$

Тоді тягове зусилля:

$$F_{\text{ч}} = \frac{g}{n_{\text{д}}} 1000 P_{\text{с}} \xi, \text{ Н}, \quad (1.2)$$

де $V_{\text{ч}}$ - годинна швидкість руху електровоза, м/с;

$\eta_{\text{н}}$ - к.к.д. передачі;

g - гравітаційне прискорення, м/с²;

ξ - коефіцієнт тяги;

$n_{\text{д}}$ - кількість двигунів на електровозі.

Отже при впровадженні нових типів електромеханічних систем у структуру шахтного електричного транспорту були враховані особливості його експлуатації та внесено відповідне корегування при розрахунку та перевірці такої системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунки показали що система електроприводу повністю задовольняє умовам його експлуатації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.2. Вимоги до тягового електропривода рудничних акумуляторних електровозів

Тяговий електропривод шахтних акумуляторних електровозів має задовольняти ряду вимог:

- реалізація максимального тягового зусилля при русі вгору на переважному ухилі;
- забезпечення екстреного гальмування при русі вниз з ухилу на переважну дистанцію;
- забезпечення певного температурного режиму при експлуатації протягом робочої зміни та недопустимість перевищення температурних коефіцієнтів;
- відповідність розрахункового значення потужності її годинним змінам протягом часу руху.

Наведемо схеми реалізації тягового електроприводу та діаграми що описують їх роботу протягом усіх режимів для шахтного акумуляторного електровозу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

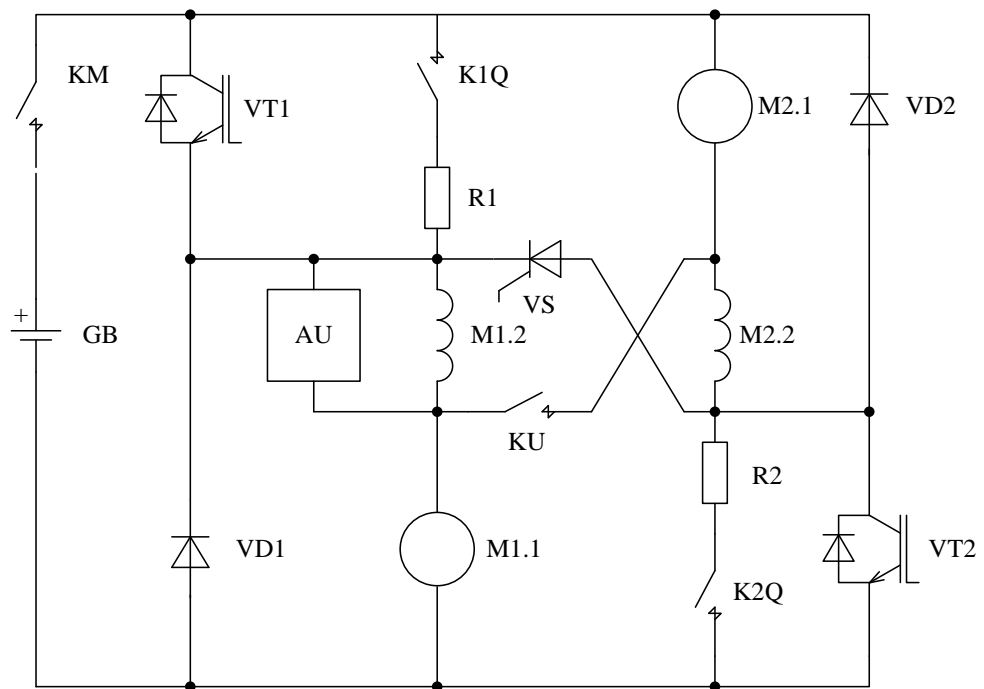


Рисунок 1.3 – Схема ТЕП з ПІ і перемиканням ТЕД паралельно – послідовно

Роботу схем ілюструють діаграми напруг на двигунах, рис. 1.4.

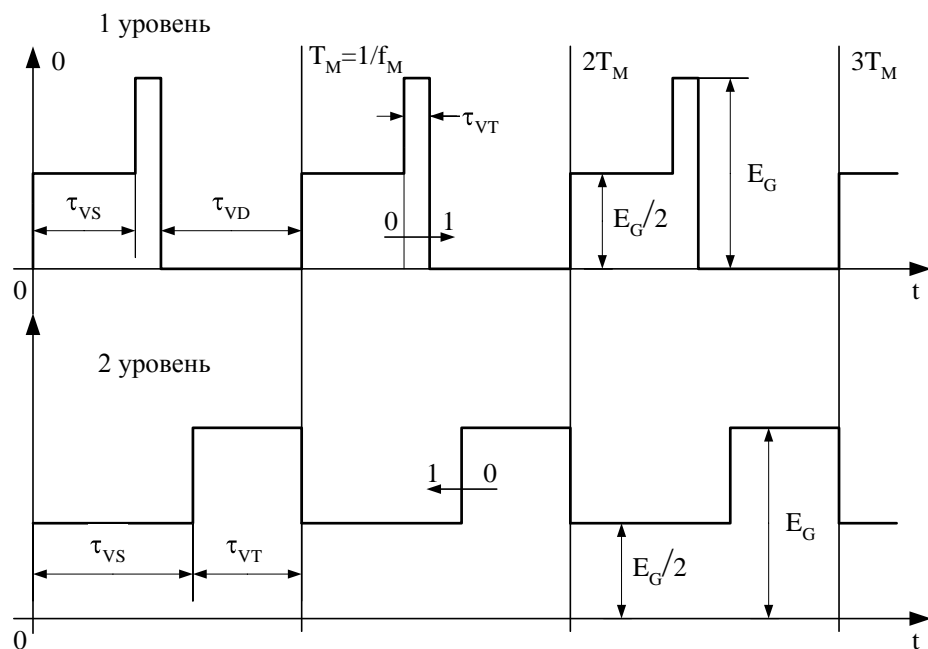


Рисунок 1.4 – Діаграми напруг на двигунах на першому й другому рівнях

Таким чином усі схеми реалізації тягового електроприводу відповідають умовам експлуатації шахтного акумуляторного електровозу та вимогам до його електроприводу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.3. Обґрунтування застосування тягового електропривода з асинхронними двигунами на рудничному електровозі

Обґрунтування вимог до тягового електроприводу шахтного акумуляторного електровозу базується на реалізації зусиль відповідно до тягової характеристики.

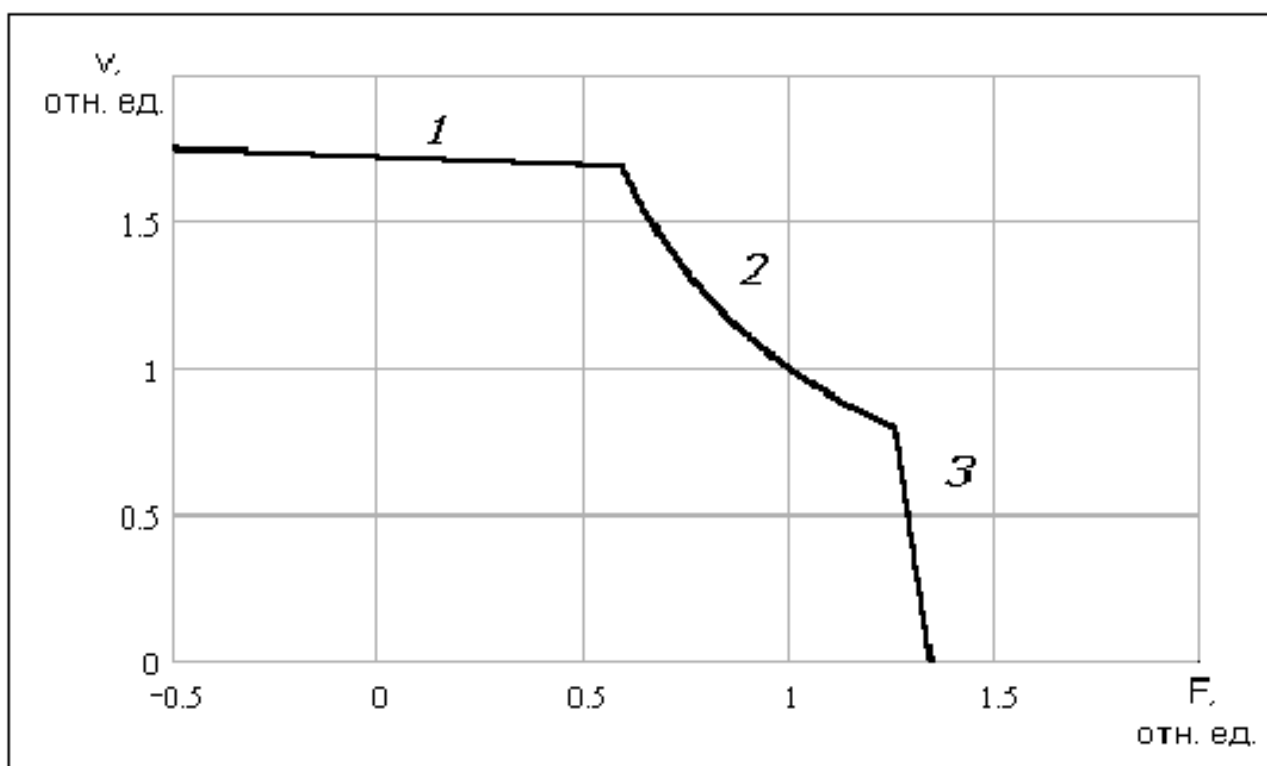


Рисунок 1.5 – Тягова характеристика електровоза

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.4. Технічні характеристики електровоза АРП 14

Технічні характеристики шахтного акумуляторного електровозу буде наведено у додатку.

Представимо зовнішній вигляд шахтного акумуляторного електровозу та спрощену схему реалізації тягового зусилля на ободі коліс системою електроприводу.

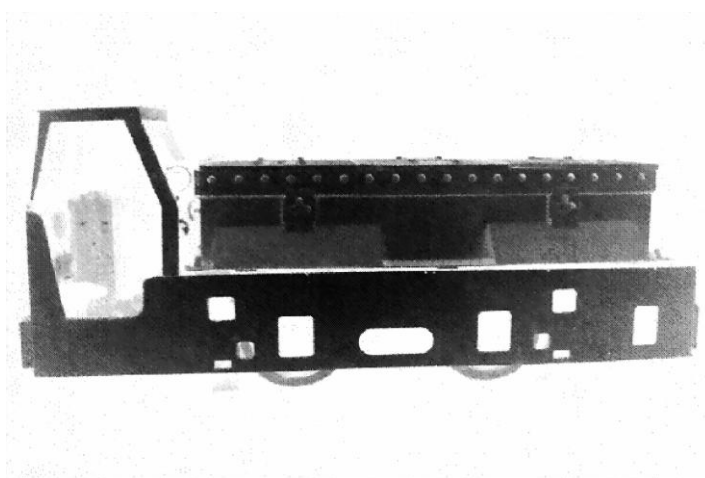


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд акумуляторного електровоза АРП

14

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

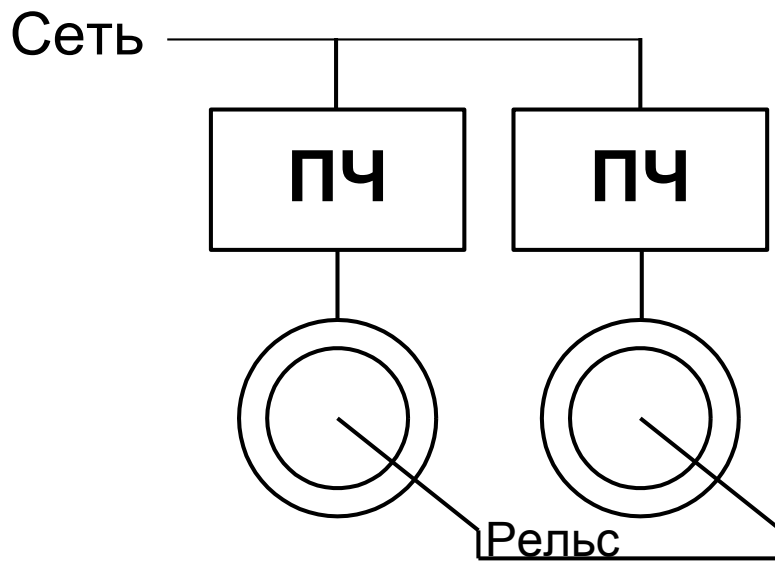


Рисунок 1.7 – Спрощена схема

Розділ 2. Дослідження статичних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14

2.1. Розрахунки параметрів схеми заміщення тягового електропривода

Вибір потужності тягових електродвигунів необхідно виконувати у відповідності до реалізуемого тягового зусилля шахтного акумуляторного електровозу.

Розрахунки наведено окремим додатком.

Параметри тягового електроприводу буде розраховано відповідно до схеми заміщення.

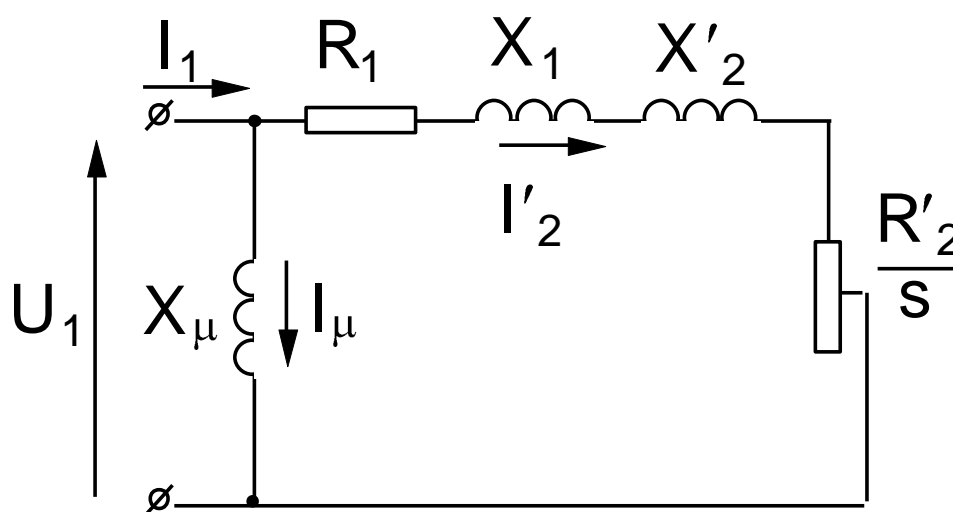


Рисунок 2.1 – Схема заміщення АД

Відповідні параметри схеми заміщення мають бути приведені до обмотки статора асинхронного електродвигуна.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат
Розробив	Заквренко В.В.			
Перевірив	Котов І.А.			
Реценз.				
Н. Контр.	Котов І.А.			
Затвердив	Пересунько І.І.			
Розділ 2				
			Літ.	Лист
			19	9
КНУ ЗЕЕМ-21ск				

Значення номінальних струмів буде розраховано відповідно до паспортних даних електродвигунів.

Також у розрахунках використовується перевантажувальна здатність та коефіцієнт потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2.2. Аналіз статичних характеристик тягового електропривода

Механічні характеристики тягової електромеханічної системи буде розраховано у додатку.

Представимо вигляд електромеханічних та механічних тягових характеристик.

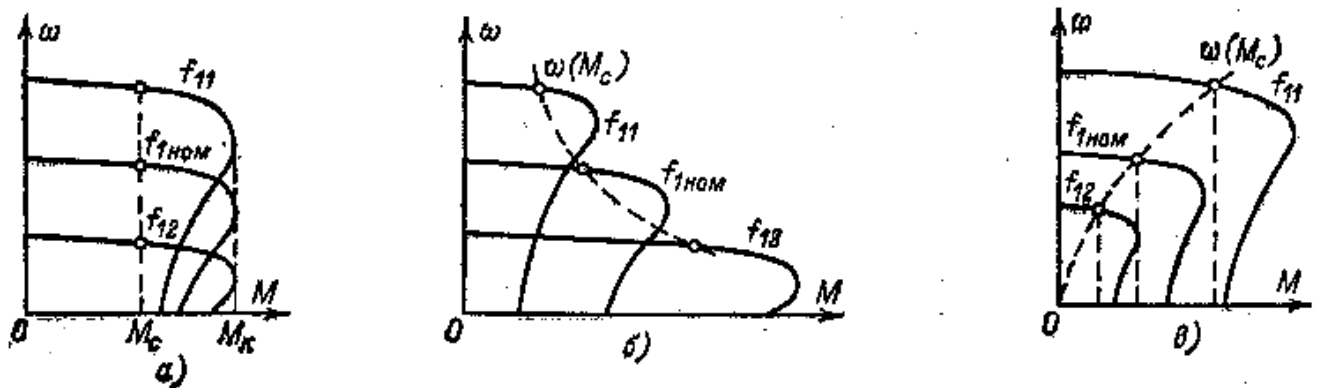


Рисунок 2.2 - Механічні характеристики АД

Розрахунок енергетичних характеристик також представимо у відповідному додатку.

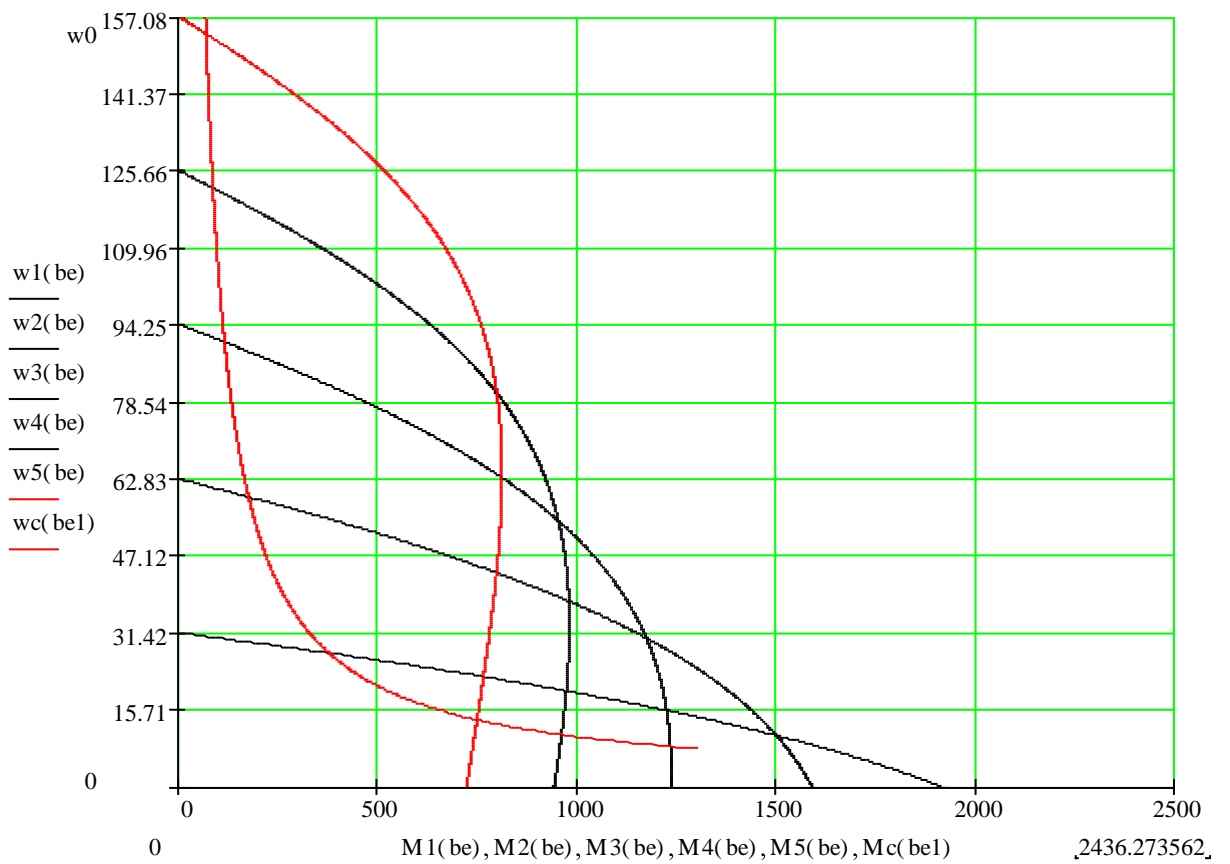


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики електропривода

Представимо графіки струму намагнічення.

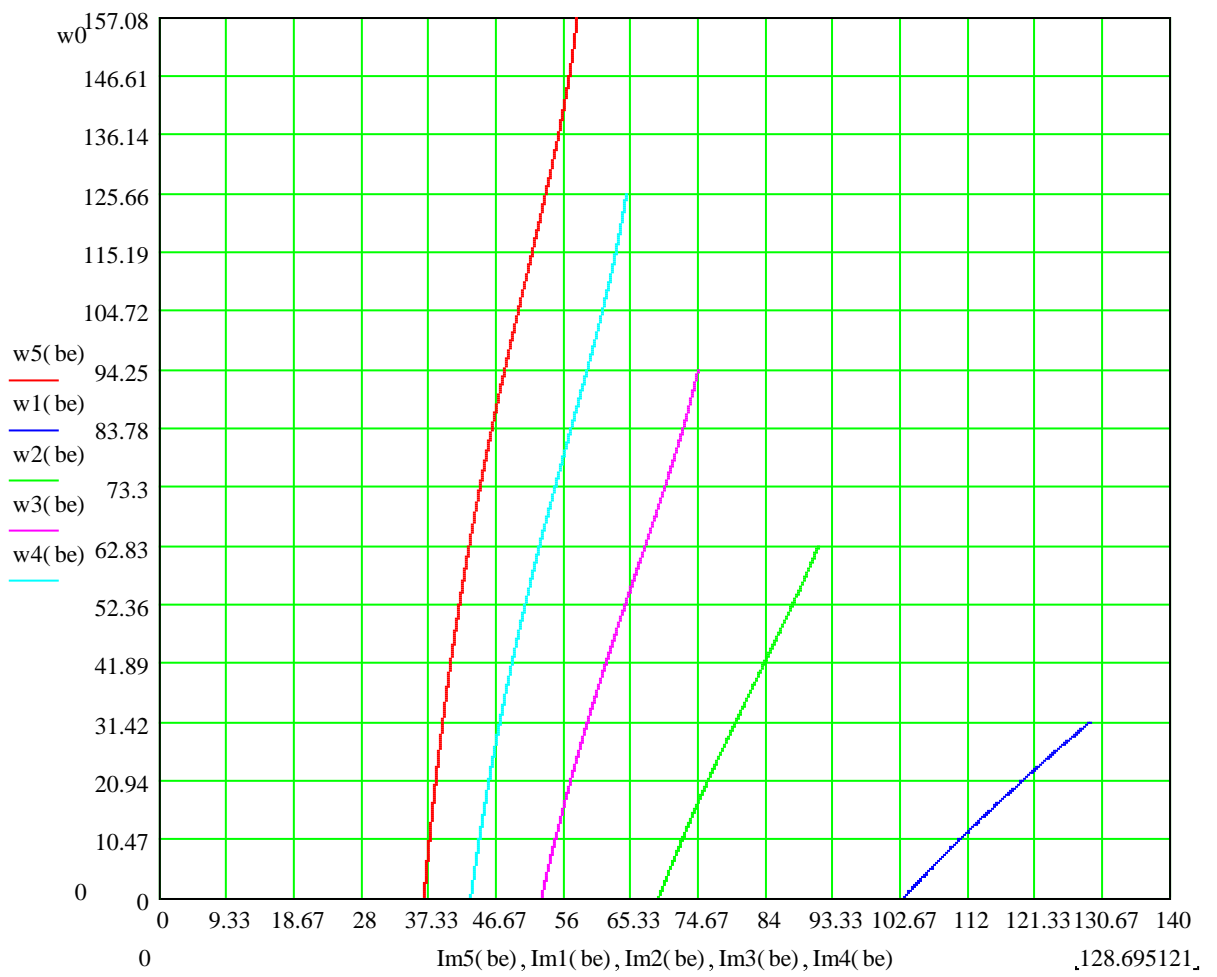


Рисунок 2.4 – Струм намагнічування АД

Представимо графіки струму статора.

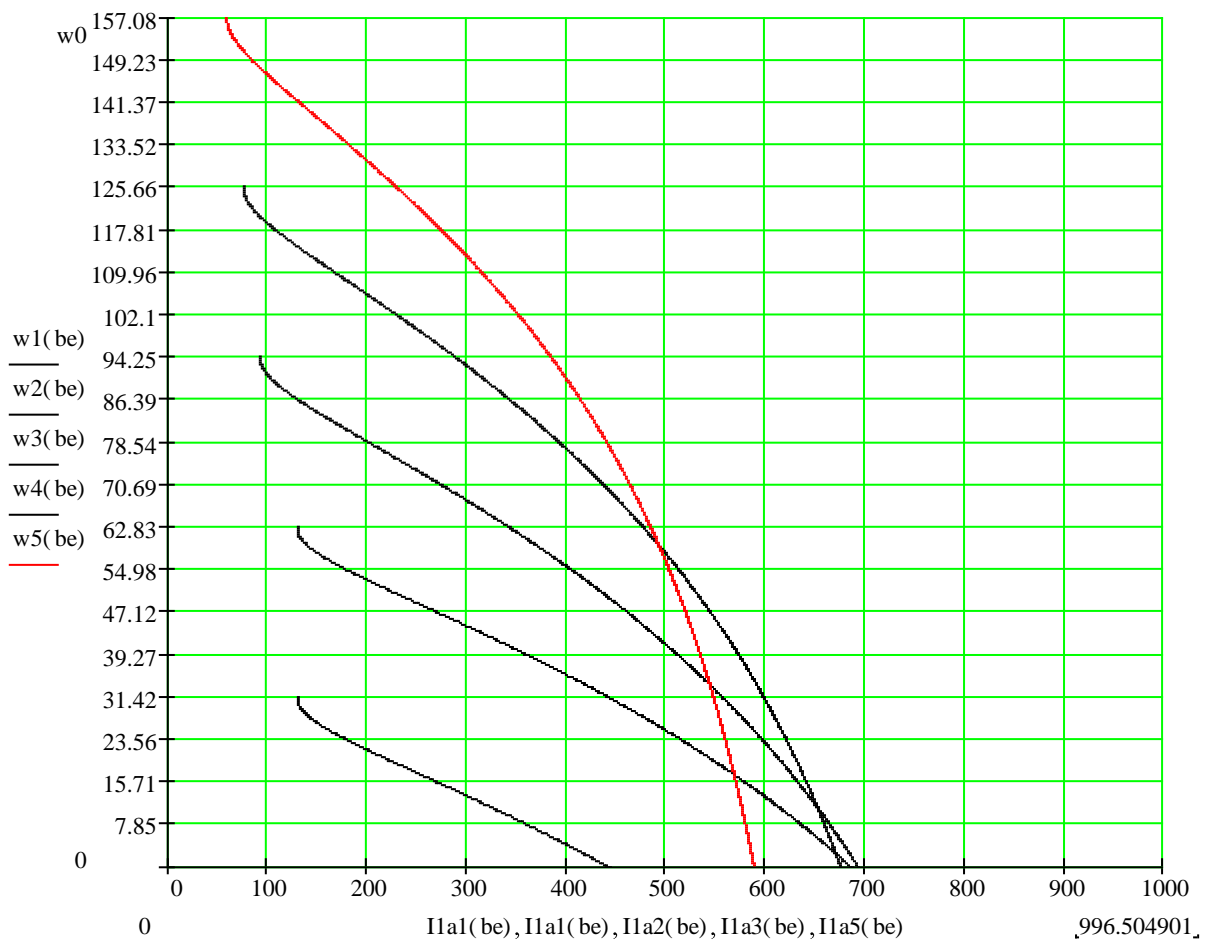


Рисунок 2.5 – Струм статора АД

Струм статора:

$$I_{10\alpha} = I_{\mu 0\alpha} = \frac{U_{н\gamma}}{x_0 \sqrt{d^2 + e^2 \alpha^2}} = \frac{U_{н\gamma}}{\sqrt{r_1^2 + (\mu + x'_2)^2 \alpha^2}}$$

Представимо графіки струму ротора.

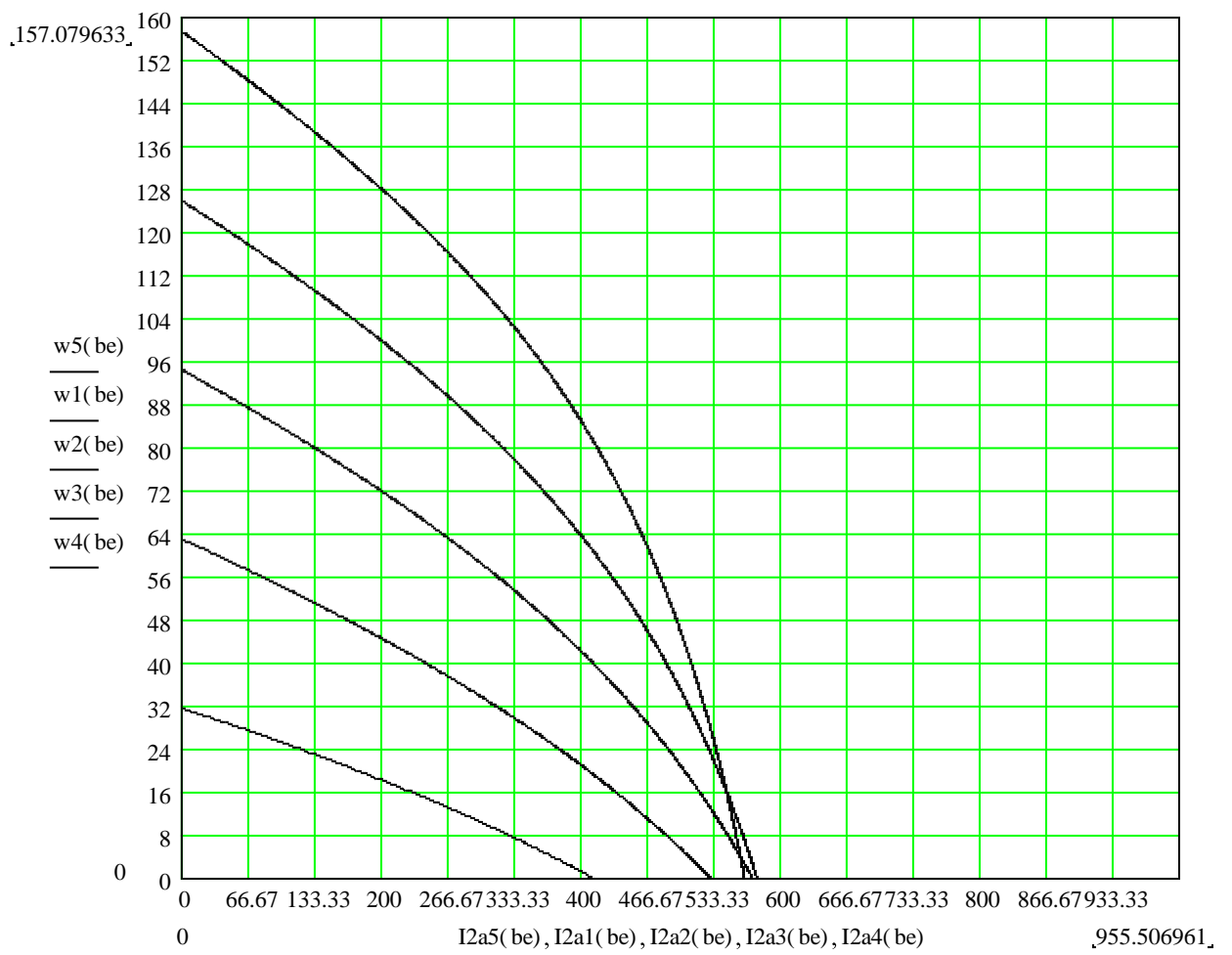


Рисунок 2.6 – Струм ротора АД

Представимо графіки енергетичних характеристик.

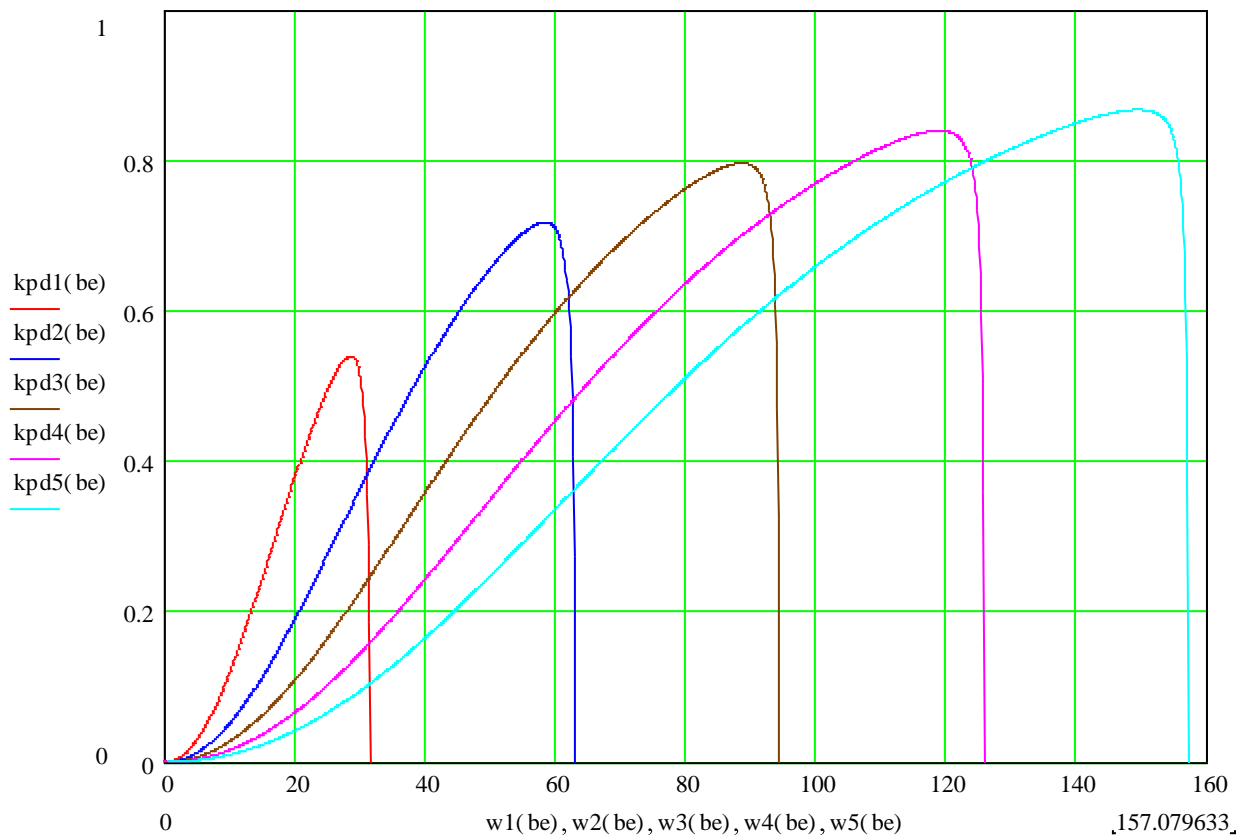


Рисунок 2.7 – Залежність ККД

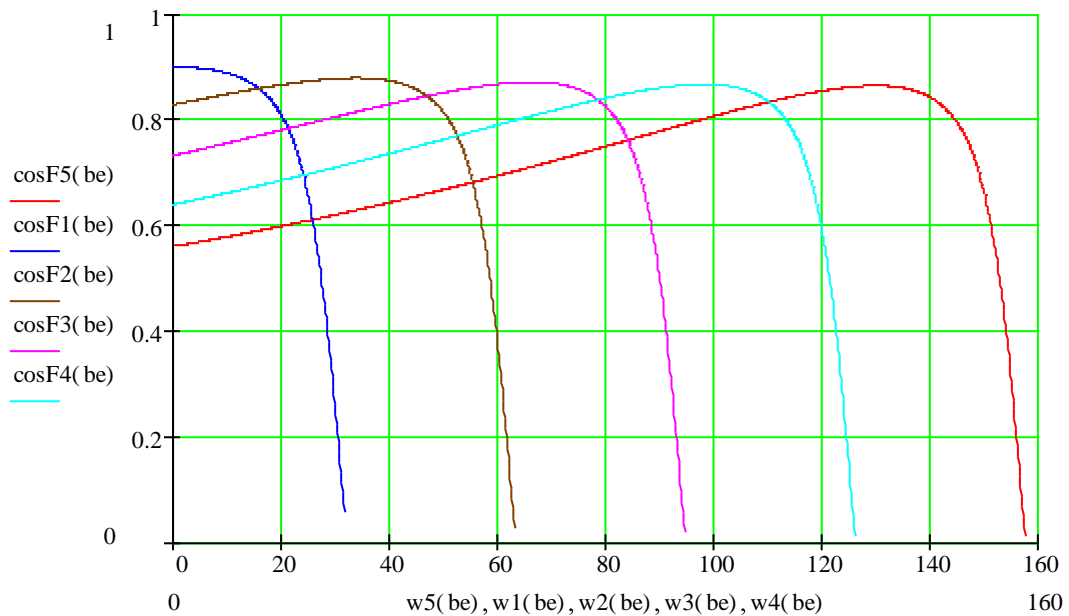


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта потужності

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

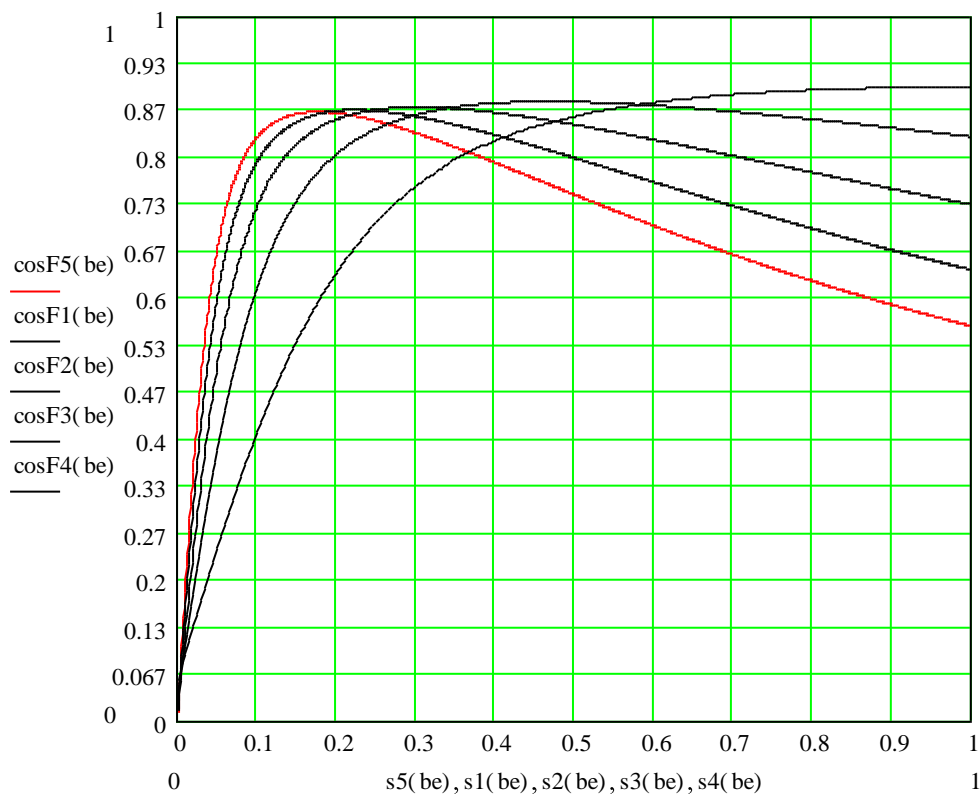


Рисунок 2.9. Залежність коефіцієнта потужності

Розділ 3. Дослідження динамічних режимів роботи тягового електропривода електровоза АРП 14

3.1. Розробка системи вирівнювання навантаження при параметричній несиметрії електродвигунів

Дослідження динамічних режимів роботи електроприводу шахтного акумуляторного електровозу будемо проводити з врахуванням можливості вирівнювання навантаження у тяговій структурі з двухосним виконанням реалізації тягового зусилля.

Реалізація можливості вирівнювання навантаження тягових електричних двигунів можлива при записі рівняння їх складових моментів у відповідній формі [28]:

$$M = 2p [\Psi_C - \Psi_B \underline{I}_A + \Psi_A - \Psi_C \underline{I}_B + \Psi_B - \Psi_A \underline{I}_C] \underline{I} 3\sqrt{3}. \quad (3.1)$$

У наведеному рівнянні вплив несиметричного навантаження буде враховуватись відповідним розподілом потокозчеплення до обмоток ротору електродвигуна.

Струмове навантаження при цьому буде врегульовуватись відповідним зворотнім сигналом від датчиків та використовуватись у подальших розрахунках як сигнал зміни завдання за навантаженням електродвигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02													
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3													
Розробив	Заквренко В.В.												Літ.	Лист	Листів			
Перевірів	Котов І.А.													28	16			
Реценз.													КНУ ЗЕЕМ-21ск					
Н. Контр.	Котов І.А.																	
Затвердив	Пересунько І.І.																	

Наведемо схему автоматичного керування з реалізацією функції вирівнювання навантаження між тяговими електродвигунами електроприводу двухосьового шахтного акумуляторного електровозу.

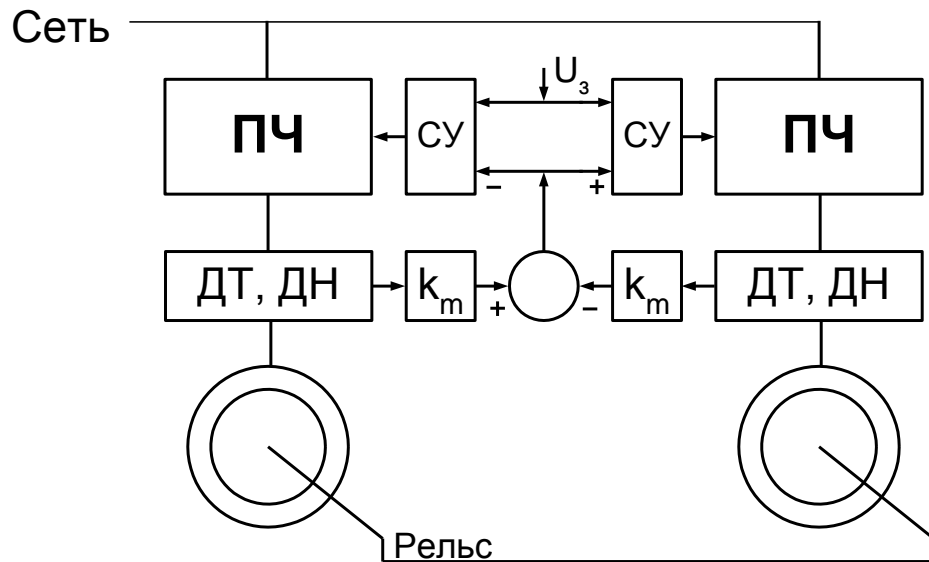


Рисунок 3.1 – Спрощена функціональна схема автоматичного керування

3.2. Розробка математичної моделі тягового електропривода

Представимо структурну схему динамічної моделі тягового електроприводу шахтного акумуляторного електровозу.

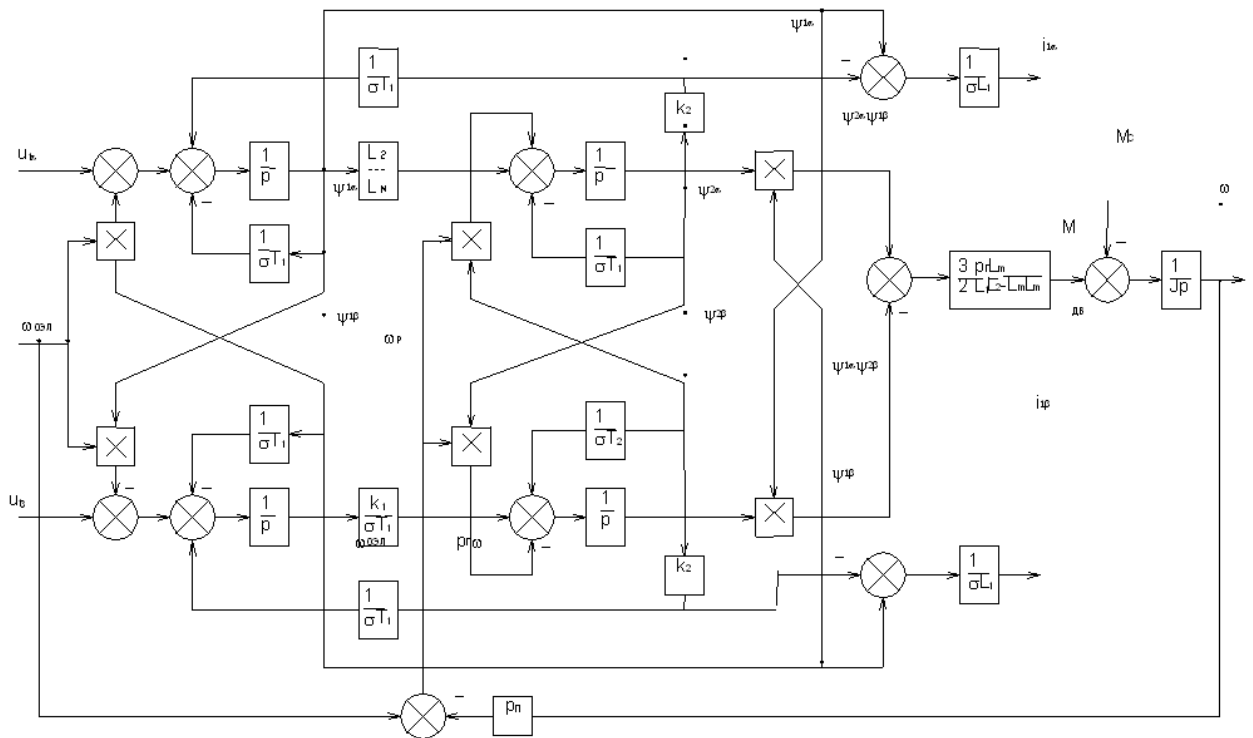


Рисунок 3.2 - Динамічна модель асинхронного двигуна

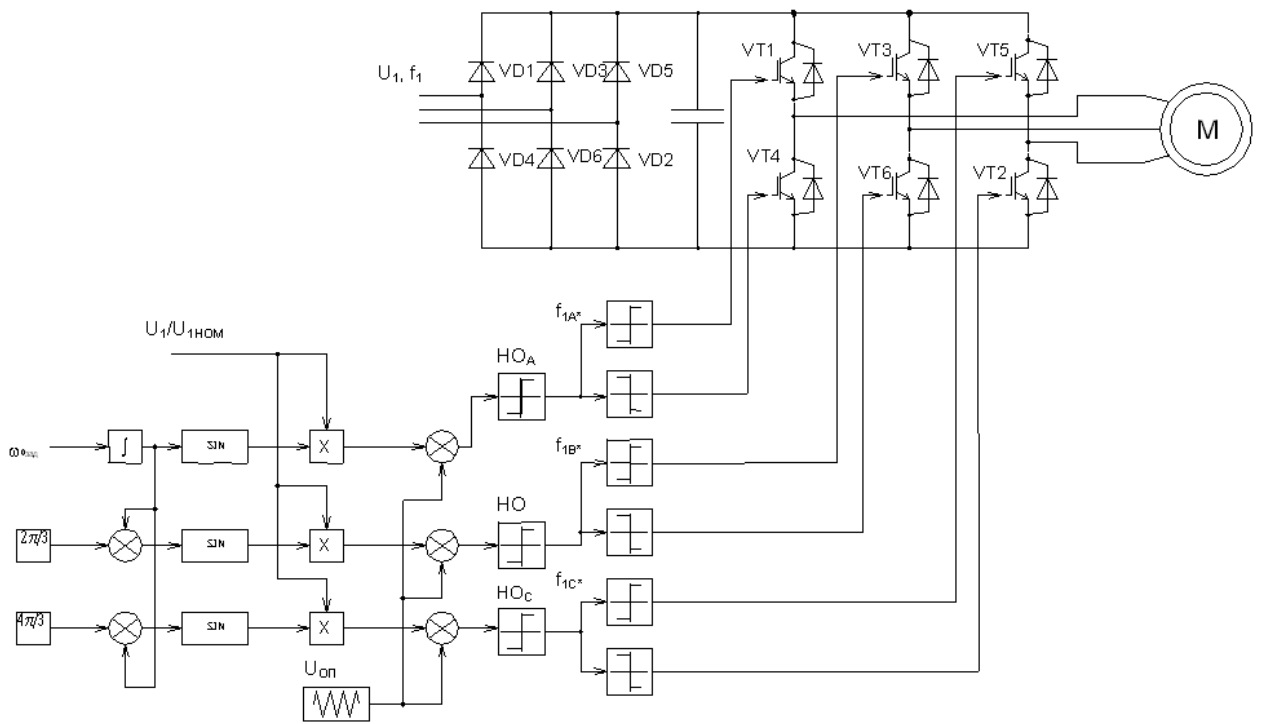


Рисунок 3.3 – Схема перетворювача

3.3. Дослідження динамічних режимів вирівнювання навантаження при параметричній несиметрії електродвигунів

Дослідження динамічних характеристик при реалізації функції вирівнювання навантаження тягового електроприводу шахтного акумуляторного електровозу може бути виконана за двома наведеними схемами.

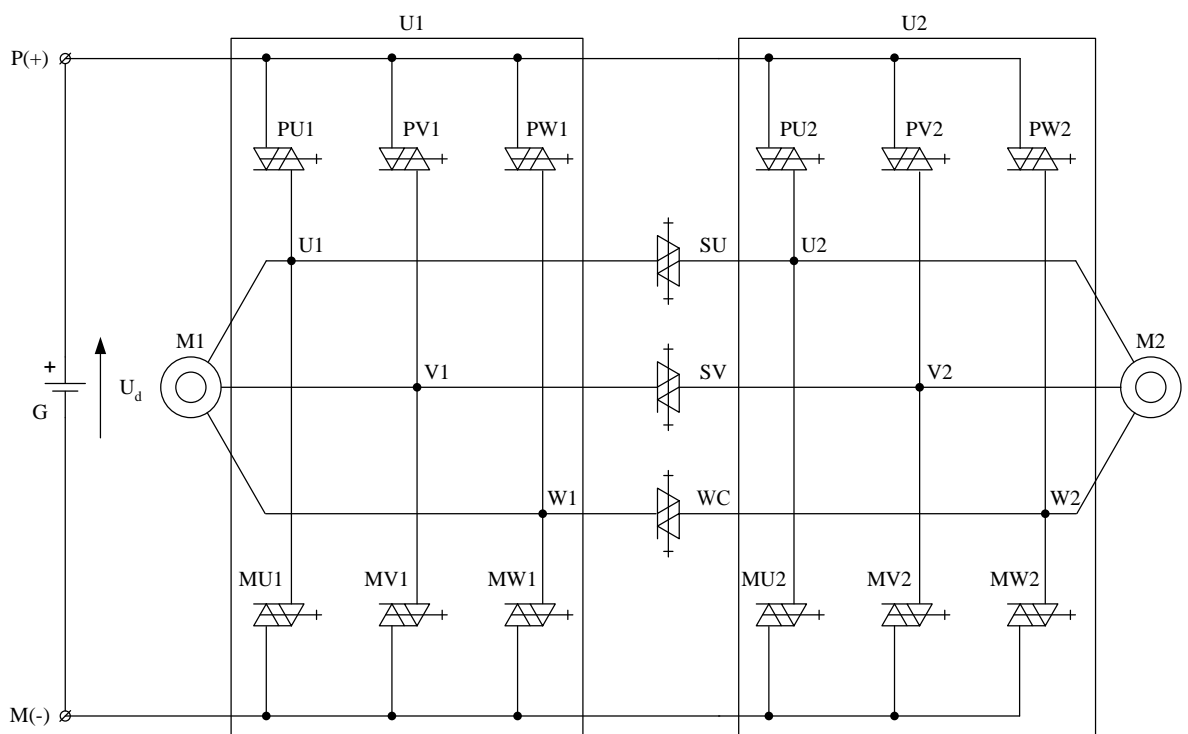


Рисунок 3.4 – Принципова схема моделі силової схеми тягового електропривода змінного струму

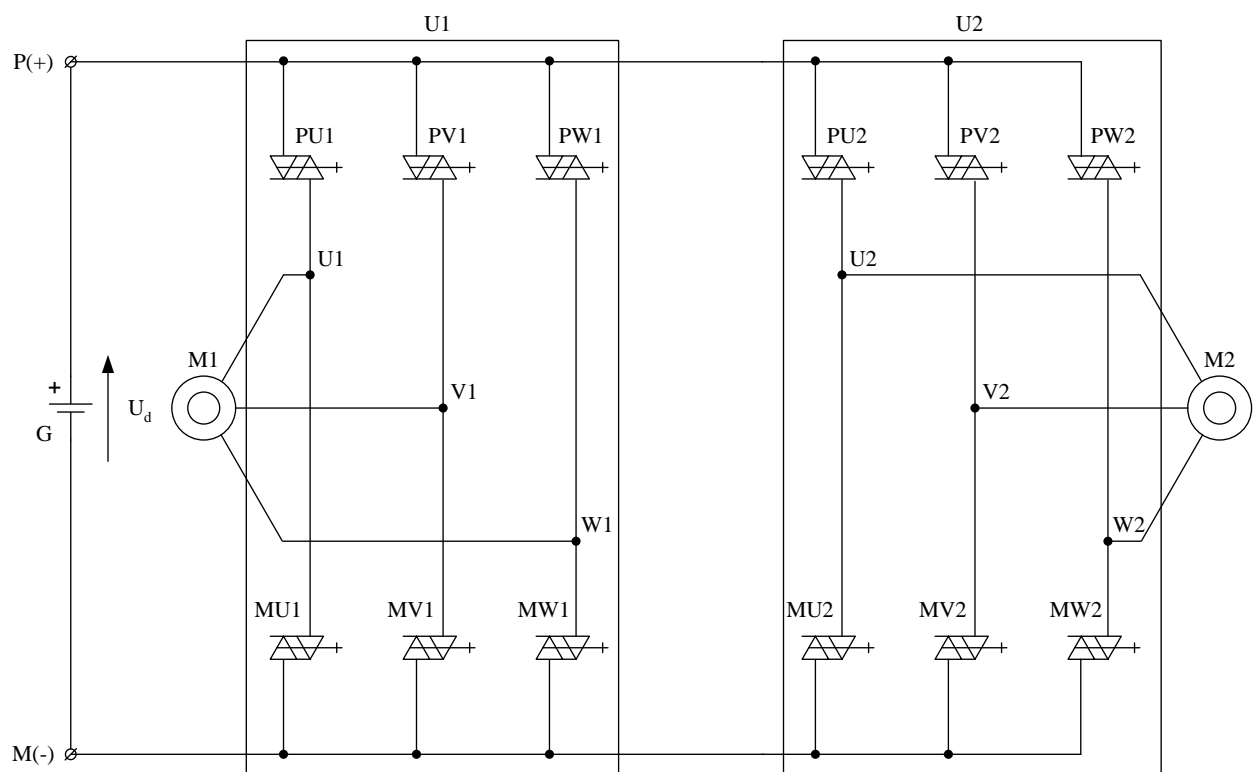


Рисунок 3.5 – Принципова схема моделі силової схеми тягового електропривода змінного струму

Представимо графіки аналізу перехідних процесів у тяговому електроприводі шахтного акумуляторного електровозу.

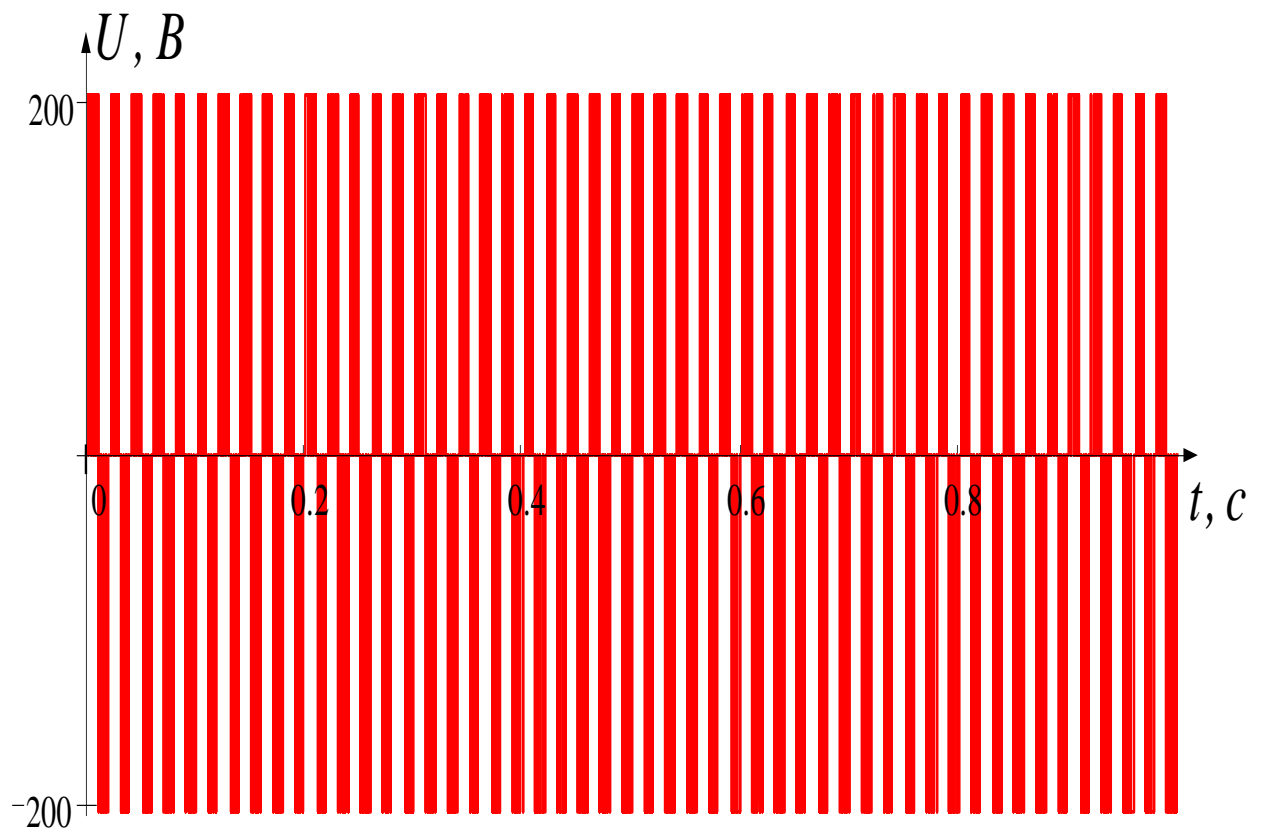


Рисунок 3.6 – Діаграма напруги на статорі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

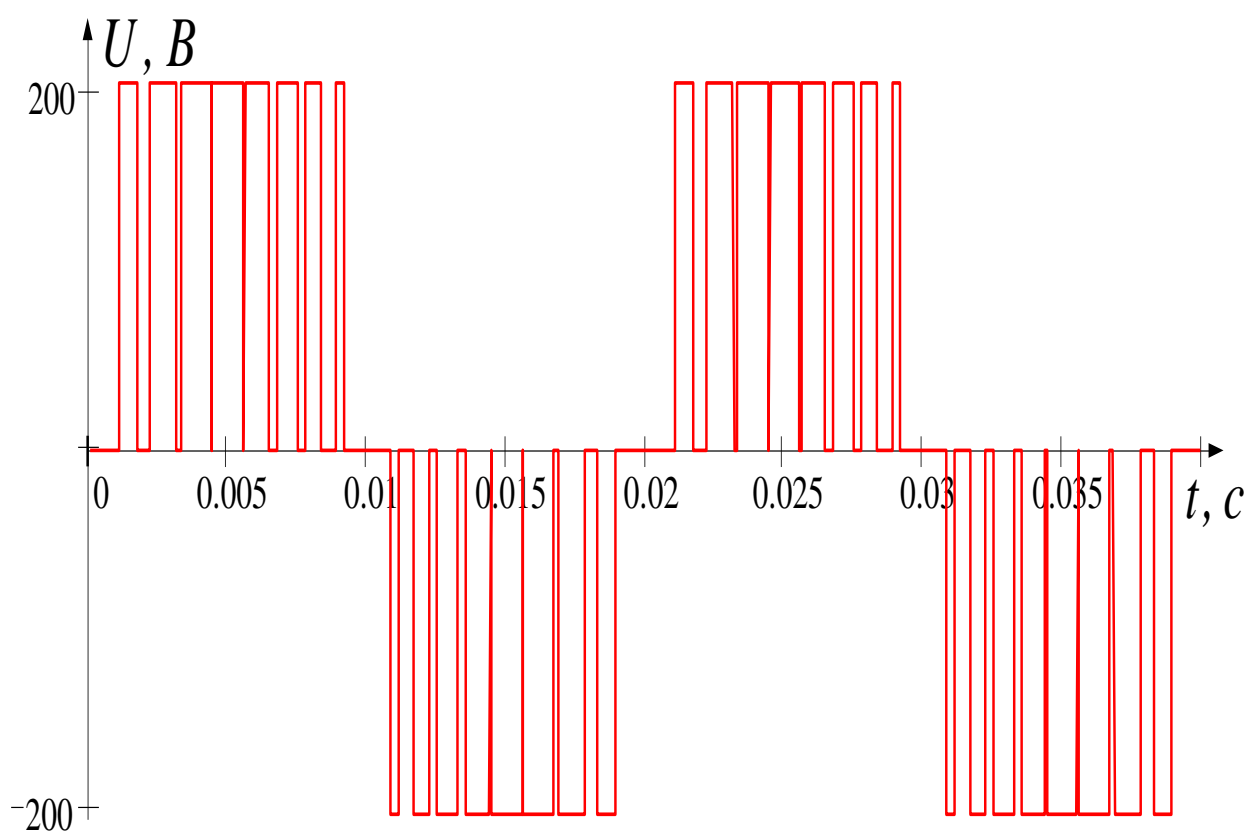


Рисунок 3.7 – Діаграма напруги на статорі АД

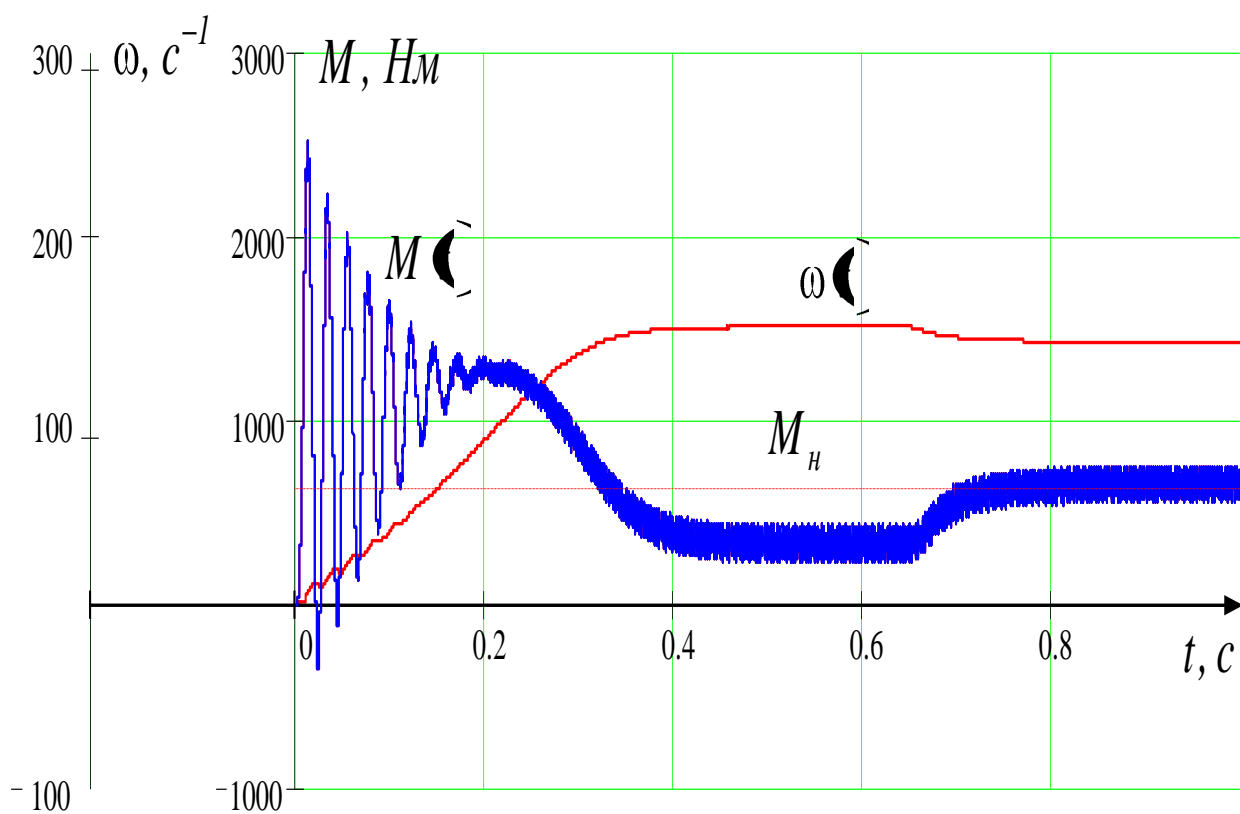


Рисунок 3.8 – Електромагнітний момент і частота обертання при пуску АД

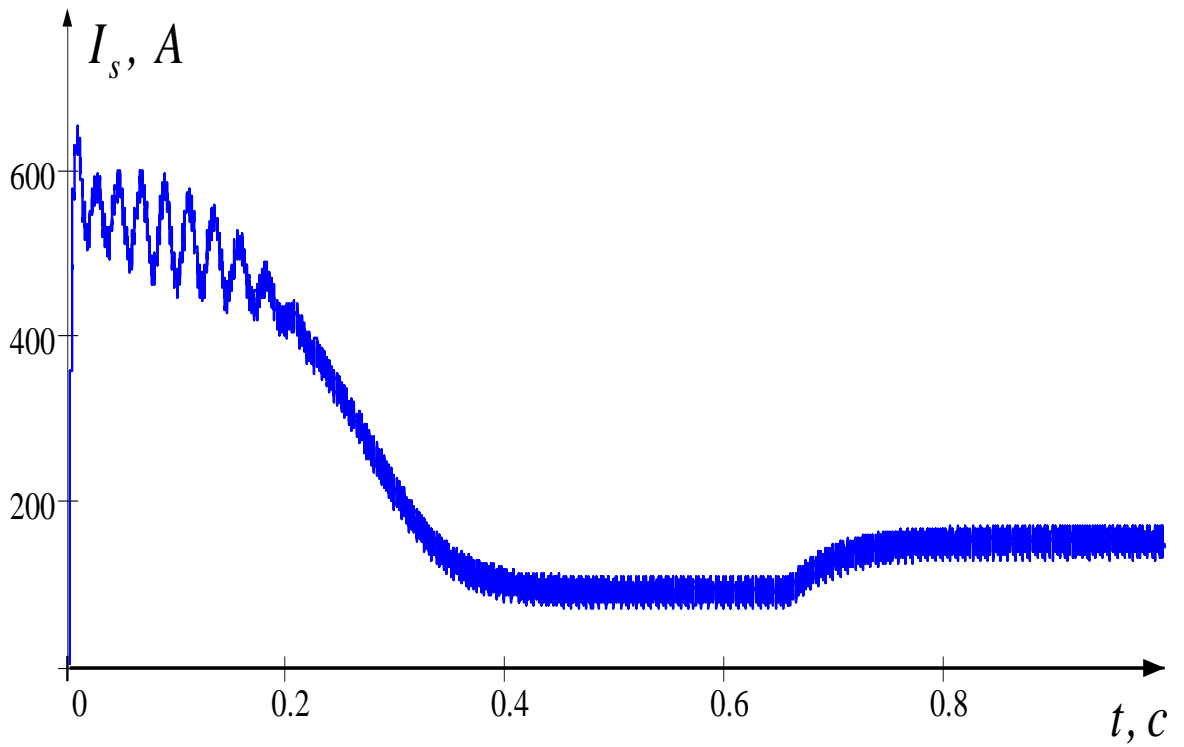


Рисунок 3.9 – Струм статора при пуску АД

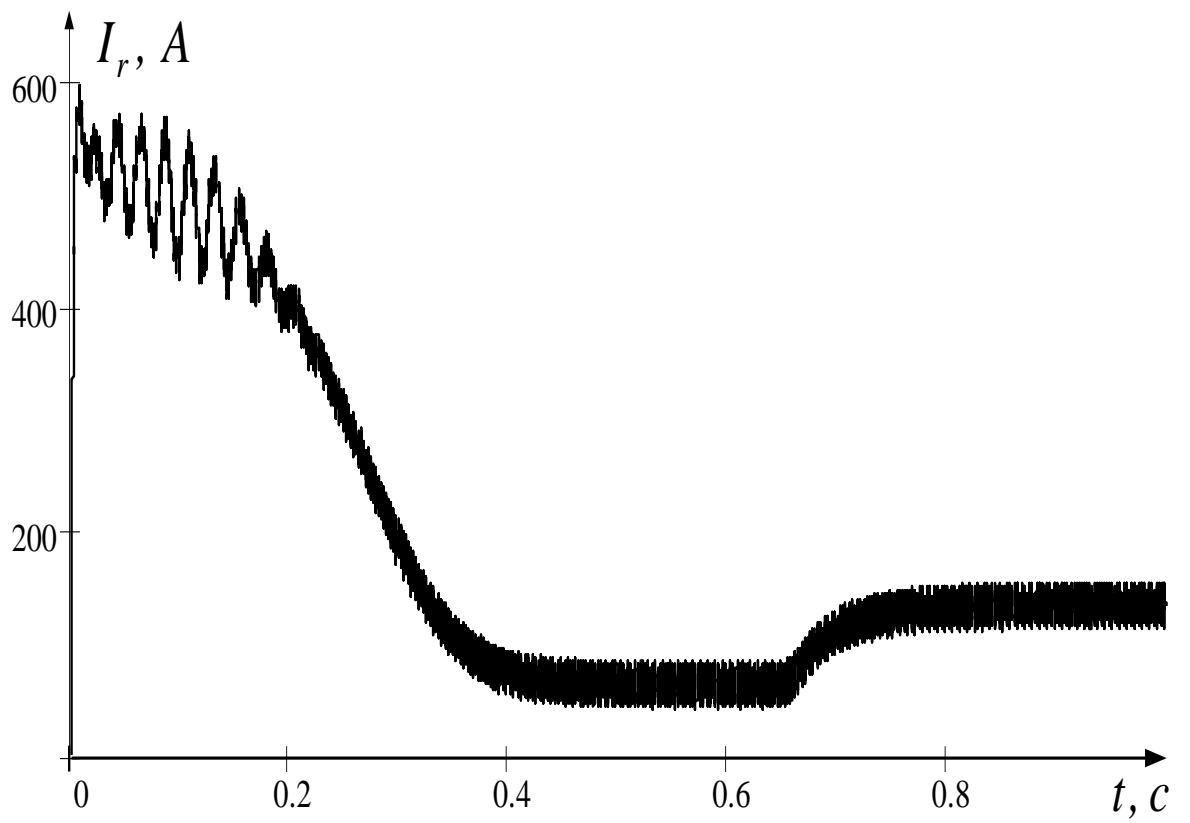


Рисунок 3.10 – Струм ротора при пуску АД

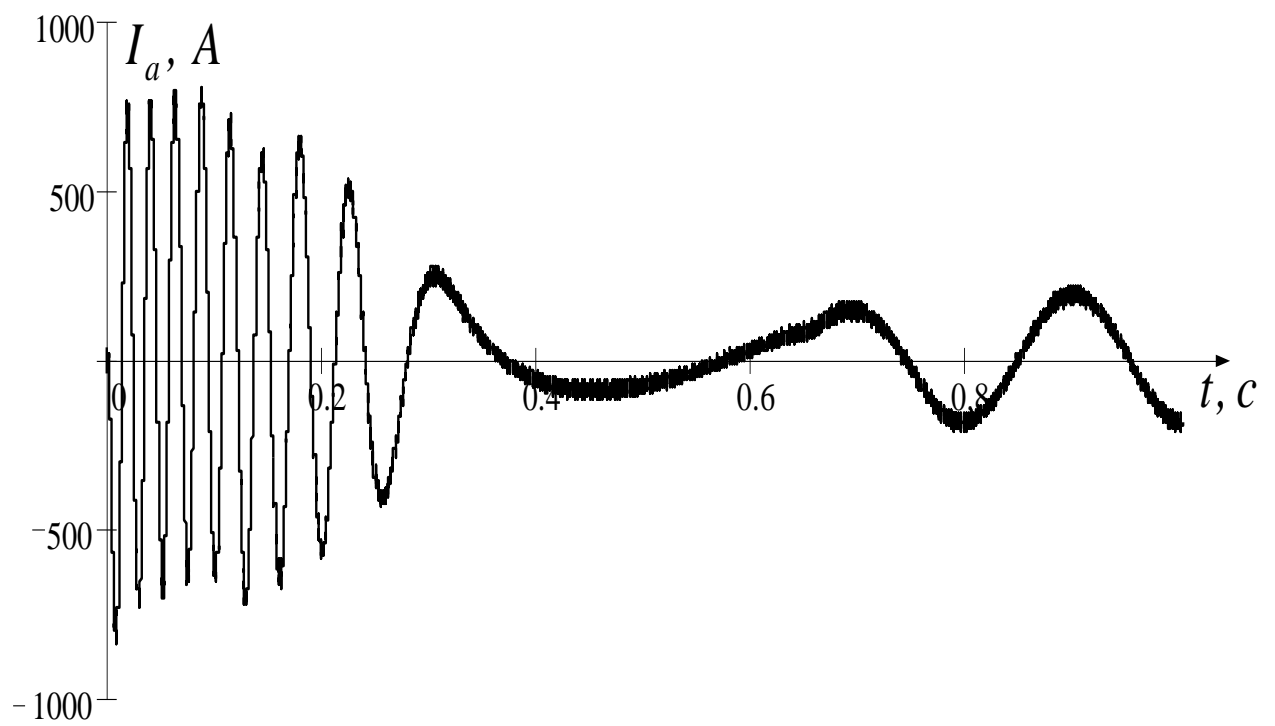


Рисунок 3.11 – Струм фази ротора при пуску АД

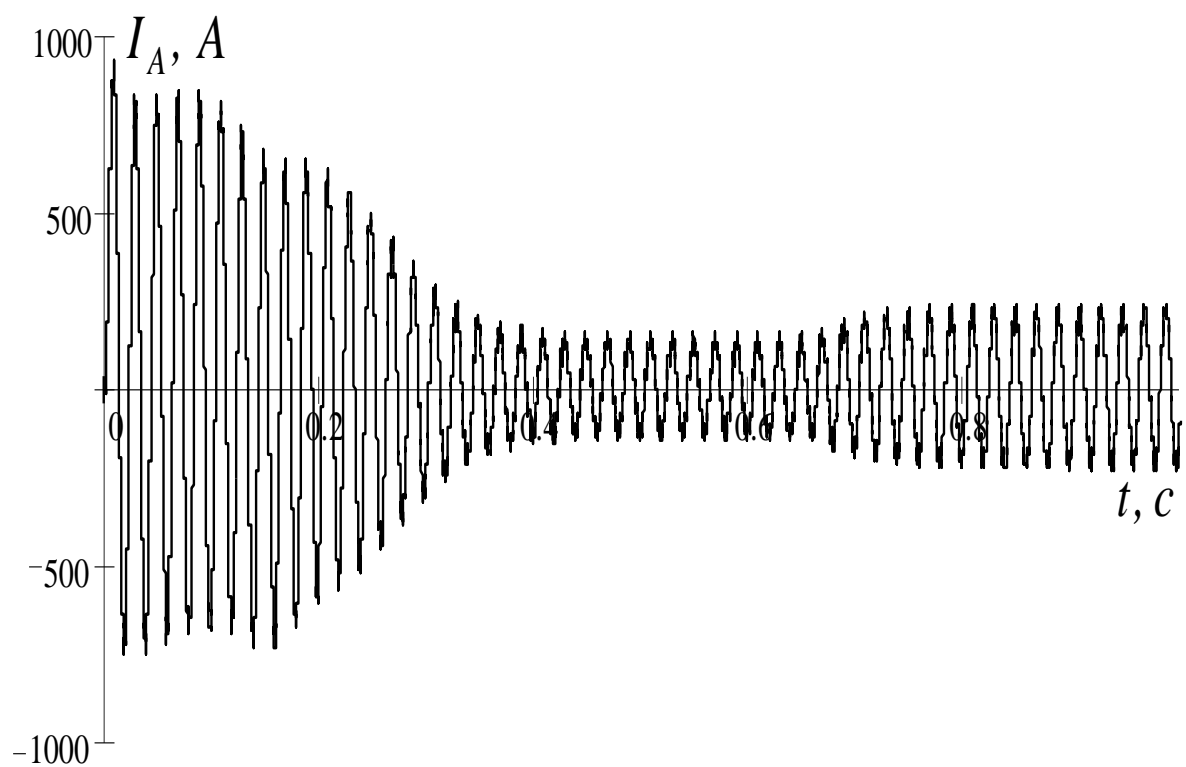


Рисунок 3.12 – Струм фази статора при пуску АД

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

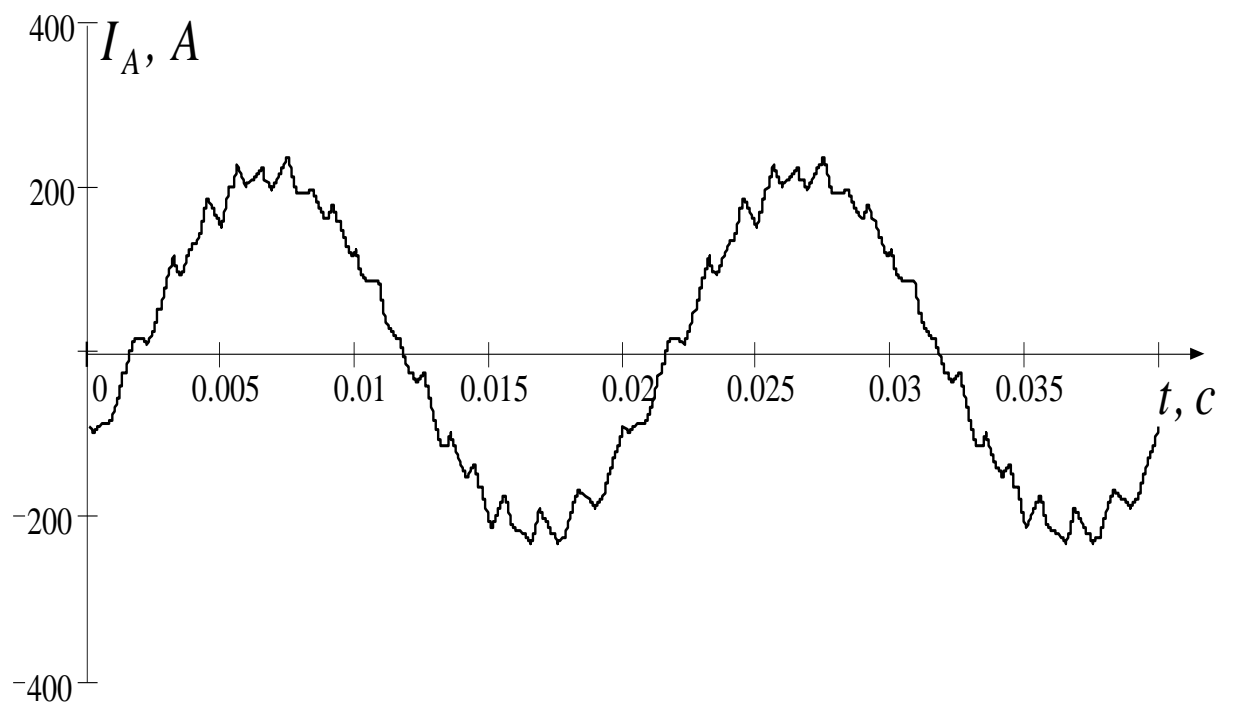


Рисунок 3.13 – Струм фази статора АД

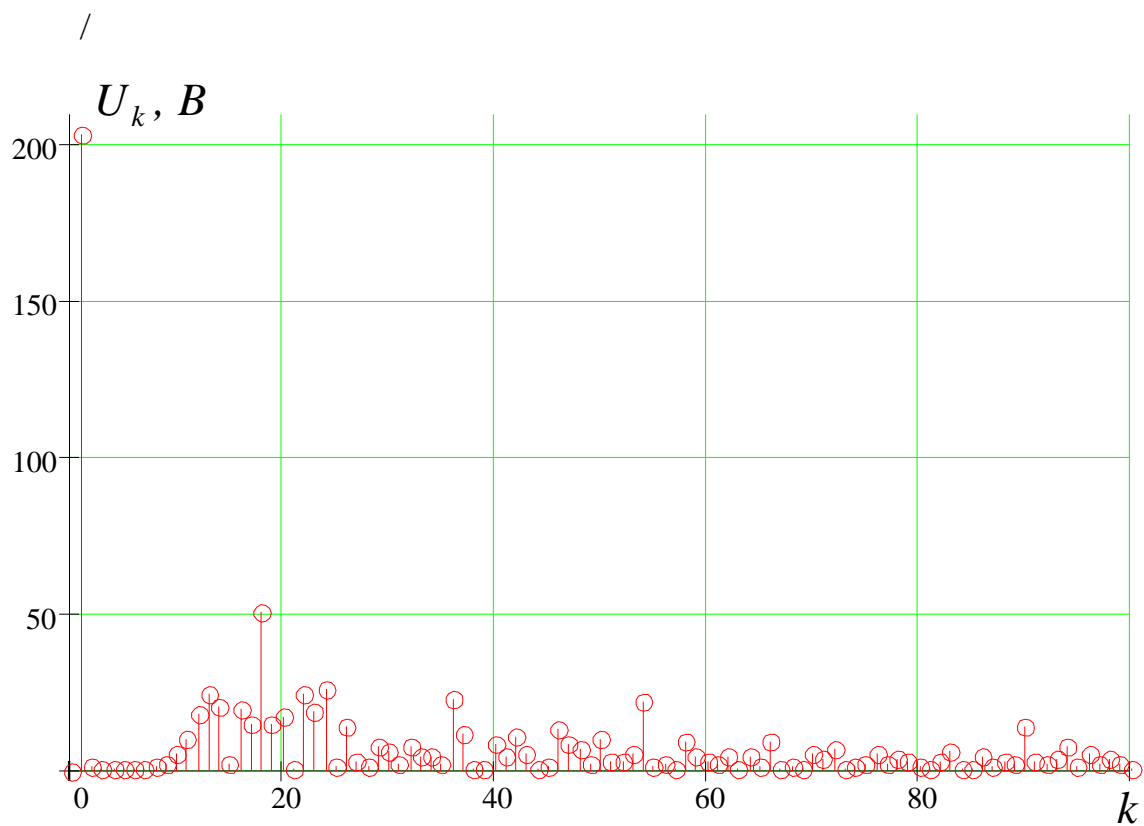


Рисунок 3.14 – Гармонійний состав напруги на статорі АД

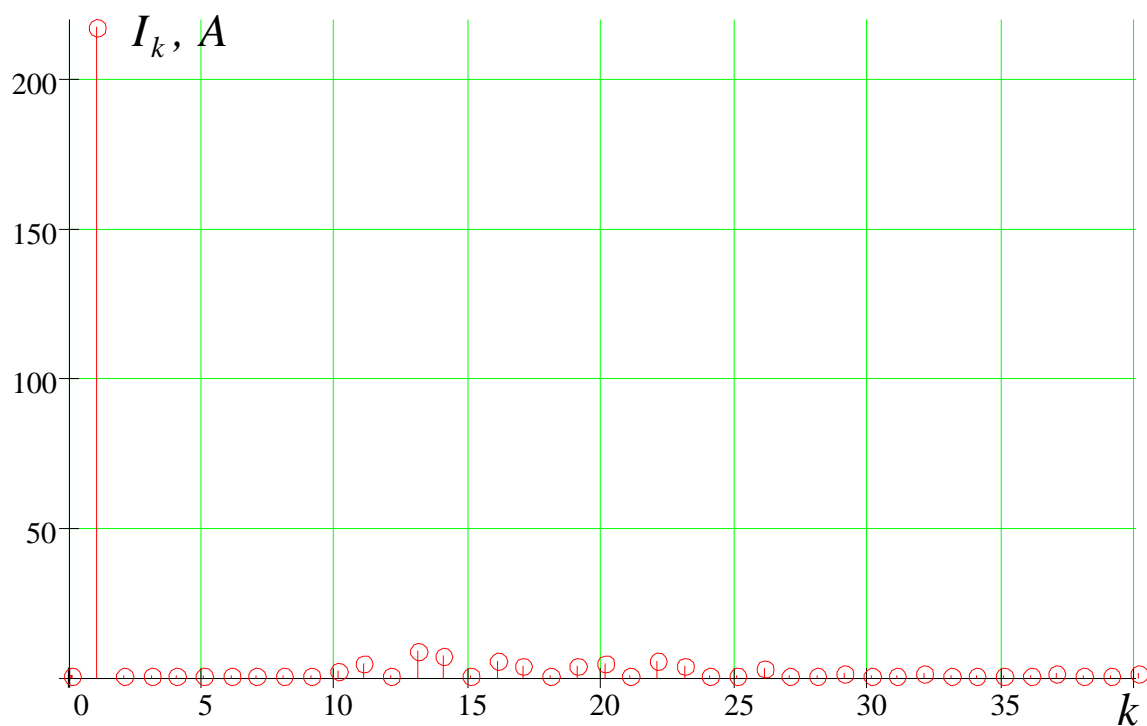


Рисунок 3.15 – Гармонійний состав струму статора АД

Висновки

У роботі досліджено електропривод змінного струму двохосьових видів електровозів.

В першому розділі представлена інформація про електропривод двохосьових видів електровозів, надано загальний вигляд, кінематика, розглянуті вимоги.

На основі аналізу вимог до електропривода двохосьових електровозів обрано систему ПЧ-АД, яка дозволяє забезпечити необхідні режими роботи доменної печі, високий ККД та потрібну жорсткість статичних характеристик.

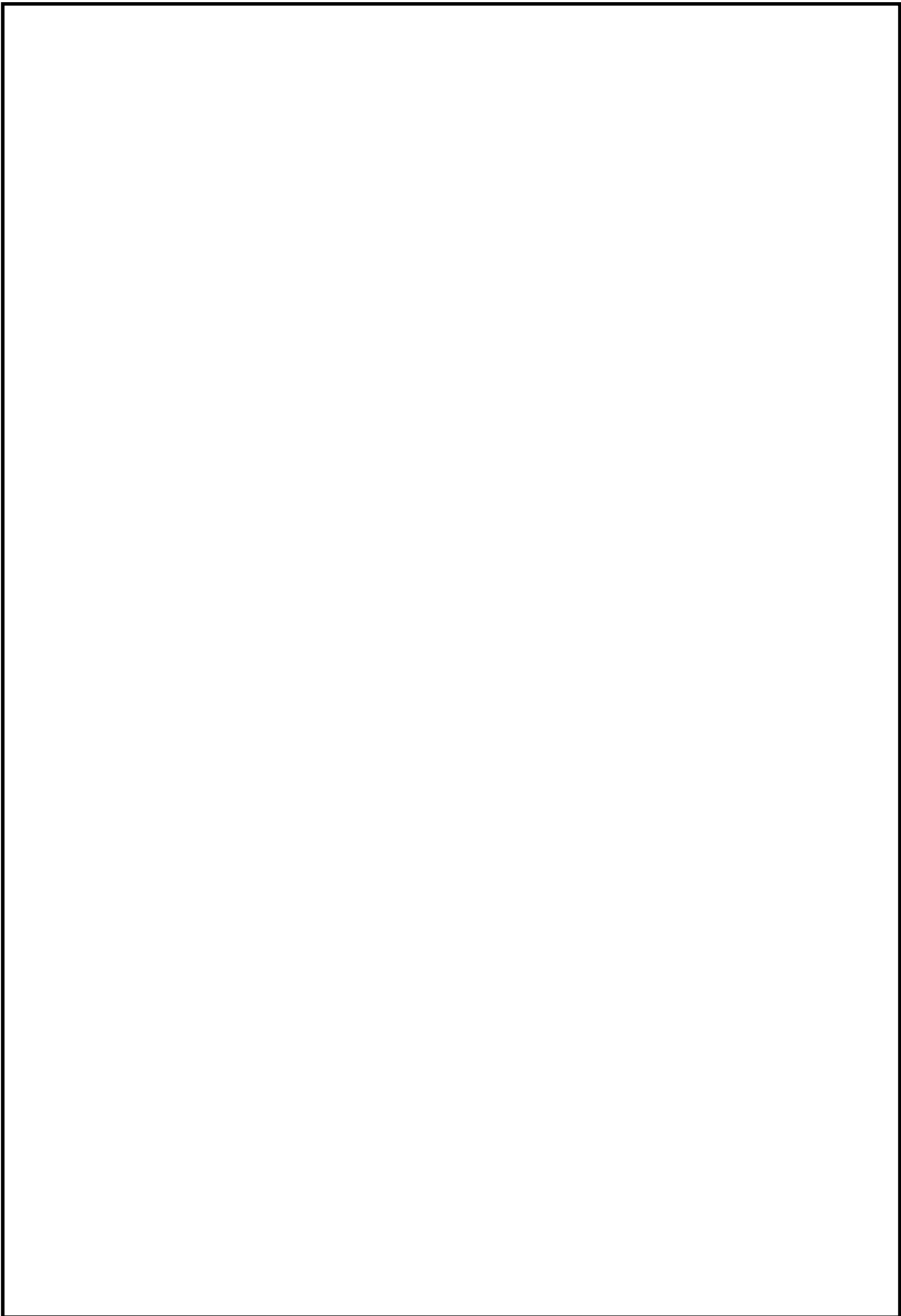
У другому розділі проведено аналіз статичних характеристик ТЕП із твердим зв'язком валів через рейку й нерівномірності навантаження при їхній параметричній несиметрії.

У третьому розділі виконано дослідження на математичних моделях ТЕП при параметричній несиметрії двигунів.

На підставі даних моделювання динамічних режимів нерівномірності навантаження двигунів ТЕП регресійні моделі мають вигляд квадратичного полінома при коефіцієнті детермінації 0,99.

Синтез моделей здійснюється з використанням методу найменших квадратів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.305-02	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		