

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(цифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Роман ДИМИДЮК
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК

Олександр ПАЯНОК
(прізвище та ініціали)

« 19 » листопада 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. кафедри ЕСТЕМ

Сергій КОВА
(прізвище та ініціали)

« 07 » грудня 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри Олександр
« 19 » листопада 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“27” серпня 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Димидюку Роману Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором

керівник роботи Паянок Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” вересня 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 30 листопада 2024р

3. Вихідні дані до роботи: тип електропривода – частотний з векторним керуванням, тип двигуна – АД з ФР, виробничий механізм – конвеєр, тип гальмування – електродинамічне, діапазон регулювання швидкості – 10:1

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз існуючих рішень частотних перетворювачів і електроприводів стабілізації швидкості асинхронних двигунів. 2 Математичний опис системи асинхронного електроприводу на базі АД з ФР. 3 Розробка системи частотно-параметричного управління асинхронним електродвигуном з фазним ротором 4 Економічна частина. 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. 1. Характеристики технологічного механізму. 2. Огляд систем регулювання швидкості АД. 3. Рекомендовані схеми для конвеєрних установок. 4. Математичні моделі АД в різних режимах. 5. Еквівалентна математична модель АД з ФР. 6. Математичний опис електромагнітних процесів в АД за частотно-параметричного управління. 7. розробка системи частотно-параметричного управління асинхронним електродвигуном з фазним ротором. 8. Імітаційна модель частотно-параметричного ЕП. 9. Оцінка показників та характеристик ЕП (2 арк.). 10. Оцінка показників та характеристик частотно-параметричного ЕП (2 арк.). 11. Розробка системи гальмування електропривода із самозбудженням. Економічна частина. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Паянок О.А.	27.08.2024 	19.11.2024
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	27.08.2024 	19.11.2024

7. Дата видачі завдання 27.08.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	27.08.2024	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	26.10.2024	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	02.11.2024	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	09.11.2024	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.11.2024	
6	Попередній захист МКР	19.11.2024	
7	Нормоконтроль МКР	19.11.2024	
8	Рецензування МКР	07.12.2024	
9	Захист МКР	17.12.2024	

Студент

(підпис)

Данилюк Р.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Паянок О.А.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 628.440.22

Димидюк Р.С. Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 121 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 23 назв; рис.: 57; табл. 6.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором. В основній частині роботи виконано огляд основних особливостей сучасних частотних перетворювачів і електроприводів стабілізації швидкості асинхронних двигунів, проведено аналіз сучасних систем електроприводу, рекомендованих для конвеєрних установок. Розроблено систему плавного пуску АД з ФР, що забезпечує сталість пускового моменту і можливість регулювання швидкості в діапазоні до 1:10. 3. Запропоновані математичні моделі пристроїв, що входять до складу електроприводу, описано електромагнітні процеси в каскадній схемі. Запропоновано спосіб електродинамічного гальмування електроприводу з самозбудженням за рахунок віддачі енергії електродвигуна з кола ротора через керований випрямляч в коло статора з додатковим підживленням ланки постійного струму від незалежного джерела енергії. Система гальмування самозбудженням забезпечує зниження споживаної енергії на 33% порівняно з електродинамічним гальмуванням

Графічна частина складається з 15 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун з фазним ротором, перетворювач частоти, система керування, моделювання, математична модель, електродинамічне гальмування.

ABSTRACT

Dymydyuk R.S. Increasing the efficiency of the frequency-parametric control system for an asynchronous motor with a phase rotor. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2024. – 121 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 23 titles; fig.: 57; tabl. 6.

In the master's qualification work, solutions were proposed to increase the efficiency of the frequency-parametric control system of an asynchronous motor with a phase rotor. In the main part of the work, a review of the main features of modern frequency converters and electric drives for stabilizing the speed of asynchronous motors was performed, and an analysis of modern electric drive systems recommended for conveyor installations was conducted. A system for soft starting of an AD with a FR was developed, which ensures the constancy of the starting torque and the possibility of speed regulation in the range of up to 1:10. 3. Mathematical models of devices included in the electric drive were proposed, electromagnetic processes in a cascade circuit were described. A method of electrodynamic braking of an electric drive with self-excitation was proposed due to the return of energy of the electric motor from the rotor circuit through a controlled rectifier to the stator circuit with additional feeding of the DC link from an independent energy source. The self-excitation braking system provides a 33% reduction in energy consumption compared to electrodynamic braking

The graphic part consists of 15 posters with the results of the work.

The occupational health and safety section defines the main provisions for the safe operation of the studied electrical complex under the influence of harmful environmental factors.

Keywords: electric drive, asynchronous motor with a phase rotor, frequency converter, control system, modeling, mathematical model, electrodynamic braking.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....	9
1.1 Сучасні системи електроприводу, рекомендовані для конвеєрних установок	9
1.2 Частотно-регульований електропривод стрічкових конвеєрів.....	15
1.3 Огляд систем регулювання швидкості асинхронного двигуна у каскадних схемах.....	18
1.4 Характеристики виробничого механізму	27
1.5 Висновок.....	29
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ АД з ФР	30
2.1 Математичний опис асинхронного двигуна з фазним ротором.....	30
2.2 Еквівалентна математична модель машини подвійного живлення.....	37
2.3 Оцінка відповідності отриманих математичних моделей.....	38
2.4 Математичний опис електромагнітних процесів в асинхронному електродвигуні за частотно-параметричного управління.....	41
2.5 Висновок.....	43
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ З ФАЗНИМ РОТОРОМ	44
3.1 Електропривод з частотно-параметричним регулятором в колі ротора АД з ФР.....	44
3.2 Імітаційна модель частотно-параметричного електроприводу та динамічні характеристики електропривода.....	48
3.3 Розробка системи гальмування електропривода із самозбудженням....	62
3.4 Висновки.....	70

	4
7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	71
8 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	82
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	97
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	102

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний промисловий комплекс вимагає для своєї роботи все більшої кількості регульованих електроприводів, які в основному виконані на базі асинхронного електродвигуна (АД), що характеризується простотою конструкції, надійністю, меншою вартістю.

Промисловий комплекс для автоматизації технологічних процесів використовує велику кількість конвеєрних механізмів безперервної дії. Вони характеризуються важкими (пуск, гальмування) та тривалими режимами роботи, тому для них важлива надійність та простота обслуговування. АД з ФР мають великий пусковий момент [1, 2-3].

Системи керування електродвигуном із фазним ротором, як правило, будуються на параметричних елементах, включених у роторний ланцюг. Вони можуть бути не регульованими, наприклад, що забезпечують пуск за допомогою індукційного опору або регульованими, що забезпечують реостатний релейно-контакторний пуск, імпульсне регулювання швидкості за допомогою напівпровідникових елементів. Незважаючи на те що, дані системи управління забезпечують необхідні пускові характеристики електродвигуна, обмежуючи пусковий струм і забезпечуючи необхідне значення прискорення, вони мають наступні недоліки: значні втрати енергії в процесі пуску на реостатах, можливість міжвиткового короткого замикання в роторному ланцюгу внаслідок перенапруження, що виникло там для імпульсних систем регулювання), низький коефіцієнт потужності

Кращі у плані енергоефективності каскадні системи електроприводу, такі як асинхронно-вентильний каскад та його варіанти, складні у плані запуску, тому що вимагають додаткового пускового пристрою, мають неглибокий діапазон регулювання швидкості [1, 2-3].

Внаслідок вищевикладеного, при модернізації систем електроприводу конвеєрних механізмів використовують систему «перетворювач частоти - асинхронний електродвигун». Для зменшення вартості модернізації

використовують наявний АДФР, ротор якого закорочують, а ланцюг статора включають дволанковий перетворювач частоти, здатний забезпечити оптимальне управління двигуном. Однак у даній системі електроприводу напруга на виході перетворювача частоти має несинусоїдальну форму і призводить до виникнення вищих гармонік струму, на які асинхронний двигун із фазним ротором не розрахований, що знижує термін його служби.

Внаслідок вище викладеного залишається актуальною задача вдосконалення систем регульованого електроприводу на базі електродвигуна з фазним ротором у напрямку створення гібридних систем з частотним перетворювачем у колі ротора та параметричним індукційним пристроєм із частотно-залежним опором.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії, які протікають в електроприводі, виконаному на базі асинхронного електродвигуна з фазним ротором для конвеєрних механізмів безперервної дії.

Предметом дослідження є математичні моделі та структури, які втілюють створення системи частотно-параметричного управління асинхронним електродвигуном з фазним ротором, що забезпечує регулювання швидкості і стабілізацію пускового моменту за допомогою перетворювача частоти, включеного в коло ротора, до виходу інвертора напруги якого підключено частотно регульований індукційний опір, і реалізацію за допомогою цього перетворювача частоти економічного режиму.

Метою є підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором з включеними в коло ротора блоків частотно-параметричного керування гальмування з самозбудженням.

У процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі **завдання**:

- розробити систему плавного пуску асинхронного електродвигуна з фазним ротором, що забезпечує регулювання швидкості в заданому діапазоні;

- розробити математичні моделі пристроїв, що входять до складу системи електроприводу за допомогою програмного пакету MatLab Simulink;
- запропонувати систему гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором шляхом самозбудження;
- запропонувати рішення дволанкового перетворювача частоти, що складається з некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги, що дозволяє працювати при змінюваному напрузі на вході інвертора і має широкий діапазон регулювання вихідної частоти.
- техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електроприводу та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень;
- визначити основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів оточуючого середовища.

Методи дослідження засновані на використанні методів та теорії побудови багатоконтурних систем керування електроприводом, електричних машин, електроприводу, автоматичного керування. Дослідження виконувались за допомогою комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MatLAB/Simulink, з використанням чисельних методів вирішення та постановкою дослідів для оцінки адекватності комп'ютерної моделі.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. запропонований спосіб управління асинхронним двигуном з фазним ротором, обмотки ротора якого з'єднані з перетворювачем частоти, до виходу інвертора напруги якого підключено частотно-регульований індукційний опір, що відрізняється можливістю плавного регулювання пускового моменту і швидкості за рахунок регулювання частоти комутації ключових елементів.
2. розроблена енергозберігаюча система електродинамічного гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором із самозбудженням та додатковим підживленням ланки постійного струму.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

- забезпечення стабілізації та регулювання пускового моменту електродвигуна та регулювання швидкості електродвигуна в діапазоні 1:10;
- система електродинамічного гальмування самозбудженням забезпечує зниження споживаної енергії на 33% порівняно з використанням електродинамічних гальм.

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2024).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором / О.А. Паянок, Р.С. Димидюк – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024. – 3 с.

1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

1.1 Сучасні системи електроприводу, рекомендовані для конвеєрних установок

При виборі та обґрунтуванні системи електроприводу для конвеєрних установок слід врахувати, що найчастіше використовуються електроприводи змінного струму на основі асинхронних двигунів. Для коротких конвеєрів з низькою продуктивністю зазвичай застосовують асинхронні двигуни з глибокопазним короткозамкненим ротором або з ротором типу подвійної білячої клітини, які забезпечують високий пусковий момент. Максимальна потужність таких електроприводів зазвичай не перевищує 100-200 кВт, оскільки падіння напруги в мережі може значно знизити пусковий момент, що ускладнює запуск конвеєра, що працює під навантаженням [2].

Для конвеєрів з великою довжиною та продуктивністю зазвичай використовують електроприводи на основі асинхронних двигунів з фазним ротором, які дозволяють обмежити пускові струми та прискорення. Для зменшення динамічних навантажень застосовують попередні пускові ступені, які допомагають правильно налаштувати зазори в передачах і створити початковий натяг стрічки. Крім того, використовують велику кількість пускових ступенів, щоб знизити миттєві збільшення моменту двигуна під час перемикання пускових резисторів. Це зменшує виникнення пружних коливань в тяговому органі і запобігає його прослизанню за цимбалами.

Оскільки для регулювання швидкості стрічки конвеєрних установок та обмеження динамічних навантажень необхідно мати діапазон регулювання швидкості не менше 10:1, двотрансформаторні перетворювачі частоти не підходять для таких приводів. Підвищуючий трансформатор, навіть при

діапазоні регулювання 1,5:1, входить у режим насичення, що призводить до значного збільшення втрат потужності.

Низьковольтні перетворювачі частоти з напругою до 1 кВ та високовольтні з напругою до 10 кВ виготовляються з інверторами напруги на основі IGBT-транзисторів і зазвичай оснащуються ПД-регулятором. Високовольтні перетворювачі частоти з напругою від 3,0 (3,3) до 10 (10,5) кВ, як правило, оснащуються інверторами струму.

1.1.1 Нерегульований електропривод за схемою ППП

Сучасні пристрої плавного пуску (ППП) набувають все більшої популярності, при цьому в деяких їх модифікаціях реалізовано також функції гальмування. Використання ППП дозволяє забезпечити плавний пуск асинхронного двигуна з обмеженням пускового струму та кутового прискорення, а також захищає виконавчий механізм від механічних ударів. Крім того, такі пристрої дозволяють регулювати час розгону і гальмування. Пристрої плавного пуску (софтстартери) широко застосовуються в таких сферах, як насосні установки, вентилятори, компресори, конвеєри, а також у важко навантажених і інерційних механізмах.

Пристрій плавного пуску являє собою напівпровідниковий регулятор напруги, який підключається до затисків статора двигуна. Зміна напруги досягається шляхом регулювання кута відмикання тиристорів, що включені в схему зустрічно-паралельного з'єднання для кожної фази обмотки статора двигуна. Функціональна схема пристрою плавного пуску зображена на рисунку 1.1.

На рисунку 1.1 приведені такі позначення: ТК – тиристорний комутатор; АД – асинхронний електродвигун; СК – система керування; СІФК – система імпульсно-фазового керування; МК – мікроконтролер; ПВВ – пристрій введення/виведення; ПУ – панель управління; ІП – джерело живлення; СС1, СС2, СС3 – сенсори струму, призначені для контролю, регулювання пускового струму і захисту від струмів перевантаження та КЗ;

CH1, CH2 – сенсори напруги використовуються для захисту асинхронного двигуна від неприпустимого перевищення або зниження напруги. Вони також виконують функцію регулювання напруги на затискачах статора двигуна, забезпечуючи його нормальну роботу та захищаючи від потенційних пошкоджень, що можуть виникнути через нестабільність напруги в електричній мережі [2].

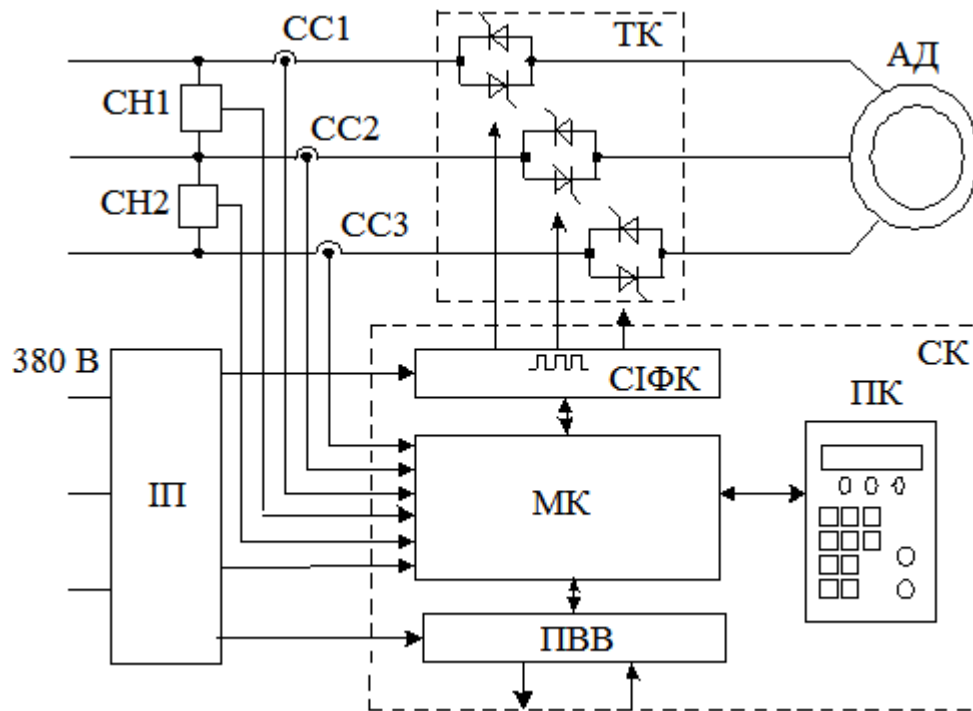


Рисунок 1.1 – Функціональна схема пристрою плавного пуску

Мікроконтролер є основним пристроєм ППП, він керує включенням тиристорів, роботою вбудованих в ППП реле, виконує функції програмного захисту і контролю як самого ППП, так і двигуна.

Блок СІФК подає на тиристори імпульси відкриття, які зміщені на змінний кут відносно моменту природної комутації. Замикання тиристорів відбувається природним способом, тобто при зміні полярності синусоїдальної напруги на його затискачах анод-катод.

Пристрій плавного пуску здійснює пуск електродвигуна плавним наростанням напруги на статорі при одночасному регулюванні струму або моменту. В ППП можуть бути реалізовані наступні засоби

управління: напругою на затискачах статора, струмом двигуна, моментом двигуна.

Управління напругою забезпечує плавний пуск двигуна, однак не здійснюється контроль за струмом і моментом двигуна під час пуску. Оскільки відсутній зворотний зв'язок по струму та контроль за моментом, під час пуску можуть виникати різкі стрибки струму. Такий спосіб управління не підходить для електроприводів, що мають важкий пуск.

1.1.2 Низьковольтний асинхронний частотно-регульований електропривод

На рисунку 1.2 приведена типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу з автономним інвертором напруги на базі IGBT-транзисторів.

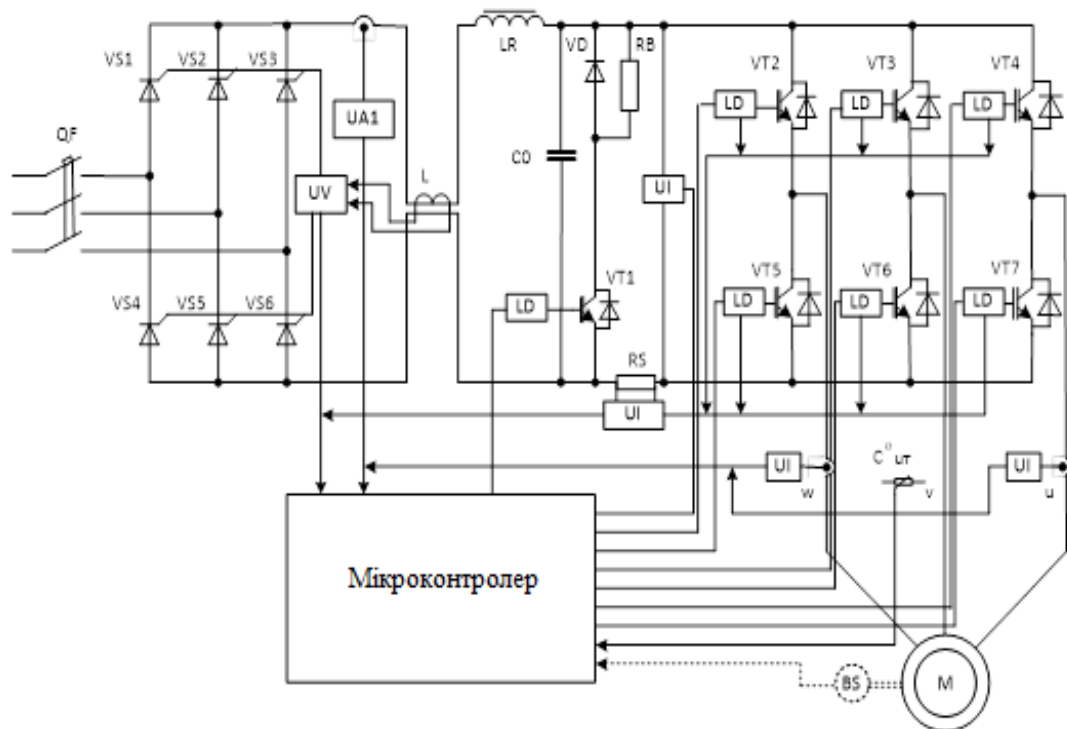


Рисунок 1.2 – Типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого електроприводу з автономним інвертором напруги

Перетворювачі частоти, які побудовані на основі напівпровідникової силової електроніки, використовують інтелектуальні силові модулі (IGBT-модулі). Ці модулі являють собою конструктивно єдину одиницю, яка включає силові ключі та драйвери для їхнього управління. Також в їхньому складі є вбудовані елементи захисту та інтерфейси для з'єднання з мікроконтролерними системами керування.

Мікроконтролер здійснює функції управління, захисту і контролю. Система управління реалізує наступні основні функції:

- Повне цифрове управління всіма елементами перетворювача, включаючи управління силовими ключами за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).
- Створення моделі двигуна для більш точного керування.
- Програмне регулювання швидкості (частоти) або визначення технологічних змінних залежно від часу (наприклад, цикли по годинах, днях, тижнях).
- Керування вхідним тиристорним перетворювачем для поступового заряджання конденсаторної батареї C_0 в ланці постійного струму.
- Управління енергозбираючим ланцюгом для розсіювання енергії гальмування через баластний резистор R_B .
- Непряме визначення додаткових параметрів через цифрові спостерігачі, таких як споживана потужність, витрати електроенергії, а також параметри технологічних процесів (наприклад, витрата води, повітря тощо).
- Введення різноманітних додаткових параметрів технологічного процесу з інтелектуальних сенсорів, включаючи віддалені сенсори тиску і температури.

Мікропроцесор реалізує захист і контроль через наступні основні функції:

- керує вбудованим захистом від коротких замикань та відсутності напруги живлення для драйверів;
- контролює струми витоку та перенапруги в ланці постійного струму;

- відслідковує перегрів автономного інвертора та двигуна;
- керує захистом від обриву та перекосу фаз;
- забезпечує максимально-струмовий та часострумовий захист.

1.1.3 Високовольтний частотно-регульований електропривод

Високовольтний перетворювач частоти з інвертором напруги на основі IGBT-транзисторів складається з багатофазного вхідного трансформатора, силових блоків, мікроконтролерних систем управління, а також систем захисту та контролю. Типова функціональна схема такого електроприводу наведена на рисунку 1.3.

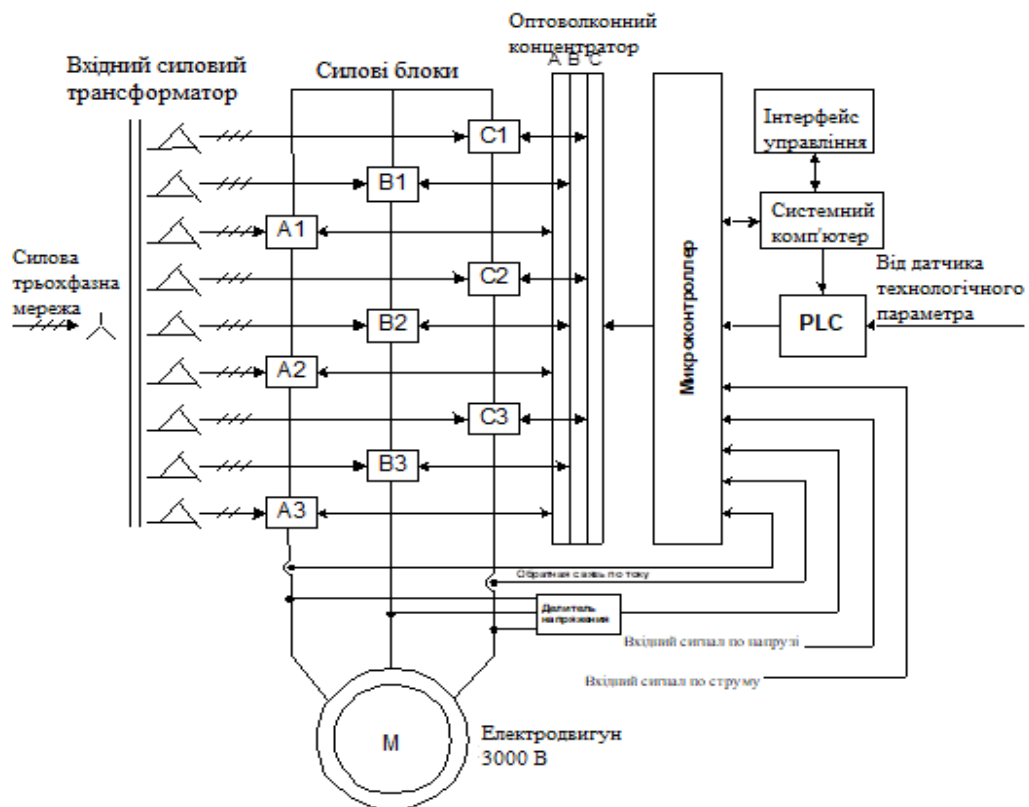


Рисунок 1.3 – Типова функціональна схема високовольтного частотно-регульованого електроприводу з ІН

У системі управління оптоволоконний концентратор взаємодіє з силовими блоками однієї фази. Сигнали, що надходять від концентратора, передаються через оптоволоконні лінії і містять інформацію про ширину імпульсу або поточний режим роботи системи.

Отримавши дані, силовий блок передає команду про необхідний стан або, у разі помилки, сигнал з кодом несправності. Мікроконтролер збирає інформацію про напругу і струм на вході та виході, обробляє управлінський сигнал, фільтрує його і розсилає розраховані параметри для роботи перетворювача, системи захисту, а також передає дані для системного комп'ютера.

Блок PLC забезпечує зв'язок мікроконтролера з зовнішнім середовищем, маючи входні канали для прийому управлінських сигналів і вихідні канали для передачі інформації. Дані, що подаються на вхід, використовуються для управління в режимі, коли система працює за зовнішнім заданим параметром.

Параметри, що виводяться з блоку PLC, можуть включати частоту вихідного струму, величину струму, напруги та потужності. Для ефективної обробки сигналів від датчиків технологічних параметрів, блок PLC оснащений вбудованим ПІД-регулятором, який забезпечує точне та стабільне управління системою.

Силова схема перетворювача формується шляхом послідовного з'єднання окремих силових блоків для кожної фази. Це дозволяє використовувати IGBT-транзистори, розраховані на меншу напругу, ніж та, що на виході перетворювача. Таким чином, реалізується багаторівневе ШІМ перетворення, що допомагає зменшити амплітуду вихідної пульсації напруги пропорційно кількості фазних силових блоків. Цей підхід забезпечує кращу стабільність та ефективність роботи високовольтного перетворювача частоти.

1.2 Частотно-регульований електропривод стрічкових конвеєрів

Перетворювач частоти забезпечує плавне регулювання швидкості та зниження пускових струмів. Спеціалізовані серії мають додаткові функції, що розширюють можливості їх застосування в різних галузях. Сучасний

частотно регульований електропривод включає в себе асинхронний або синхронний електричний двигун та перетворювач частоти (див. рисунок 1.4).

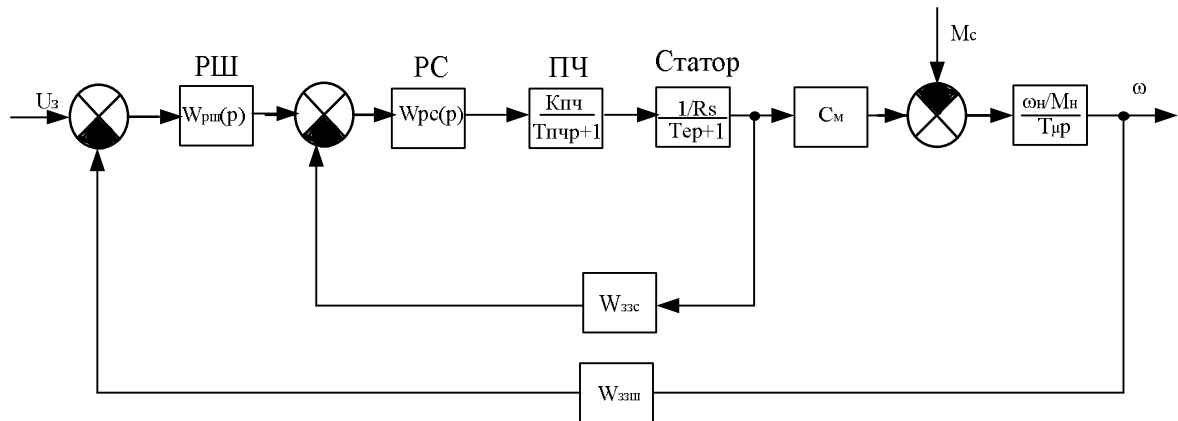


Рисунок 1.4 – Типова структурна схема двохконтурної САЕП з ПЧ

Перетворювач частоти — це пристрій, який призначений для перетворення змінного струму (або напруги) однієї частоти в змінний струм (або напругу) іншої частоти. Вихідна частота в сучасних перетворювачах може змінюватися в широкому діапазоні і бути як вищою, так і нижчою за частоту живильної мережі. Схема будь-якого перетворювача частоти складається з двох основних частин: силової та керуючої. Силова частина зазвичай реалізована на тиристорах або транзисторах, що працюють як електронні ключі. Керуюча частина виконується на цифрових мікропроцесорах, що забезпечують управління силовими електронними ключами, а також вирішення ряду допоміжних задач, таких як контроль, діагностика та захист. Перетворювачі частоти, які використовуються в регульованих електроприводах, залежно від структури та принципу роботи силової частини, діляться на два основні класи:

1. Перетворювачі частоти з явно вираженою проміжною ланкою постійного струму.
2. Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком (без проміжної ланки постійного струму).

Кожен із існуючих класів перетворювачів має свої переваги та недоліки, які визначають область їх оптимального застосування. Історично

першими були перетворювачі з безпосереднім зв'язком (рисунок 1.5), у яких силова частина складається з керованого випрямляча, реалізованого на тиристорах. У таких системах керування по черзі відмикаються групи тиристорів, що дозволяє підключати статорні обмотки двигуна до живильної мережі.

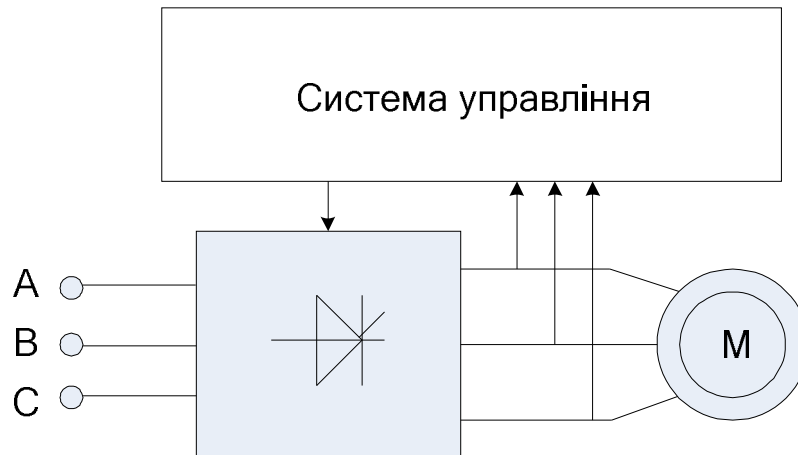


Рисунок 1.5– Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком

Найбільше застосування в сучасних частотно регульованих приводах знаходять перетворювачі з чітко вираженою ланкою постійного струму (рисунок 1.6). У цих перетворювачах використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою та частотою спочатку випрямляється у випрямлячі (В), потім фільтрується фільтром (Ф) для згладжування, а після цього знову перетворюється інвертором (І) у змінну напругу з змінюваною частотою та амплітудою. Подвійне перетворення енергії призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) і погіршення масогабаритних характеристик порівняно з перетворювачами з безпосереднім зв'язком. Для формування синусоїдальної змінної напруги використовуються автономні інвертори напруги та інвертори струму. В якості електронних ключів у інверторах застосовуються тиристори GTO, їх вдосконалені модифікації GCT, IGCT, SGCT, а також біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT. Основною перевагою тиристорних перетворювачів частоти, як і в схемах з

безпосереднім зв'язком, є їх здатність працювати з великими струмами та напругами, витримуючи тривале навантаження та імпульсні впливи.

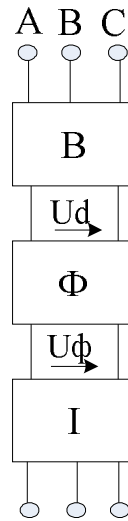


Рисунок 1.6 – Схема ПЧ з явно вираженою ланкою постійного струму

1.3 Огляд систем регулювання швидкості асинхронного двигуна у каскадних схемах

Системи регулювання швидкості асинхронним електродвигуном (АД) з фазним ротором (ФР) можна розділити на два види параметричні та каскадні. До перших відноситься введення різних нелінійних параметричних елементів у роторний ланцюг, другі є включеними в ланцюг ротора за «каскадною схемою» силові або електромеханічні перетворювачі, що дозволяють віддати енергію з роторного ланцюга назад у мережу [6-8].

Найпростіша схема параметричного управління асинхронним електродвигуном з фазним ротором показано на рисунку 1.7. Вона є включенням в коло ротора АД багатоступінчастого резистора, по мірі розгону двигуна його ступені шунтуються контактами. До її переваг можна віднести: збільшений пусковий момент, обмеження пускового струму, можливість формування кількох штучних механічних характеристик. До недоліків: нестабільність пускових характеристик, регулювання швидкості

пов'язане з великими втратами енергії на додатковому опорі, звідси неможливість тривалої підтримки швидкості менша від номінальної [4-8].

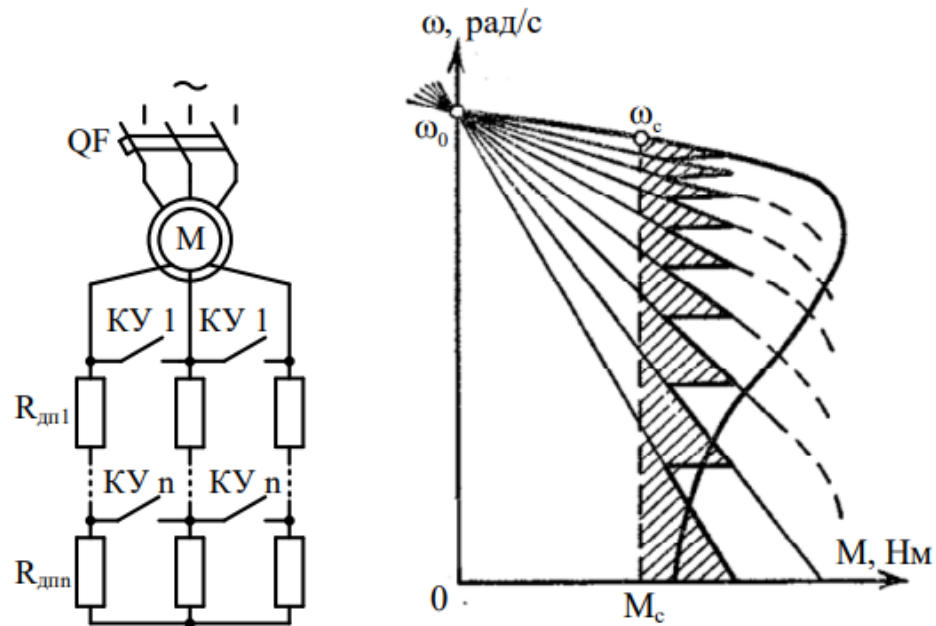


Рисунок 1.7 – Асинхронний електродвигун з релейно-контакторним комутатором у роторному ланцюзі та його механічна характеристик

З розвитком пристроїв силової електроніки на зміну релейно-контакторному комутатору прийшов тиристорний комутатор у колі ротора, приведений на рисунку 1.8.

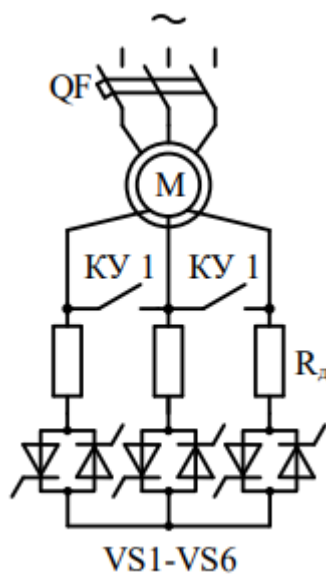


Рисунок 1.8 – Асинхронный электродвигатель с тиристорным коммутатором в роторной цепи

Силовa схема комутатора представлена трьома парами зустрічно-паралельних тиристорів. Регулювання швидкості здійснюється шляхом зміни кута відкриття тиристорів.

Розвиток систем з тиристорним комутатором призвело до появи двох схем регулювання швидкості, що отримали широке застосування: схема імпульсного регулювання і пристрою плавного тристорного пуску.

У схемах імпульсного регулювання (рисунок 1.9) в роторне коло АД включається некерований випрямляч, в деяких окремих випадках можливе включення керованого випрямляча, до його виходів підключається опір паралельно якому підключається повністю керований силовий ключ.

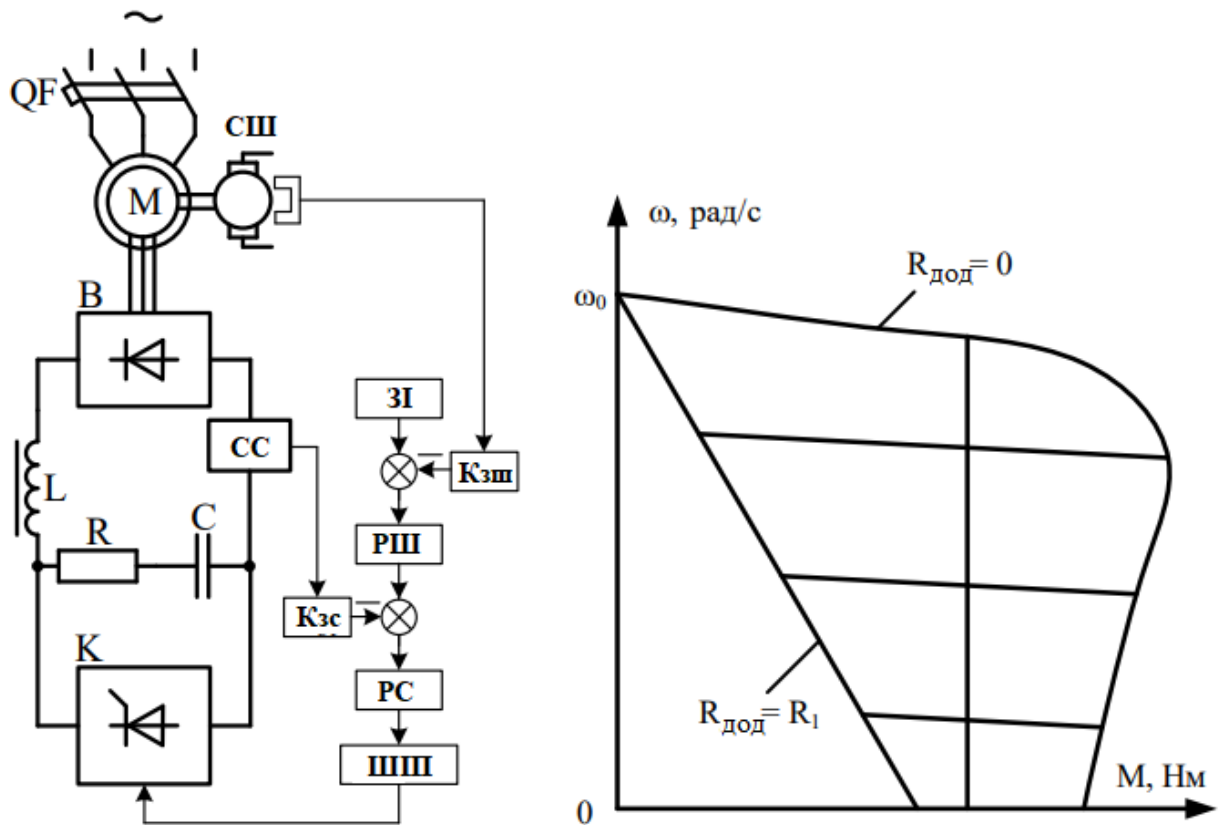


Рисунок 1.9 – Імпульсне регулювання швидкості асинхронного електродвигуна з фазним ротором та його механічна характеристика

Управління силовим ключем здійснюється за допомогою широтно-імпульсного регулювання, що дозволяє керувати амплітудою напруги, що прикладається до резистори. Переваги: можливість плавного регулювання

швидкості, при наявності замкнутого зворотного зв'язку по швидкості (струму); можливість стабілізації швидкості (струму); можливість отримання будь-якої проміжної механічної характеристики в діапазоні зміни шпаруватості від 0 до 1; регулювання швидкості внаслідок збільшення втрат на резисторі. Слід також відзначити що при імпульсному управлінні енергетичні показники системи дещо гірші, ніж при ступінчастому, це коливанням струмів електродвигуна через частих включень/відключень додаткового опору, що призводить до збільшення його нагріву [6-8].

Крім включення резисторів у ланцюг ротора існують схеми пуску АД з ФР, коли до виводів обмотки ротора підключається реактор або індукційний опір (ІО) (рисунок 1.10).

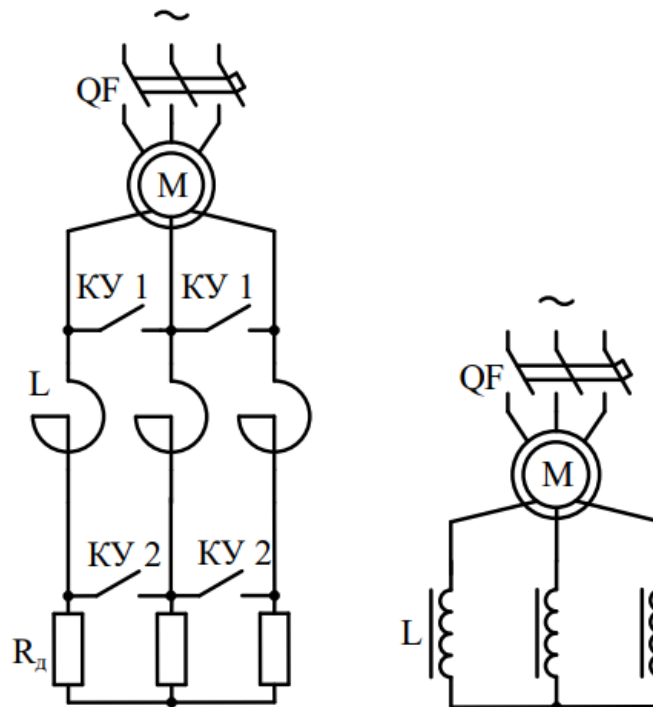


Рисунок 1.10 – Асинхронний електродвигун з реактором або індукційним опором у колі ротора

Індукційний опір складається з трьох трубчастих стрижнів, з'єднаних ярмами з обмотками з неізолюваного дроту, що намотується на ізолювані міканітом осердя (рисунок 1.11) [12]

В основу теоретичних досліджень індукційного параметричного пристрою покладено явище поглинання електромагнітної енергії магнітопроводом реостату. Тому ІО розглядається як трансформатор, первинною обмоткою якого служить мідний або алюмінієвий індуктор, а вторинною сталеві тонкостінні труби (стрижень магнітопроводу), на яку надіто індуктор. Зв'язок між обмотками здійснюється за допомогою магнітного потоку, що проходить в основному через повітряний простір між індуктором та сталеві трубою [11-12].

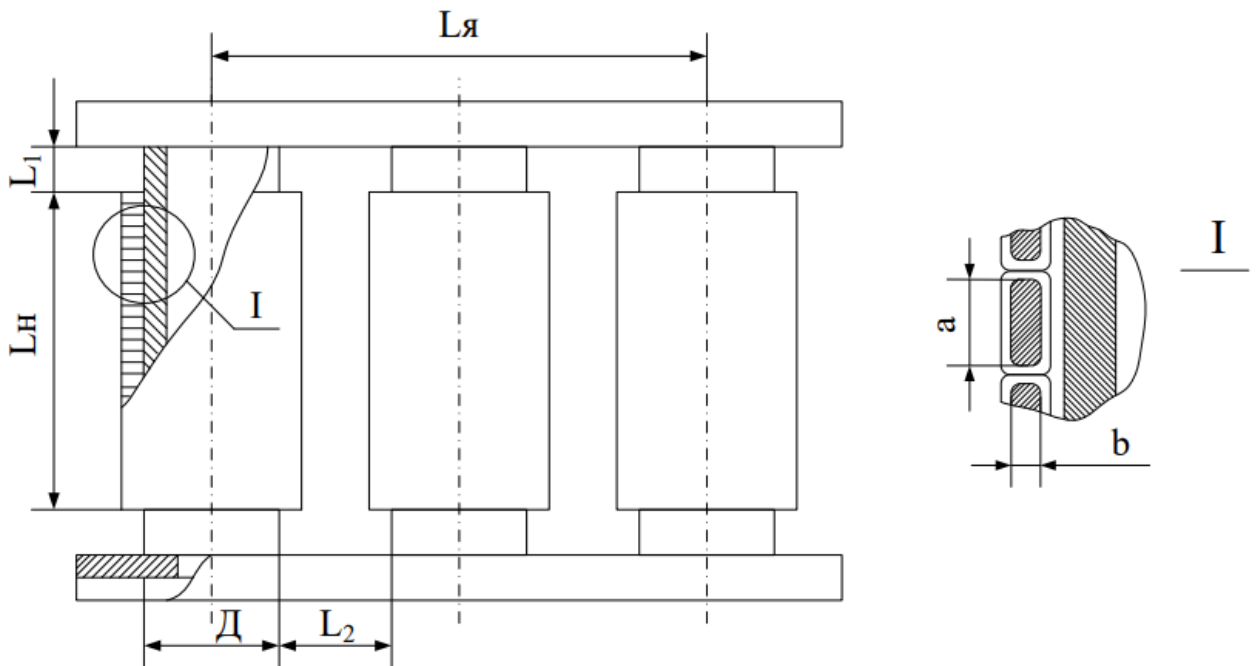


Рисунок 1.11 – Індукційний опір

Електромагнітна хвиля при проходженні вглиб магнітопроводу згасає, це зумовило застосування труби (порожнього стрижня). Значення величини активних втрат в ІВ визначається насамперед фізичними властивостями матеріалу стрижня ІВ (питомим опором та магнітною проникністю) та частотою струму.

Особливістю індукційного опору є те, що при максимальній частоті струму в обмотках потужність, що поглинається магнітопроводом, і електричні параметри ІО мають максимальне значення. У міру зменшення частоти струму зменшується потужність, що поглинається магнітопроводом,

і електричні параметри ІО. Глибина проникнення електромагнітної хвилі (вихрових струмів) у товщу стрижня магнітопроводу також змінюється [12-14]. Шляхом зміни електричних параметрів магнітопроводу індукційного реостату можна змінити форму механічних характеристик електродвигуна.

Особливість даних способів пуску асинхронного електродвигуна полягає у зміні реактором та індукційним опором свого індуктивного опору, що залежить від частоти струму, що протікає через них. Слід зазначити, що введення в коло ротора реактора або індукційного опору дозволяє збільшити пусковий момент АД з ФР. Позитивні якості: обмеження пускового струму та його плавна зміна в міру розгону, збільшений пусковий момент. Недоліки: відсутність можливості регулювання швидкості, втрати в активних опорах регулюючих елементів, немає можливості змінити темп розгону електродвигуна.

У системах управління асинхронним двигуном з фазним ротором найчастіше статор підключається безпосередньо до мережі, а в коло ротора вводиться опір або напівпровідниковий перетворювач. Однією з важливих переваг таких систем є можливість регулювання та управління енергією ковзання, що не характерно для систем з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. Ці системи мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД), який залишається стабільним навіть при значних змінах швидкості в широкому діапазоні. Крім того, перевантажувальна здатність електроприводу в таких системах також є досить високою.

У вентильно-машинних електромеханічних каскадах потужність ковзання використовується для живлення машини постійного струму. Схема такого каскаду (рисунок 1.12) передбачає, що якорь двигуна постійного струму підключений до некерованого випрямляча, розташованого в колі ротора асинхронного двигуна з фазним ротором. Потужність ковзання, що генерується в асинхронному двигуні, використовується для формування додаткового моменту. При цьому сумарний момент розподіляється за наступним принципом: коли ковзання асинхронного двигуна близьке до

номінального, основний момент генерується ним, а при зниженні швидкості – передається на двигун постійного струму. Така схема забезпечує сталість моменту, оскільки змінюючи напругу збудження двигуна постійного струму, можна регулювати швидкість асинхронного двигуна.

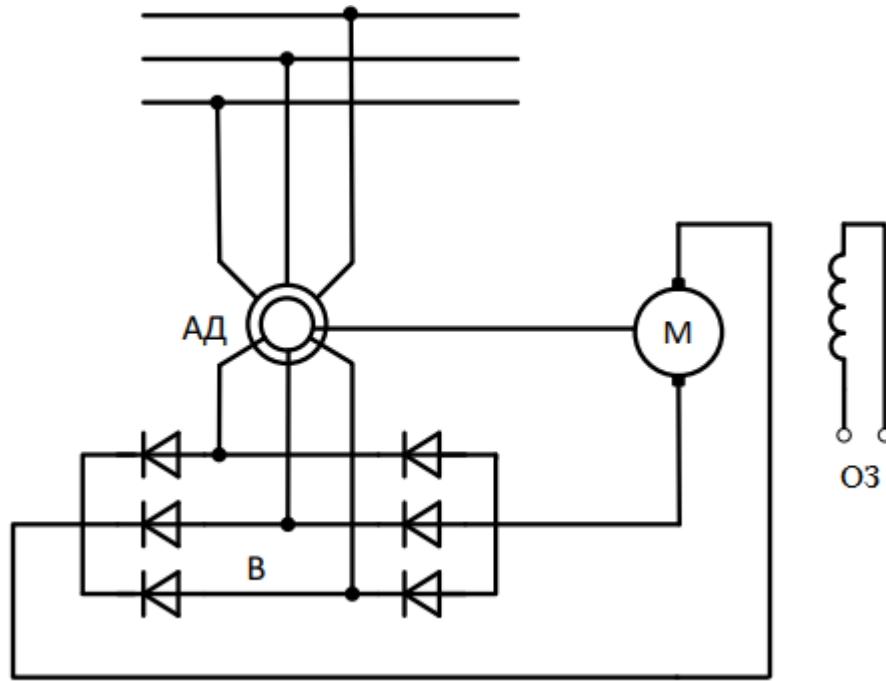


Рисунок 1.12 – Схема вентильно-машинного електромеханічного каскаду

Перевагою цього рішення є забезпечення сталості розвинутої потужності на валу двигуна, оскільки при зниженні швидкості збільшується момент, що дозволяє зберігати стабільну потужність. Це досягається завдяки ефективному розподілу моменту між асинхронним двигуном і машиною постійного струму, що дозволяє підтримувати необхідну продуктивність навіть при зміні швидкості.

Однак зі збільшенням діапазону регулювання швидкості значно зростають і масо-габаритні показники машини постійного струму, що обмежує застосування таких каскадів лише для механізмів з електроприводами, де діапазон регулювання швидкості не перевищує 2:1. Це обмеження пов'язане з необхідністю збільшення розмірів і ваги двигуна постійного струму для забезпечення стабільної роботи в більш широкому діапазоні швидкостей.

У вентильно-машинних каскадах, на відміну від попереднього типу, потужність ковзання передається безпосередньо в мережу. Для цього до двигуна постійного струму механічно підключено синхронний генератор (див. рисунок 1.13). Потужність ковзання, що виникає в роторі АД ФР, передається до двигуна постійного струму, а від нього — на синхронний генератор, який далі віддає енергію в мережу. Таким чином, здійснюється подвійне перетворення енергії.

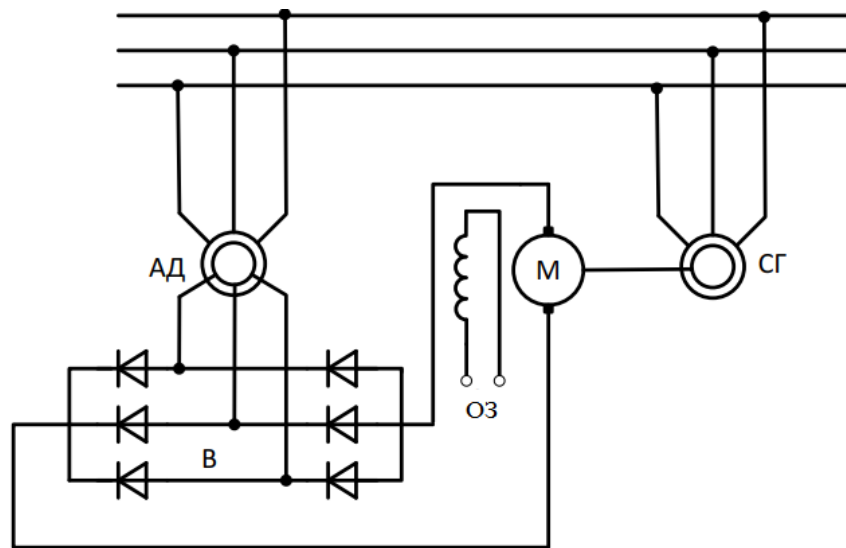


Рисунок 1.13 – Схема вентильно-машинного каскаду

Значними недоліками схеми є необхідність використання двох додаткових електричних машин та низький ККД через дворове перетворення електроенергії.

На рисунку 1.14 приведена схема асинхронно - вентильного каскаду з ланкою постійно струму, в якому випрямляч з боку ротора є некерованим. Енергія ковзання передається в мережу живлення через керований інвертор. Регулювання швидкості проводиться за рахунок введення додаткової ЕРС в коло ротора асинхронного двигуна. Діапазон регулювання обмежений кутом відкриття тиристорів інвертора.

Вентильно-машинні електричні каскади завжди мають у своєму складі проміжний ланцюг постійного струму. Так само, як і вентильні каскади, вони мають дві модифікації: з однією або двома машинами постійного струму. Тут

також є обмеження щодо можливих режимів роботи електроприводу з таким каскадом. Варіант схеми із двома двигунами постійного струму призначений лише для вентиляторного навантаження. Регулювання швидкості обертання у верхній та нижній зонах можливе при перемиканні з'єднання обмоток між собою – вони можуть бути з'єднані паралельно або послідовно.

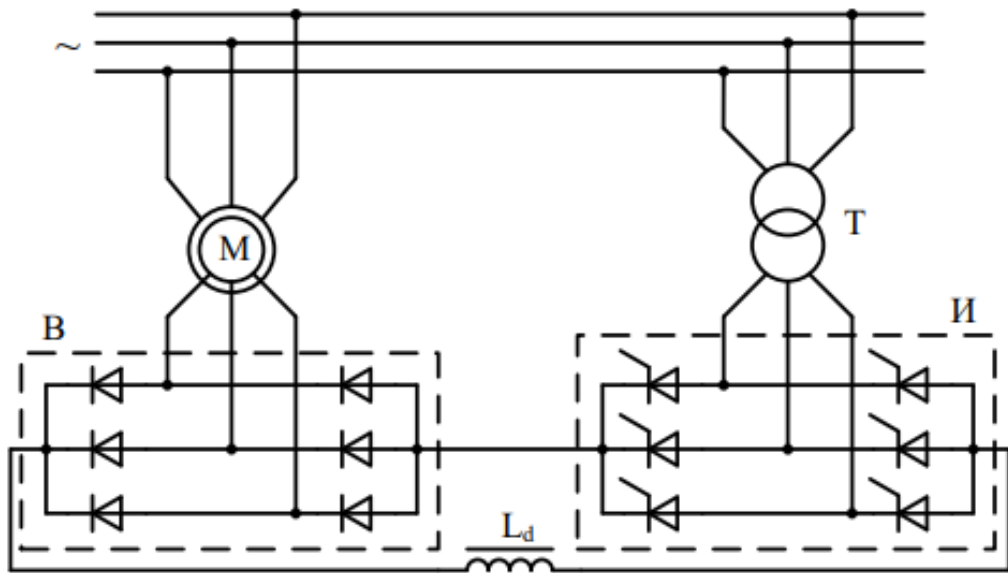


Рисунок 1.14 – Схема асинхронно-вентильного каскаду

Вентильно-машинні електромеханічні каскади можуть забезпечити більший діапазон регулювання, ніж звичайні вентильні. Для цього в них за допомогою автотрансформаторів, вентильних регуляторів тощо систем відбувається зниження напруги, що підводиться до статора асинхронного двигуна. Також можливий варіант перемикання статорних обмоток із трикутника на зірку.

Перевагами цієї схеми є проста конструкція, більший діапазон регулювання швидкості порівняно з вентильно-машинним каскадом та високий коефіцієнт корисної дії (ККД), завдяки можливості повернення енергії ковзання в мережу живлення. Однак такий каскад не дозволяє працювати асинхронному двигуну (АД) в руховому режимі на швидкості, що перевищує синхронну, або в генераторному режимі на швидкості нижче синхронної. Ці обмеження можна обійти, виключивши ланку постійного

струму і встановивши два регульовані перетворювачі. В цьому випадку керування вентилями можна здійснювати або в залежності від частоти ковзання, або незалежно, регулюючи амплітуду та частоту підведеної додаткової електрорушійної сили (ЕРС). Це дозволить двигуну працювати як у генераторному, так і в двигунному режимах на швидкостях, що не перевищують синхронну. Проте, як і раніше, неможливо буде здійснювати двигунний режим АД на швидкості, що перевищує синхронну.

В разі незалежного керування частотою, фазою та амплітудою додаткової ЕРС двигун працює в режимі машини подвійного живлення. Енергія ковзання може бути спрямована не тільки в мережу живлення, а й у зворотному напрямку від мережі в обмотки ротора АД.

1.4 Характеристики виробничого механізму

Типова схема похило-горизонтальної транспортної лінії наведена на рисунку 1.15.

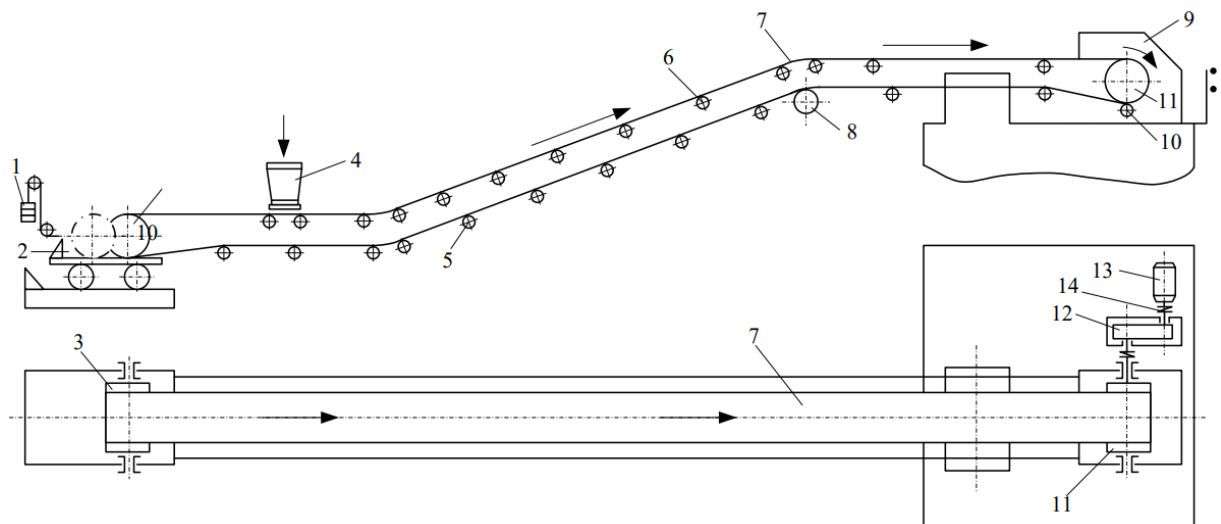


Рисунок 1.15 – Схема типової похило-горизонтальної транспортної лінії

На схемі 1.15 наведено такі позначення: 1 – противага; 2 – натяжний пристрій; 3 – барабан; 4 – завантажувальний пристрій; 5, 6 – ролики опори; 7 – робочі гілки стрічки; 8 – відхиляючий барабан; 9 – розвантажувальний

пристрій; 10 – пристрій для очищення стрічки; 11 – електропривод; 12 – редуктор; 13 – електродвигун; 14 – з'єднувальна муфта.

Кінематична схема механізму приводу похило-горизонтального стрічкового конвеєра в загальному випадку його застосування наведено на рисунку 1.16 [4].

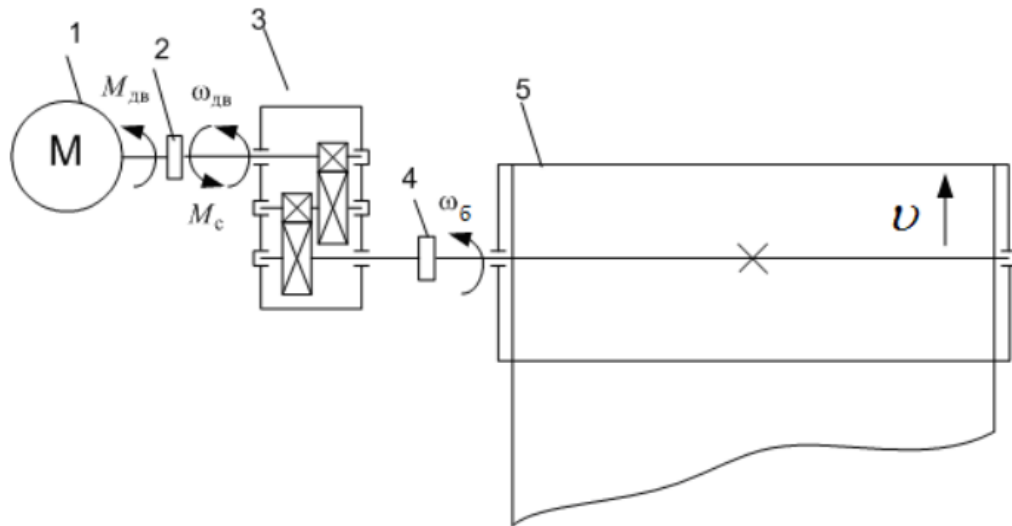


Рисунок 1.16 – Кінематична схема механізму

На схемі рисунка 1.11 прийняті такі позначення: 1– електродвигун; 2,4 –жорстка муфта; 3 – редуктор; 5 – приводний барабан; $M_{дв}$ –крутний момент, що розвивається приводним двигуном; M_c – момент опору механізму (статичного навантаження); $\omega_{бта}$ $\omega_{дв}$ –кутові швидкості барабана та двигуна; v – швидкість стрічки.

1.5 Висновки

1. В даний час для керування асинхронним електродвигуном з фазним ротором використовують переважно параметричні системи управління. Всі вони мають такі недоліки: значні втрати енергії в процесі пуску на реостатах, міжвиткове коротке замикання в роторному колі внаслідок перенапруги (характерно для імпульсних систем регулювання), низький коефіцієнт потужності.

2. Найбільш економічний спосіб керування асинхронним електродвигуном з фазним ротором заснований на введенні проти-ЕРС у коло ротора, реалізується в системі асинхронного вентильного каскаду (АВК). Однак АВК здатний забезпечити прийнятні техніко-економічні показники електроприводу тільки за неглибокого діапазону регулювання швидкості (20-25% від номінальної), і не завжди здатний забезпечити необхідні пускові характеристики. Системи АВК з послідовним збудженням не забезпечують необхідну для механізмів конвеєрного типу підвищену здатність до перевантаження.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ АД з ФР

3.1 Математичний опис асинхронного двигуна з фазним ротором

Математичне опис будь-якої машини змінного струму будується на базі загальної теорії електричних машин.

За основу приймемо ідеалізовану машину змінного струму (рисунок 2.1) і введемо такі припущення:

- симетричність в електричних та магнітних колах;
- відсутність втрат у сталі та магнітній системі;
- магнітне поле синусоїдально розподілене по колу статора;
- струми, що протікають в обмотках статора та ротора, синусоїдальні;
- відсутність демпферних контурів.

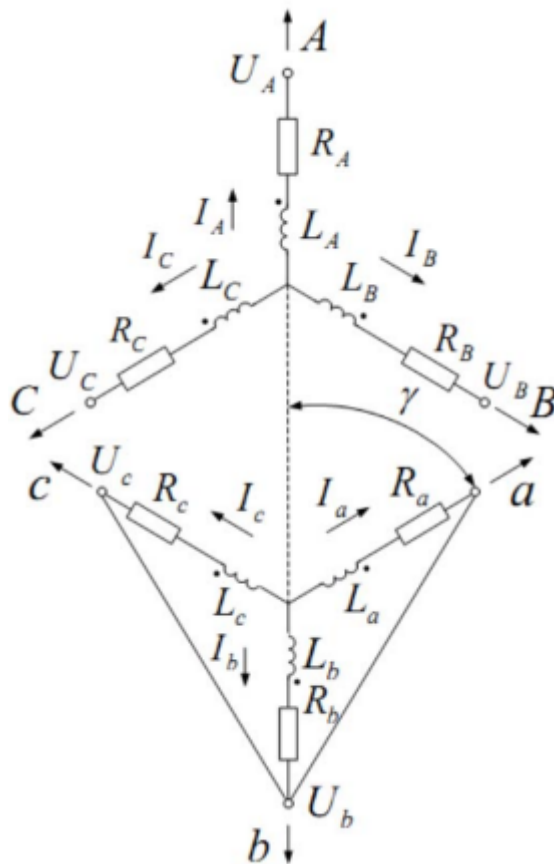


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема трифазної асинхронної машини трифазної системи координат А, В, С

Для дослідження можливості та особливостей застосування АД з ФР у електроприводі необхідно досліджувати особливості електромеханічного перетворення енергії під час введення в ротор АД ФР джерела додаткової напруги. Метою розділу є побудова математичної моделі АД з ФР та отримання його статичних механічних характеристик МПЖ в різних режимах роботи [9, 17].

Для розробки математичної та побудови механічних характеристик машини подвійного живлення приведемо Т-подібну схему заміщення машини (рисунок 2.2), в якій враховується підведена до ротора АД ФР напруга.

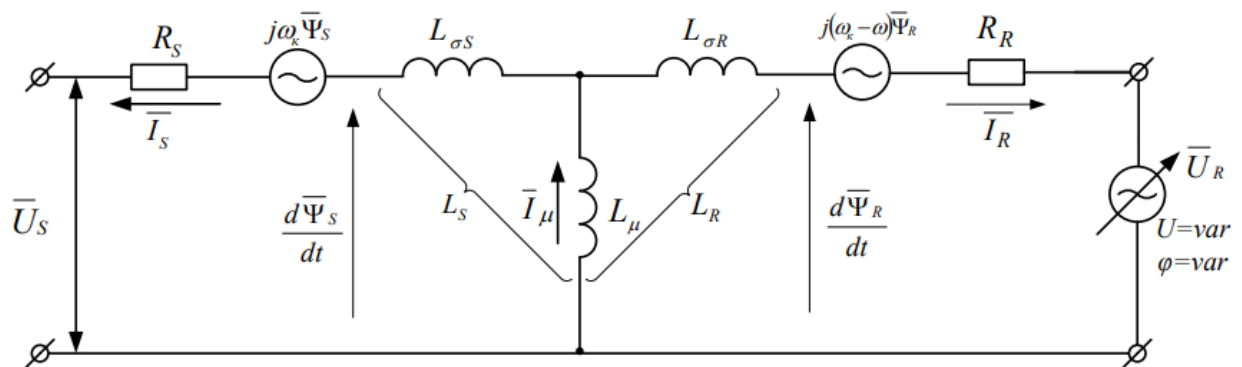


Рисунок 2.2 – Схема заміщення машини подвійного живлення

На схемі заміщення прийняті такі позначення:

$\bar{U}_s$ – напруга на статорі в комплексній формі;

$\bar{I}_s$ – струм статора в комплексній формі;

$L_{\sigma s}$ – власна індуктивність розсіювання статора;

$\bar{L}_\mu$ – індуктивність контуру намагнічування;

$L_{\sigma R}$ – власна індуктивність розсіювання ротора;

L_s – індуктивність статора;

L_R – індуктивність ротора;

R_s – активний опір статора;

R_R – активний опір ротора;

$\bar{U}_R$ – додаткова напруга, підведена до ротора, в комплексній формі;

s – відносна частота ЕРС ротора;

ω_0 – кутова швидкість обертання магнітного поля статора;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

$\bar{\psi}_S$ – потокозчеплення статора в комплексній формі;

$\bar{\psi}_R$ – потокозчеплення ротора в комплексній формі;

ω_k – кутова швидкість обертання системи координат.

Електромагнітні процеси в асинхронному електродвигуні описуються системою диференціальних рівнянь. Запишемо закони Кірхгофа для Т-подібної схеми заміщення та рівняння формування моменту:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = j\omega_0 \cdot \bar{\psi}_S + \bar{I}_S R_S, \\ \bar{U}_R = j\omega_0 \cdot \bar{\psi}_R + \bar{I}_R R_R, \\ M = -\frac{3}{2} \cdot z_{II} \cdot \frac{L_\mu}{L_S \cdot L_R - L_\mu^2} \cdot (\bar{\psi}_S \times \bar{\psi}_R). \end{cases}, \quad (2.1)$$

де z_{II} – кількість пар полюсів на статорі машини.

Коефіцієнт розсіювання машини визначається виразом:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_S \cdot L_R}, \quad (2.2)$$

Струми обмоток статора та ротора машини із врахуванням (2.2) визначається за виразом:

$$\begin{cases} \bar{I}_S = \frac{1}{\sigma L_S} \cdot \bar{\psi}_S - \frac{k_R}{\sigma L_S} \cdot \bar{\psi}_R, \\ \bar{I}_R = \frac{k_S}{\sigma L_R} \cdot \bar{\psi}_S - \frac{1}{\sigma L_R} \cdot \bar{\psi}_R. \end{cases}, \quad (2.3)$$

де k_R, k_S – коефіцієнти зв'язку статора та ротора відповідно.

Підставимо рівняння (2.3) в (2.1), отримуємо:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = \left(\frac{R_S}{\sigma L_S} + j\omega_0 \right) \cdot \bar{\psi}_S - \frac{R_S k_R}{\sigma L_S} \cdot \bar{\psi}_R, \\ \bar{U}_R = \frac{R_R k_S}{\sigma L_R} \cdot \bar{\psi}_S + \left(\frac{R_R}{\sigma L_R} + j\omega_0 s \right) \cdot \bar{\psi}_R, \\ M = -\frac{3}{2} \cdot p_{II} \cdot \frac{L_\mu}{L_S \cdot L_R - L_\mu^2} \cdot (\bar{\psi}_S \times \bar{\psi}_R). \end{cases} \quad (2.4)$$

Система рівнянь (2.4) описує АД з ФР.

Для дослідження впливу амплітуди та фази додаткової напруги, прикладеної до ротора, на форму механічних характеристик, розглянемо характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором (АД з ФР) у його асинхронному режимі роботи (див. рисунок 2.3).

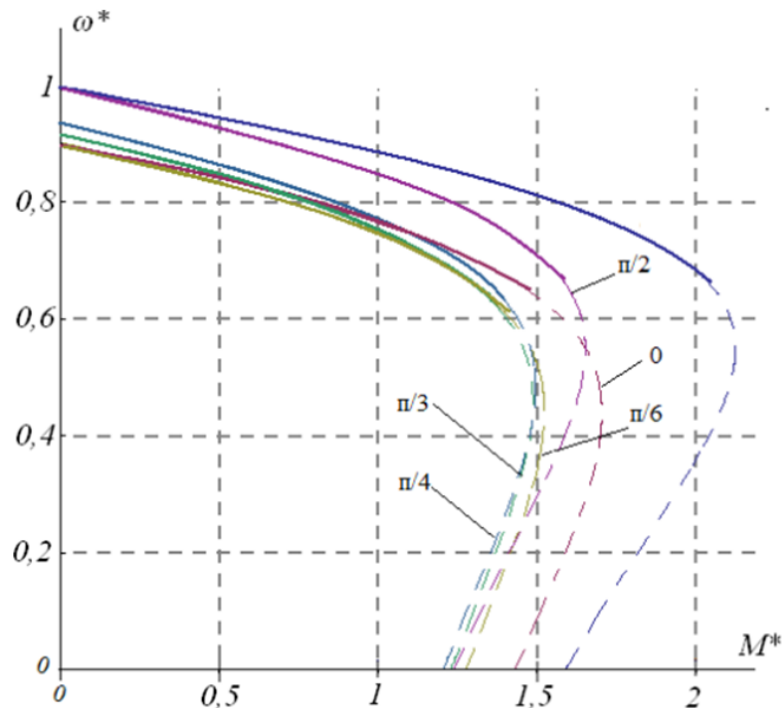


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики МПЖ в асинхронному режимі

Механічні характеристики машини подвійного живлення (МПЖ) в асинхронному режимі роботи подано для різних значень амплітуди та фази додаткової напруги, прикладеної до ротора. Суцільними лініями позначені ділянки характеристики з негативною жорсткістю, а природна характеристика позначена окремо.

Як видно з графіків на рисунку 2.3, зі зниженням швидкості ідеального холостого ходу машини спостерігається зменшення критичного моменту. Жорсткість робочої ділянки характеристик також знижується порівняно з природною характеристикою, причому її значення залежить від фазового зсуву додаткової напруги. Загалом отримані результати співпадають з експериментальними характеристиками, визначеними дослідним шляхом.

Збільшуючи амплітуду додаткової напруги, можна досягти введення АД з ФР в режим гальмування. Механічні характеристики АД зФР в режимі гальмування приведено на рисунку 2.4.

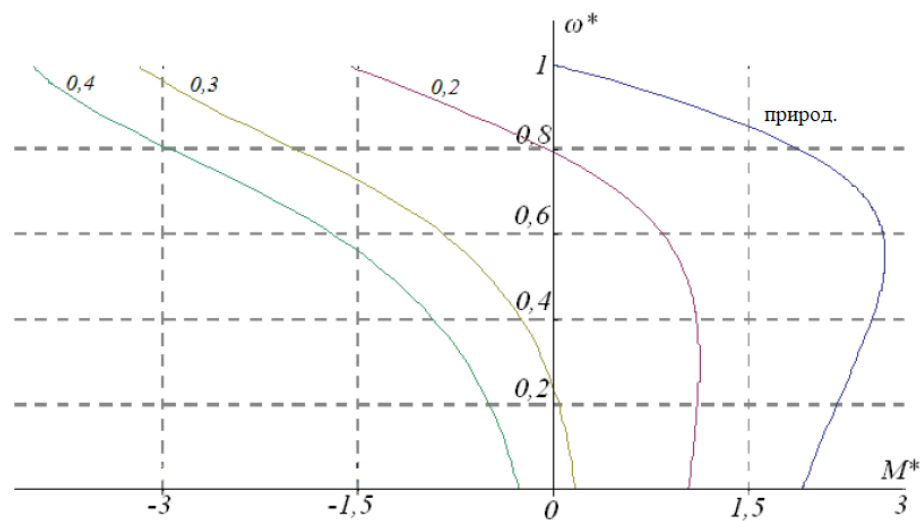


Рисунок 2.4 – Сімейство механічних характеристик при рекуперативному гальмуванні при різних значеннях U_R

З графіків видно, що швидкість ідеального холостого ходу на штучних характеристиках знижується. Це свідчить про те, що зміна амплітуди додаткової напруги на роторі дозволяє реалізувати рекуперативне гальмування машини [11-13].

Для визначення можливості роботи МПЖ у діапазоні швидкостей $0 \leq \omega \leq 0,5\omega$ розглянемо сімейство механічних характеристик машини, наведених на рисунку 2.5.

На основі наведених характеристик можна зробити висновок, що перевантажувальна здатність асинхронного двигуна з фазним ротором (АД з ФР) зменшується зі зниженням швидкості. У зв'язку з цим стійка робота машини при номінальному моменті навантаження можлива лише в обмеженому діапазоні швидкостей $0,5 \leq \omega \leq \omega$. Тому регулювання швидкості АД з ФР при зміні лише амплітуди та фазового зсуву додаткової напруги на роторі обмежено діапазоном 2-2,5:1.

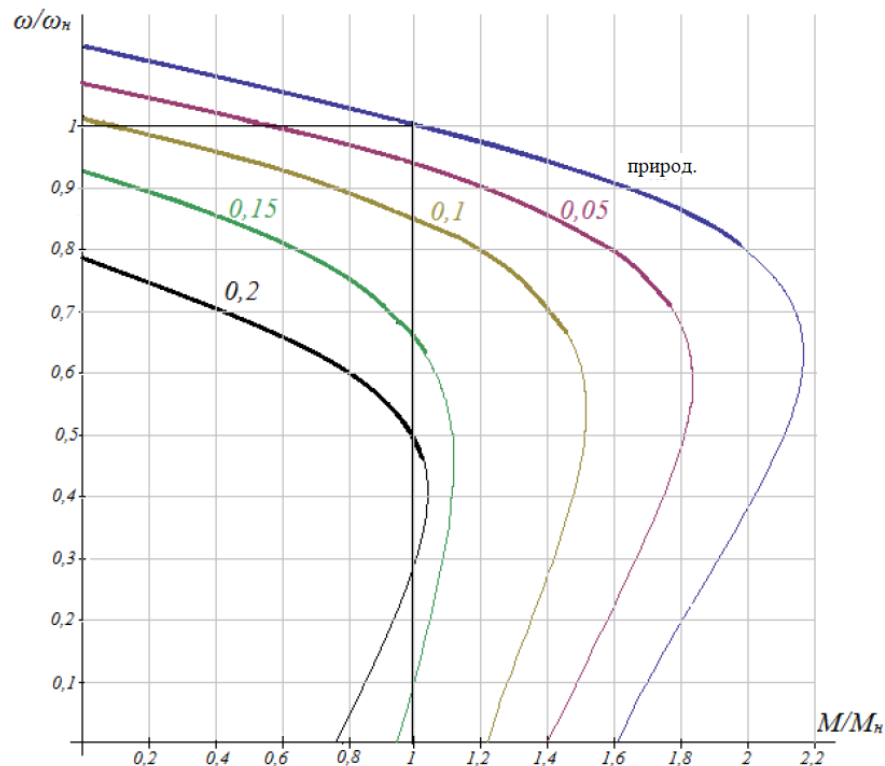


Рисунок 2.5 – Сімейство механічних характеристик АД з ФР при фазовому зсуві $\pi/6$

Жорсткість β_d механічних характеристик зростає після введення в коло ротора джерела додаткової напруги з частотою, яка відрізняється від частоти власної ЕРС ротора. Це означає, що така жорсткість перевищує жорсткість природної механічної характеристики.

Механічні характеристики АД з ФР, яка працює в синхронному режимі, наведено на рисунку 2.6. По характеристикам, наведеним на рисунку 2.6 видно, що в даному режимі жорсткість характеристик є більшою

природної. При цьому, при швидкості обертання ротора машини більшій за $0,5\omega$, перевантажувальна здатність є меншою, ніж природна. Однак синхронний режим роботи придатний лише для приводів установок із фіксованою постійною швидкістю, що не завжди відповідає вимогам режимів роботи конвеєрного механізму.

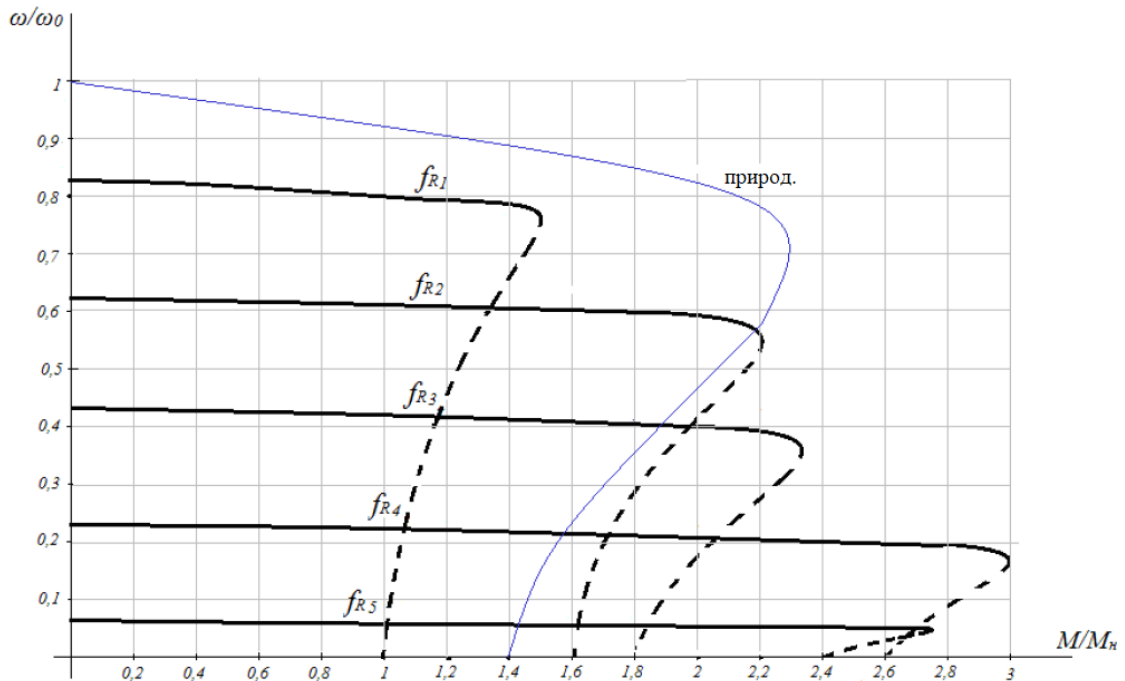


Рисунок 2.6 – Сімейство механічних характеристик АД з ФР в синхронному режимі

На основі проведених у цьому розділі досліджень можна зробити висновок, що регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором шляхом зміни амплітуди та фази додаткової напруги призводить до зменшення перевантажувальної здатності та жорсткості штучних механічних характеристик зі зниженням швидкості ідеального холостого ходу. При швидкості $0,5 \leq \omega \leq \omega$ критичний момент АД з ФР стає меншим за номінальний. З цієї причини регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором шляхом зміни амплітуди та фази додаткової напруги на роторі обмежується діапазоном у межах 2–2,5:1.

2.2 Еквівалентна математична модель машини подвійного живлення

Математичний опис АД з ФР, позбавлений вище вказаних недоліків, і який дозволяє розширити діапазон регулювання машини без необхідності застосування синхронного режиму, має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\omega_{0E} - \omega) \pm \Delta\omega_K - (\omega_{0E} - \omega) = \Delta\omega, \\ M = \left(\frac{C_{EM}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_{0E} - \omega), \\ E_R = -k_E \cdot \omega + u_S, \\ \Delta u_R = u_R + E_R, \\ i_{Ra} = \Delta u_R \cdot \frac{1/R_R}{T_R \cdot p + 1}, \\ M_a = \frac{3z_{II} \cdot L_{\mu}}{2R_s} \cdot i_{Ra} \cdot u_S, \\ M_{\Sigma} = M_a + M, \\ \omega = \frac{M - M_c}{J \cdot p}, \end{array} \right. \quad (2.5)$$

де M_a – асинхронна складова моменту АД з ФР;

M_{ω} – синхронна складова моменту АД з ФР;

C_{EM} – коефіцієнт електромагнітного зв'язку двигуна;

k_E – коефіцієнт внутрішнього зворотного зв'язку машини по ЕРС ротора;

T_R – постійна часу ротора машини;

u_R – складова додаткової напруги на роторі.

На основі системи рівнянь (2.5) може бути синтезована еквівалентна структурна схема асинхронного двигуна з подвійним живленням зі змінною частоти додаткової напруги. Структурна схема такої системи наведена на рисунку 2.7.

Ця схема дозволяє описати усі можливі режими роботи АД з ФР. При

$u_{Ri} = 0$, $\Delta\omega = 0$ схема описує асинхронний двигун з фазним ротором без джерела додаткової напруги на роторі; при $u_{Ri} \neq 0$, $\Delta\omega = 0$ схема описує асинхронний режим роботи АД з ФР; при $u_{Ri} \neq 0$, $\Delta\omega \neq 0$ схема описує МПЖ при зміні частоти додаткової напруги. Статичні характеристики, що відповідають отриманій еквівалентній схемі для АД з ФР приведено на рисунку 2.8.

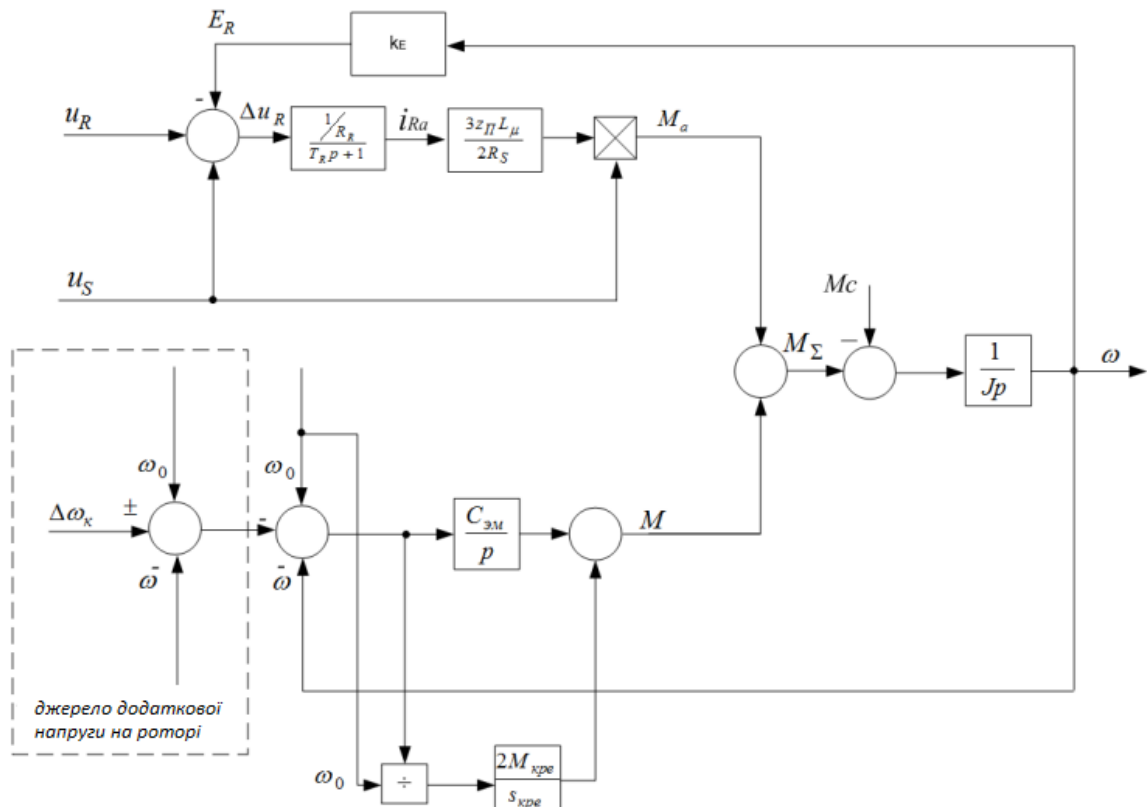


Рисунок 2.8 – Еквівалентна структурна схема АД з ФР зі зміною частоти додаткової напруги

Таким чином, облік компенсації ЕРС обмоток машини дозволяє спростити її структурну схему та отримати еквівалентну модель машини, зручну для застосування у системах керування.

2.3 Оцінка відповідності отриманих математичних моделей

Для перевірки відповідності перехідних процесів вихідної моделі та запропонованої еквівалентної моделі було виконано її моделювання за умов

одиначної ступінчастої (сходинкової) задаючої дії. Побудова характеристик моменту і швидкості виконана у відносних одиницях. Результати моделювання наведені на рисунку 2.9.

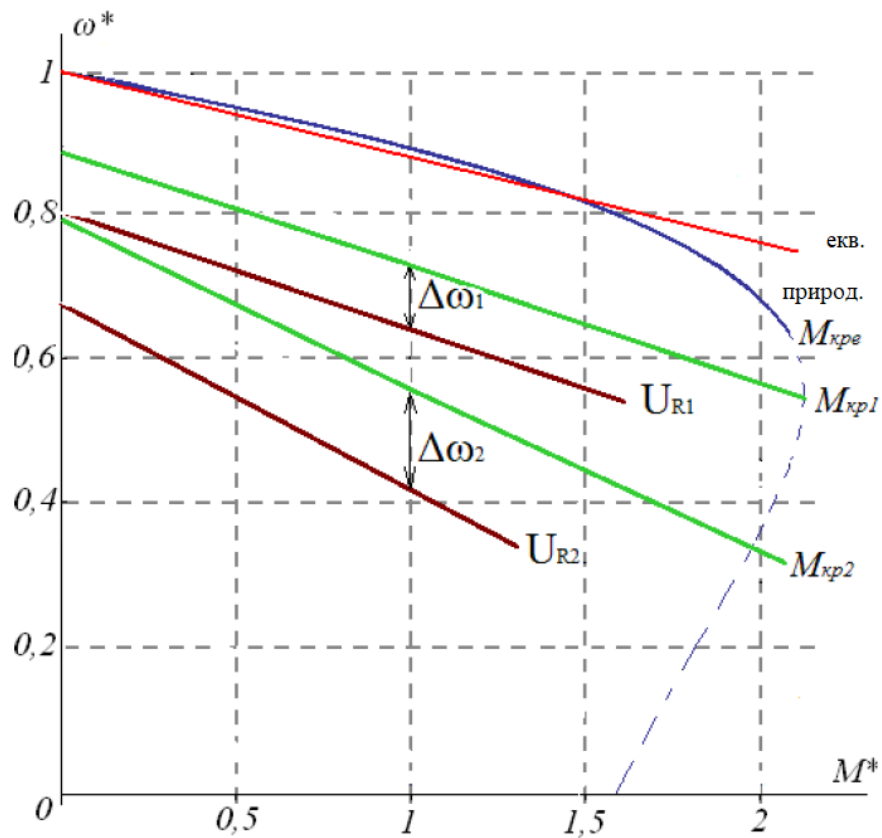


Рисунок 2.9 – Статичні характеристики МПЖ, отримані зі структурної схеми ($U_{R2} > U_{R1}$, $\Delta\omega_{R2} < \Delta\omega_{R1}$)

Основні характеристики перехідного процесу для швидкості:

- для вихідної моделі: час перехідного процесу — 0,17 с, перерегулювання — 0%.
- для еквівалентної моделі: час перехідного процесу — 0,16 с, перерегулювання — 0%.

Основні характеристики перехідного процесу для моменту:

- для вихідної моделі: час перехідного процесу — 0,17 с, максимальне значення — 1,8 відн. од.
- для еквівалентної моделі: час перехідного процесу — 0,16 с, максимальне значення — 1,74 відн. од.

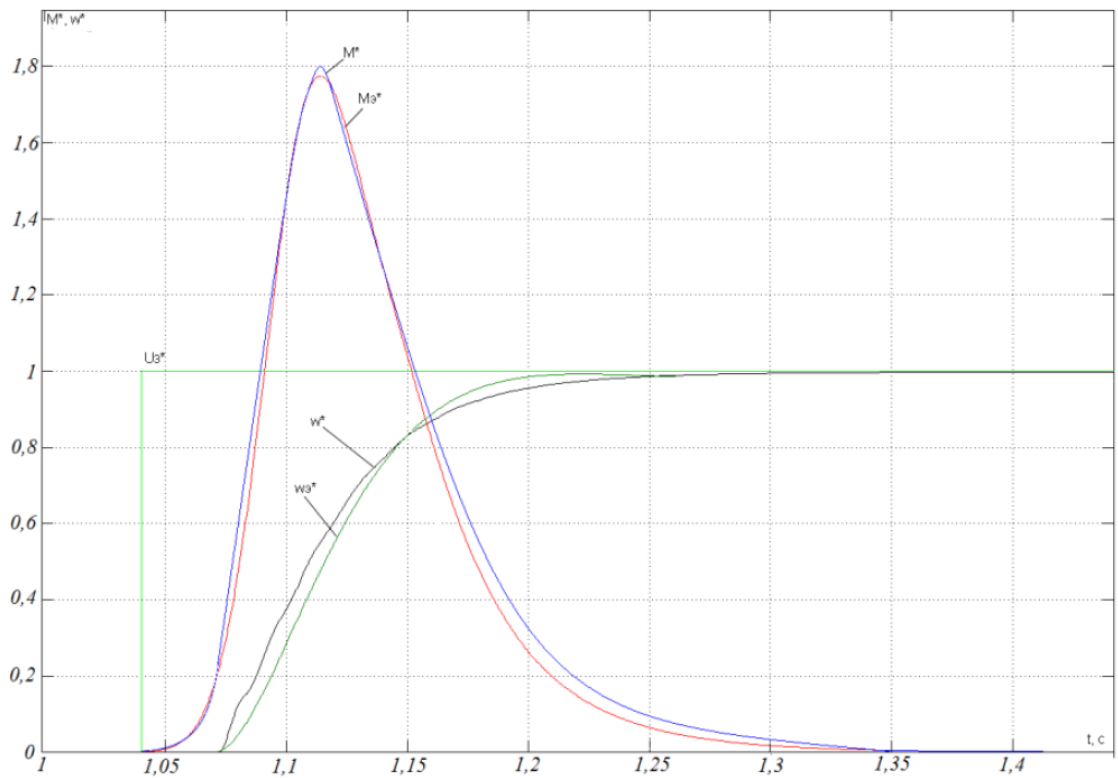


Рисунок 2.10 – Моделювання вихідної та еквівалентної математичних моделей МПЖ

Відмінність між перехідними процесами вихідної та еквівалентної моделей можна пояснити припущеннями, зробленими при спрощенні еквівалентної моделі. Різниця в часі перехідного процесу становить 5%, а різниця в амплітудних значеннях моменту — 3%.

2.4 Математичний опис електромагнітних процесів в асинхронному електродвигуні за частотно-параметричного управління

Аналітичний опис електромагнітних процесів в асинхронному електродвигуні, який працює за запропонованою схемою, у векторній формі для ортогональної рухомої системи координат g_i , що самоорієнтується, представляється системою рівнянь записаною для усталеного режиму:

$$\begin{cases} U_1 = L_s \cdot \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_m \cdot \frac{d\bar{i}_2}{dt} + j \cdot \omega_g \cdot L_s \cdot \bar{i}_1 + j \cdot \omega_g \cdot L_m \cdot \bar{i}_2 + r_1 \cdot \bar{i}_1; \\ -U_2 = L_r \cdot \frac{d\bar{i}_2}{dt} + L_m \cdot \frac{d\bar{i}_1}{dt} + j \cdot \omega_{gs} \cdot L_r \cdot \bar{i}_2 + j \cdot \omega_{gs} \cdot L_m \cdot \bar{i}_1 + r_2 \cdot \bar{i}_2; \\ M = -\frac{3}{2} \cdot p_n \cdot L_m \cdot [\bar{i}_1 \times \bar{i}_2], \end{cases} \quad (2.6)$$

де U_1 – напруга на статорі асинхронної машини;

U_2 – додаткову напругу в колі ротора;

ω_g, ω_{gs} – швидкість обертання системи координат щодо нерухомого статора і щодо обертового ротора.

Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь достатня для вирішення щодо будь-якої зі змінних i_1, i_2, M . Беручи до уваги, що в режимах похідні від змінних величин рівні нулю, вирішивши систему рівнянь щодо i_2 , отримаємо:

$$\begin{cases} U_1 \cdot s \cdot \cos \delta - U_2 \cdot \frac{L_s}{L_m} = I_2 \cdot \left(\frac{r_2 \cdot L_s}{L_m} + \frac{r_1 \cdot s \cdot L_r}{L_m} \right); \\ -U_1 \cdot s \cdot \sin \delta - \frac{r_1}{\omega_0 \cdot L_m} \cdot U_2 = I_2 \cdot \left(\frac{r_1 \cdot r_2}{\omega_0 \cdot L_m} - \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{L_m^2} \cdot s \cdot \omega_0 \right), \end{cases} \quad (2.7)$$

де ω_0 – частота обертання магнітного поля статора;

I_2 – значення струму, що діє, в ланцюгу ротора.

Однак оскільки в пропонованій системі електроприводу через різні елементи схеми протікає змінний струм різної частоти, зручніше

використовувати в розрахунках струм у випрямленому колі, здійснивши приведення всіх елементів схеми кола випрямленого струму.

Схема заміщення роторного ланцюга, наведеної до ланки постійного струму представлена рисунку 2.11, де: E_{dp} – наведене до ланці постійного струму ЕРС роторного кола; I_d – струм, що протікає у ланці постійного струму; C – конденсатор у колі постійного струму; r_2 – наведений активний опір ротора; x_r – наведений реактивний опір ротора; x_{ic0} – наведений індуктивний опір обмотки індукційного опору; x – наведений індуктивний опір магнітопроводу індукційного опору; r – наведений активний опір магнітопроводу індукційного опору.

Випрямлене ЕРС роторного кола з ланки постійного струму надходить на вхід інвертора і обчислюється за такою формулою

$$E_{dp} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6} \cdot E_{2k} \cdot s - \frac{3}{\pi} \cdot z_r \cdot I_d, \quad (2.8)$$

де E_{2k} – ЕРС роторного кола АД з ФР; z_r – повний опір роторного кола; I_d – струм, що протікає у ланці постійного струму.

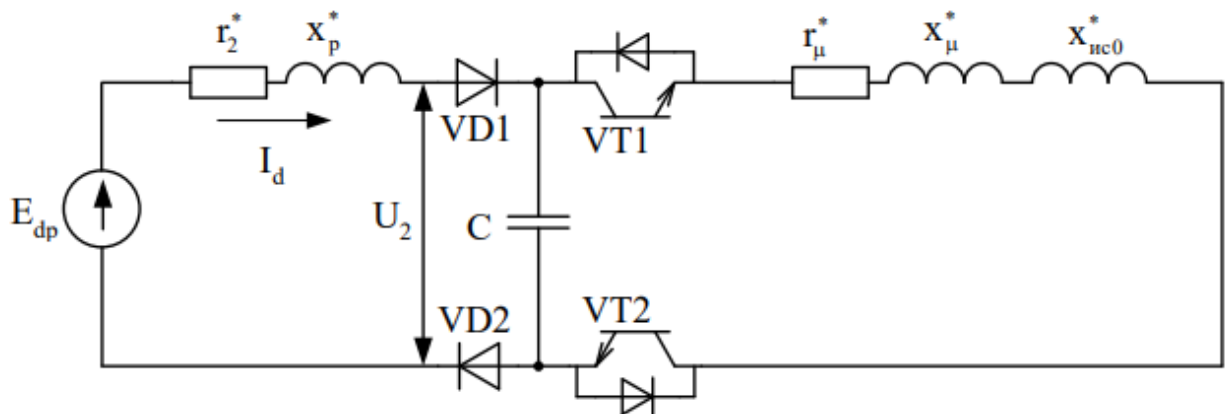


Рисунок 2.11 – Схема заміщення кола роторного, приведенного до ланки постійного струму

На рисунку 2.12 приведені залежності випрямленої ЕРС від швидкості та ковзання електродвигуна.

У блоці управління ключами інвертора задається максимальна вихідна

частота. Вона за допомогою компаратора порівнюється з сигналом зворотного зв'язку, який формується регулятором струму. Результуючий сигнал завдання вихідної частоти інвертора визначає комплексний опір індукційного резистора.

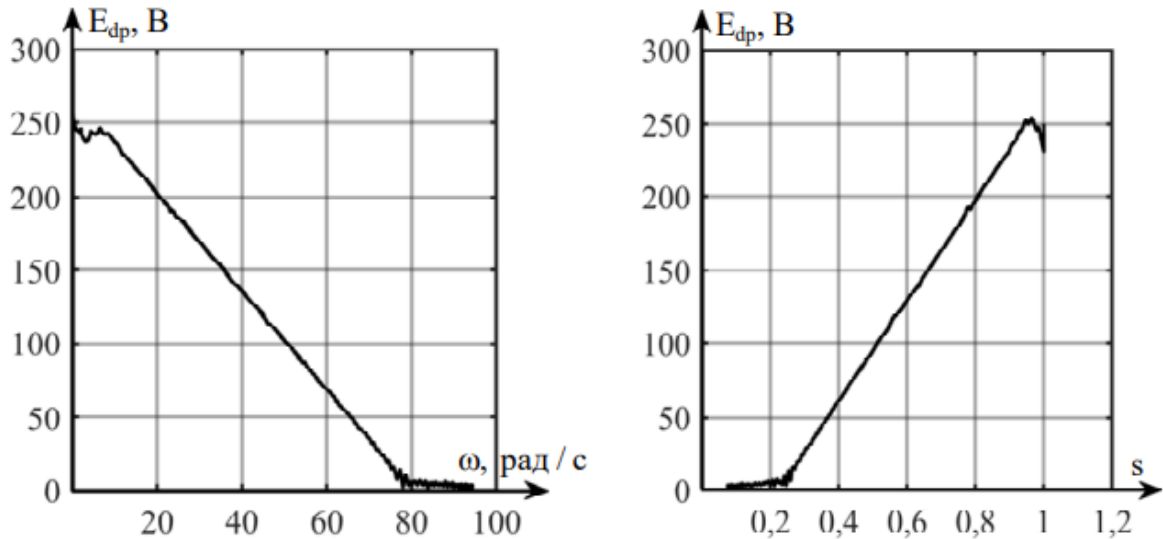


Рисунок 2.12 – Залежність випрямленої напруги кола ротора АД з ФР від швидкості (а) та ковзання (б)

Внаслідок роботи системи управління відбувається відкриття пари ключів інвертора та утворюється ланцюг, приведений на рисунку 2.11. У початковий момент протікання струму відбувається заряд конденсатора, розташованого у ланці постійного струму.

2.5 Висновок:

Аналізуючи проведені дослідження АД з ФР та побудови графіків, можна зробити такі висновки: 1) При регулюванні швидкості шляхом зміни амплітуди додаткової напруги на роторі під дією навантаження відбувається зменшення швидкості обертання, машина має перевантажувальну здатність не вище за природну. Робота машини при швидкості нижче $0,5\omega_0$ при регулюванні швидкості зміною амплітуди недоцільна через зменшення моменту двигуна.

2) Приведено математичний опис електромагнітних процесів в асинхронному електродвигуні за частотно-параметричного управління.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

3.1 Електропривод з частотно-параметричним регулятором в колі ротора АД з ФР

Пропонована система електроприводу реалізує параметричний спосіб пуску асинхронного електродвигуна шляхом включення обмотку ротора індукційного опору. Її особливістю є введення у ланку постійного струму проти ЕРС інвертора, що є притаманним каскадному управлінню АД з ФР.

У ротор асинхронного двигуна включається дволанковий перетворювач частоти, виконаний з урахуванням автономного інвертора напруги. До трифазного виходу перетворювача частоти підключається індукційний частотно залежний опір.

На рисунку 3.1 приведена структурна схема пропонованого електроприводу на базі АД з ФР.

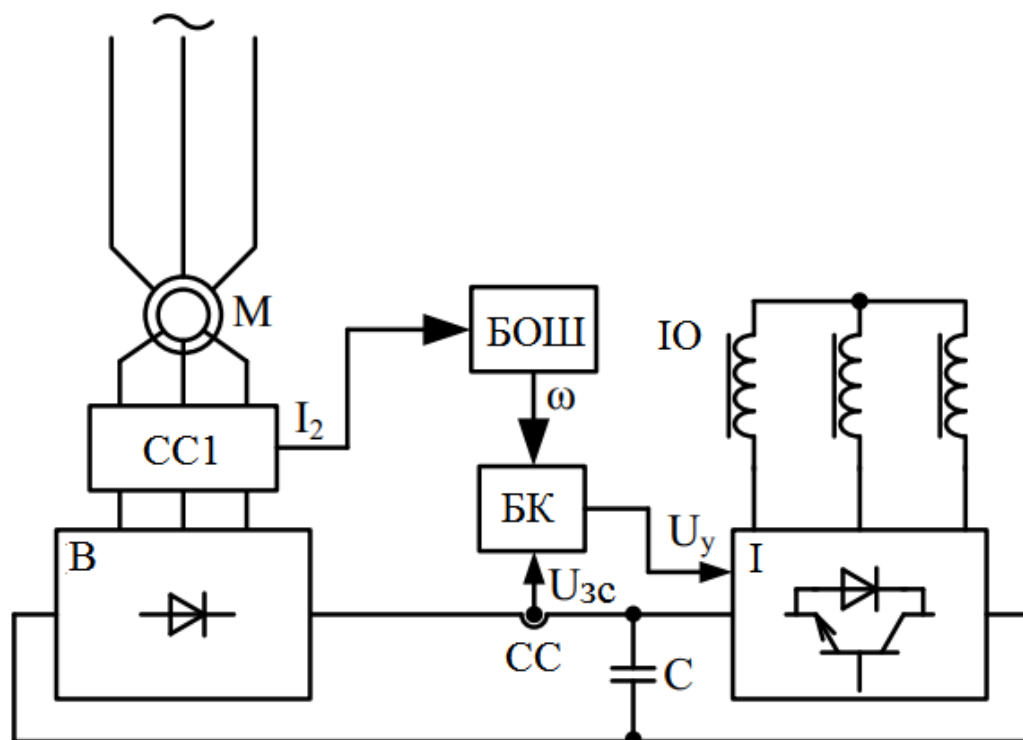


Рисунок 3.1 – Електропривод з частотно-параметричним регулятором
в колі ротора

Система управління інвертором (рисунок 3.2) являє собою двоконтурну систему підпорядкованого регулювання зі зворотними зв'язками за швидкістю та струмом, що містять коригування струму завдання, що є зворотним зв'язком для контуру завдання вихідної частоти інвертора.

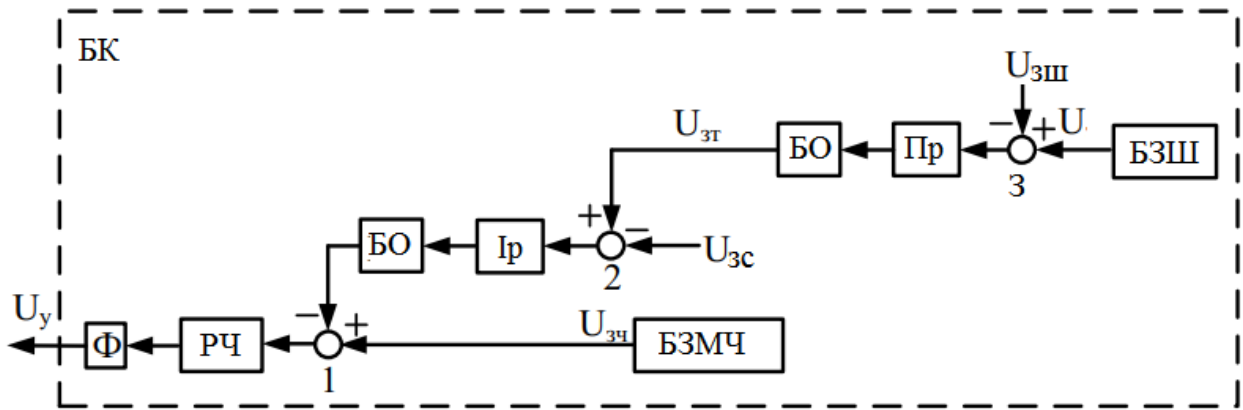


Рисунок 3.2 – Структурна схема блоку керування електропривода

Електропривод містить: асинхронний електродвигун з фазним ротором (М), сенсор струму в колі ротора (СС1), некерований мостовий діодний випрямляч (В), конденсатор у ланці постійного струму (С), сенсор струму (СС), автономний інвертор напруги (І), блок управління ключами інвертора (БК), блок обчислення швидкості (БОШ), частотно-залежний індукційний опір (ІО).

Блок керування містить: блок завдання швидкості (БЗШ), блок завдання максимальної частоти (БЗМЧ), регулятор швидкості П-типу (Пр), регулятор струму І-типу (Ір), блоки обмеження (БО), регулятор частоти (РЧ), функціональний перетворювач (Ф), суматори (1,2,3).

Дана схема електропривода дозволяє реалізувати плавний пуск електродвигуна із заданим обмеженням пускового моменту до необхідної швидкості. Підтримуючи постійним струм у ланці постійного струму система управління забезпечує стабілізацію пускового моменту.

Опишемо роботу запропонованої системи електроприводу.

Трифазна обмотка статора електродвигуна підключається до мережі живлення, що призводить до виникнення ЕРС в обмотці ротора. Оскільки

ковзання в початковий момент пуску максимальне то наведена в роторі ЕРС буде теж максимальною. Наведена в обмотці ротора ЕРС через сенсори струму подається на вхід випрямляча, де вона випрямляється трифазним мостовим діодним випрямлячем і через сенсор струму і конденсатор надходить на вхід автономного інвертора напруги.

У блоці керування інвертором задається необхідна швидкість, яка надходить на позитивний вхід суматора 3. На від'ємний вхід суматора 3 блоку обчисленої швидкості, надходить сигнал зворотного зв'язку по швидкості. Сигнал неузгодженості швидкості з виходу суматора 3 надходить на регулятор швидкості П-типу, звідки пройшовши через блок обмеження, потрапляє на позитивний вхід суматора 2.

Сигнал неузгодженості струму з виходу суматора 2 надходить на регулятор струму І-типу. З виходу регулятора струму пройшовши через блок обмеження сигнал неузгодженості струму надходить на від'ємний вхід суматора 1. На позитивний вхід суматора 1 задається сигнал, що визначає максимальну вихідну частоту інвертора. Сигнал неузгодженості частоти з виходу суматора 1 надходить на регулятор частоти звідки через функціональний перетворювач задаються сигнали управління ключами інвертора. Відбувається відкриття ключів інвертора і випрямлена напруга ротора надходить на індукційний резистор і по колу, що складається з двох обмоток індукційного резистора, інвертора, ланки постійного струму, сенсора струму, випрямляча, двох фаз обмотки ротора починає протікати струм. У цей час відбувається заряд конденсатора, який надалі починає обмінюватися енергією з індукційним опором, створюючи коливальний контур, що призводить до виникнення проти-ЕРС інвертора, що сприяє стабілізації пускового струму і моменту.

По мірі розгону електродвигуна ЕРС наводиться в обмотці ротора зменшується внаслідок зменшення ковзання. Система управління, прагнучи підтримати сталість струму, що протікає у ланці постійного струму, починає знижувати завдання на вихідну частоту інвертора, впливаючи на

комплексний опір індукційного опору і зменшуючи опір його магнітної системи. Темп розгону електроприводу визначається шляхом зміни коефіцієнта I-регулятора струму. Після досягнення двигуном швидкості близької до швидкості на природній характеристиці, вихідна частота інвертора встановлюється в 0, що відповідає постійному відкриттю двох напівпровідникових ключів інвертора. Один в анодній групі, інший у катодній. При переході на знижену швидкість система управління починає збільшувати вихідну частоту інвертора до досягнення електродвигуном необхідної швидкості.

3.2 Імітаційна модель частотно-параметричного електроприводу та динамічні характеристики електропривода

3.2.1 Загальна характеристика середовища імітаційного моделювання

В літературі з комп'ютерного моделювання систем електроприводів можна знайти докладний математичний опис кожного його компонентів: двигунів, перетворювачів, систем управління. У своїй сукупності цей опис являє собою математичну модель електроприводу. Комп'ютерна модель - це програмна реалізація математичної моделі, реалізована за допомогою спеціальних програмних пакетів. Такі програми дозволяють знизити трудомісткість розрахунків, виключивши складання складних диференціальних рівнянь, що описують систему. Натомість досліднику достатньо лише скласти необхідну схему, а програма виконає всі необхідні розрахунки, надавши у зручному вигляді результати проведеного комп'ютерного моделювання [16].

Існує досить велика кількість різноманітних програмних засобів, що автоматизовано здійснюють математичні розрахунки та моделювання на їх основі фізичних процесів. У цій роботі з цією метою застосовується система MATLAB із програмним пакетом Simulink.

MATLAB застосовується спеціалістами різних галузей науки та техніки, маючи у своєму складі безліч спеціалізованих блоків, об'єднаних у розділи – бібліотеки. Кожен блок є віртуальним уявленням будь-якого фізичного об'єкта (наприклад, двигуна, діода, резистора) або математичної дії (від простої складання до диференціальних рівнянь). За допомогою комбінацій цих блоків створюються динамічні моделі систем та пристроїв [17].

Ці можливості надає програмний пакет Simulink. У ньому реалізовані принципи візуально-орієнтованого програмування, що дозволяють складати окремі блоки системи практично будь-якої складності. Найскладніші рівняння, що описують дані системи, формуються та розраховуються без участі користувача, полегшуючи та прискорюючи його роботу. Користувальницький інтерфейс зручний, включає безліч різноманітних засобів візуалізації процесів, що відбуваються при моделюванні, відрізняється достовірністю і надійністю. Крім іншого, бібліотеки Simulink постійно поповнюються та включають у собі дедалі більше нових блоків.

До складу програмного пакета Simulink входять понад тридцять бібліотек. В рамках електроприводу використовується бібліотека SimPowerSystems, що містить блоки для моделювання електротехнічних пристроїв. До її складу входять моделі пасивних та активних електротехнічних елементів, напівпровідникових пристроїв, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі тощо.

За допомогою комбінування можливостей бібліотек Simulink та SimPowerSystems є можливість здійснювати моделювання повної системи електроприводу як силової частини, так і системи управління. При цьому крім отримання всіх необхідних графіків зміни величин, як від часу, так і один від одного, здійсненні гармонійний аналіз струмів і напруг, отримання частотних характеристик і т.п.

Бібліотека SimPowerSystems досить широка, проте, якщо користувачеві потрібен деякий блок, який у ній відсутній, можна створити свій власний,

використовуючи можливості об'єднання блоків різних бібліотек у підсистеми [17].

3.2.2 Імітаційна модель частотно-параметричного електроприводу

Для дослідження схеми, що розглядається, була зібрана комп'ютерна модель в програмному пакеті MatLab Simulink. Кожен блок моделі є віртуальним уявленням будь-якого фізичного об'єкта (наприклад, двигуна, діода, резистора) або математичної дії (від простої складання до диференціальних рівнянь). Диференціальні рівняння, що описують кожен блок моделі, компілюються в єдину систему та розраховуються, полегшуючи процес математичного моделювання.

Для дослідження перехідних процесів було змодельовано запуск асинхронного електродвигуна потужністю 1,4 кВт. Процес пуску здійснювався під навантаженням рівним 0,9 от M_n . Пусковий момент під час розгону електродвигуна складає 1,8 от M_n , час розгону до швидкості 1,3 с. оскільки при моделюванні асинхронної машини параметри роторного ланцюга наводяться до параметрів статорної системи управління працює відносно статора. У процесі пуску системою управління інвертора здійснювалася підтримка струму в статорі електродвигуна на рівні 1,3 від I_n . У реальному асинхронному електродвигуні необхідно налаштовувати систему управління щодо струму в ланцюзі ротора, який завдяки електромагнітному зв'язку впливатиме на струм в обмотці статора. Загальний час моделювання 3 с.

Розглянемо модель та перехідні процеси, отримані в результаті моделювання. Модель складається з наступних елементів:

- Блоку, що імітує асинхронний електродвигун із параметрами, показаними на малюнку 3.3.

Block Parameters: Asynchronous Machine Wound Rotor (fundamental, SI)

Asynchronous Machine Wound Rotor (fundamental, SI)

Asynchronous machine with a wound rotor parameterized using fundamental SI parameters.

Right-click on the block and select Simscape block choices to access variant implementations of this block.

Settings

Main Impedances Initial Conditions

Stator resistance, R_s :	5.98	Ohm
Stator leakage reactance, X_{ls} :	3.925	Ohm
Referred rotor resistance, R_r' :	6.85	Ohm
Referred rotor leakage reactance, X_{lr}' :	5.558	Ohm
Magnetizing reactance, X_m :	51.81	Ohm
Stator zero-sequence reactance, X_0 :	3.9	Ohm

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Asynchronous Machine Wound Rotor (fundamental, SI)

Asynchronous Machine Wound Rotor (fundamental, SI)

Asynchronous machine with a wound rotor parameterized using fundamental SI parameters.

Right-click on the block and select Simscape block choices to access variant implementations of this block.

Settings

Main Impedances Initial Conditions

Rated apparent power:	1.4e3	V*A
Rated voltage:	380	V
Rated electrical frequency:	50	Hz
Number of pole pairs:	3	

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.3 – Параметры асинхронного электродвигуна

- Перетворювач частоти, що складається з трьох підсистем: DC, Rectifier, Inverter, представлених на рисунках 3.4, 3.5, 3.6. Для випрямлення струму ротора використовується некерований мостовий діодний випрямляч. У ланку постійного струму паралельно випрямлячу та інвертору включений конденсатор, що згладжує. Інвертор виконаний з топології автономного інвертора напруги на керованих IGBT транзисторах зі зворотними діодами.

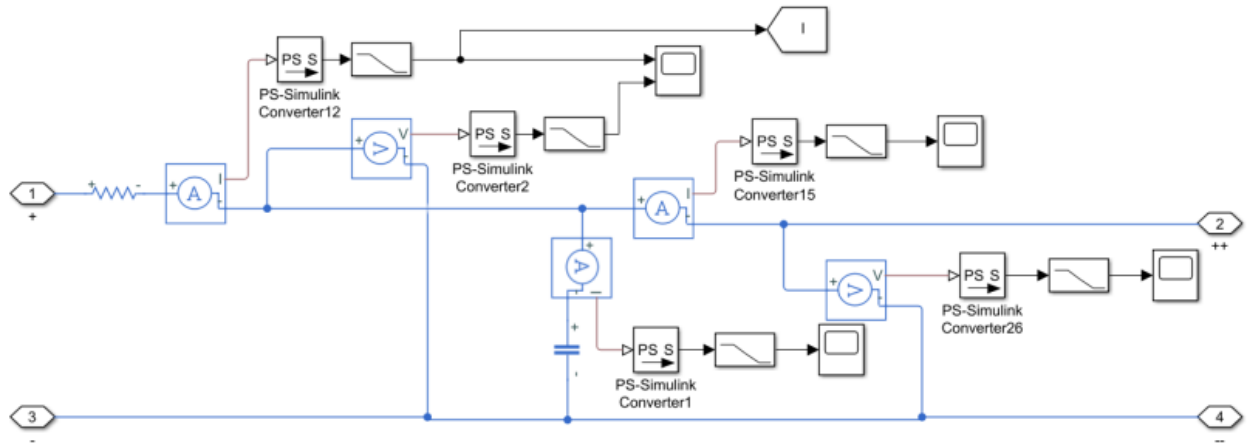


Рисунок 3.4 – Підсистема ланки постійного струму DC

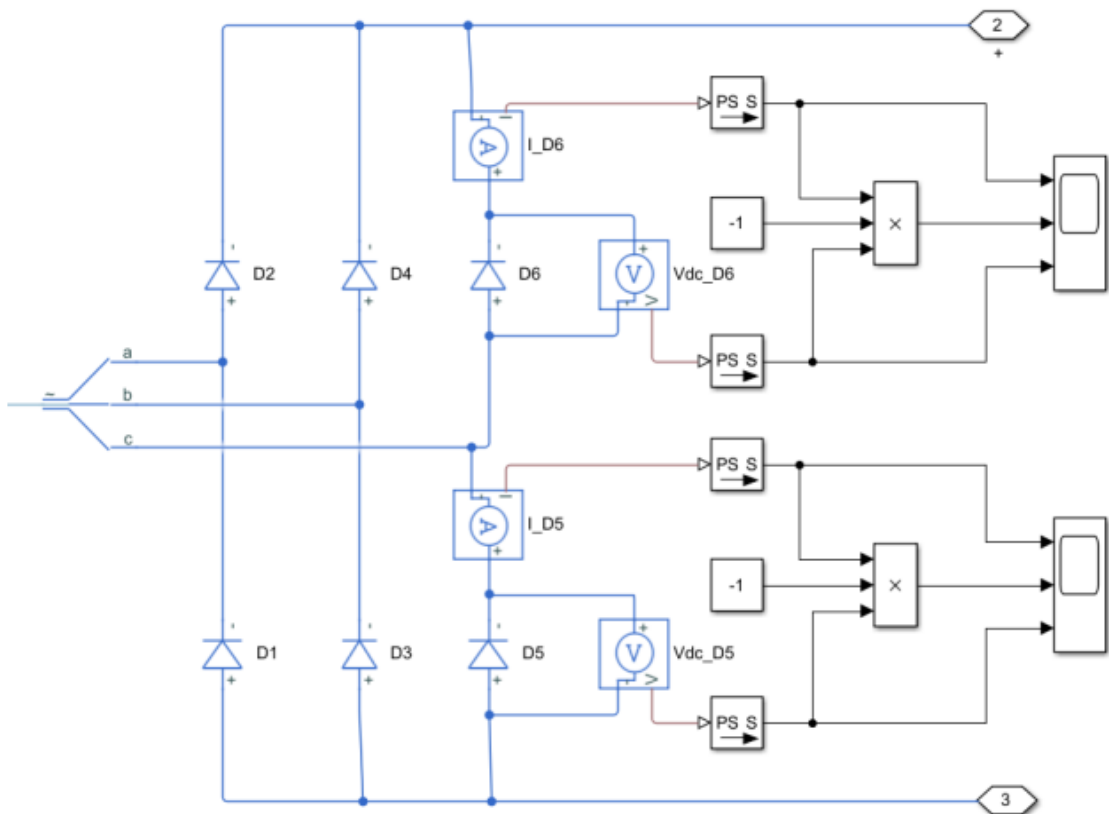


Рисунок 3.5 – Підсистема мостового діодного випрямляча Rectifier

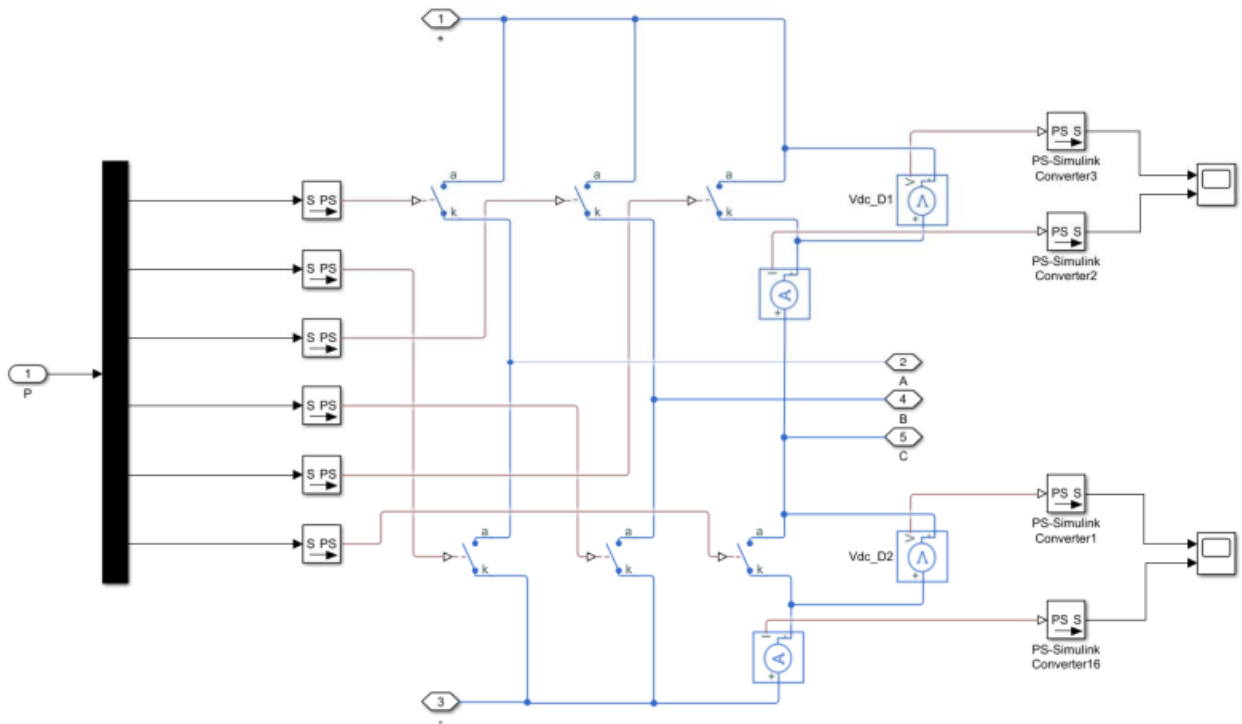


Рисунок 3.6 – Підсистема автономного інвертора напруги

- Підсистеми індукційного опору (рисунок 3.7), що складається з комплексного опору обмотки Z_0 та комплексного опору феромагнітного провідника Z_p .

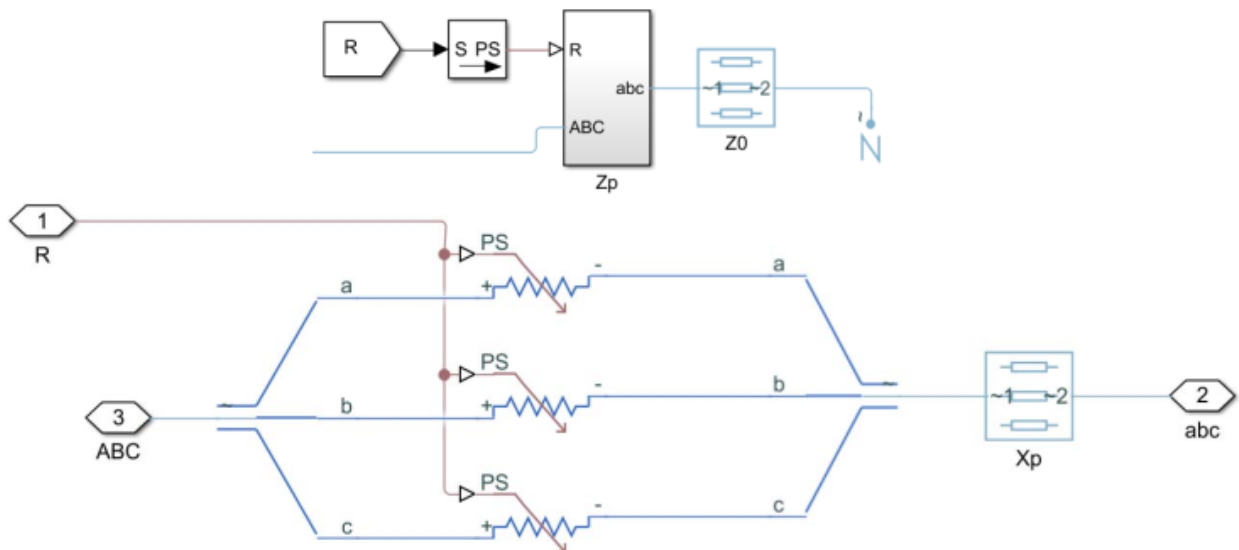


Рисунок 3.7 – Підсистема індукційного опору

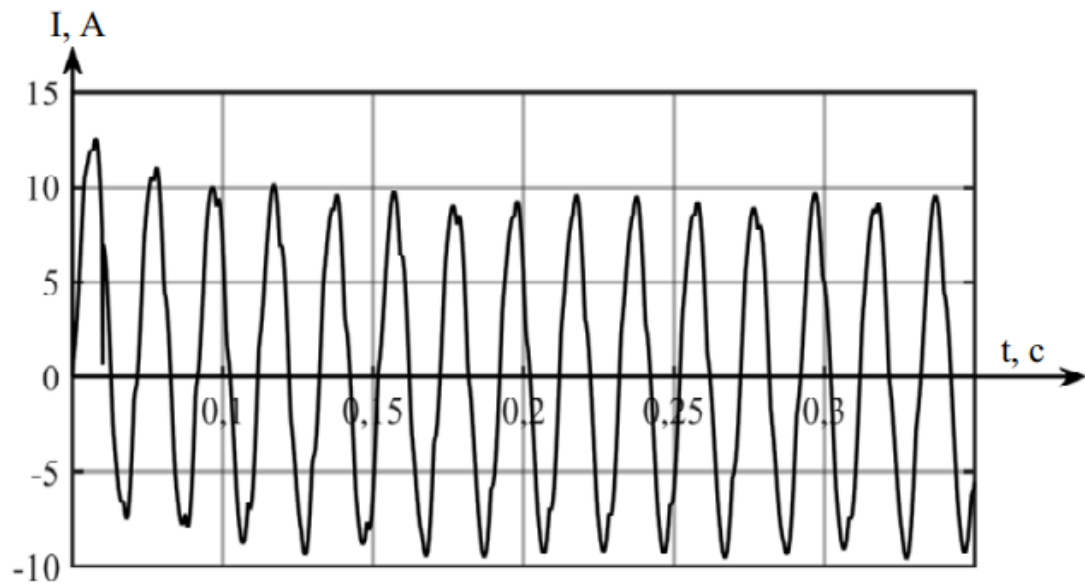


Рисунок 3.10 – Осцилограма струму в фазі А

Проаналізувавши графік можна зробити такі висновки: на статор подається струм синусоїдальної форми, у початковий час відбувається обмеження і стабілізація пускового струму.

Розглянемо розгорнуті за часом осцилограми напруги та струму фази А в роторі досліджуваного асинхронного електродвигуна, вони показані на рисунках 3.11, 3.12.

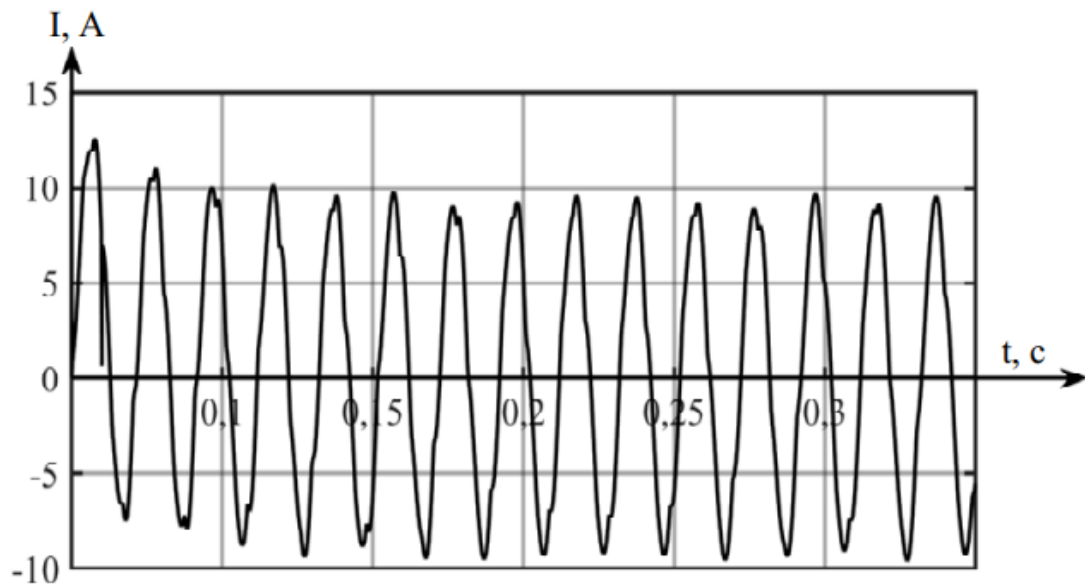


Рисунок 3.11 – Осцилограма напруги у фазі А

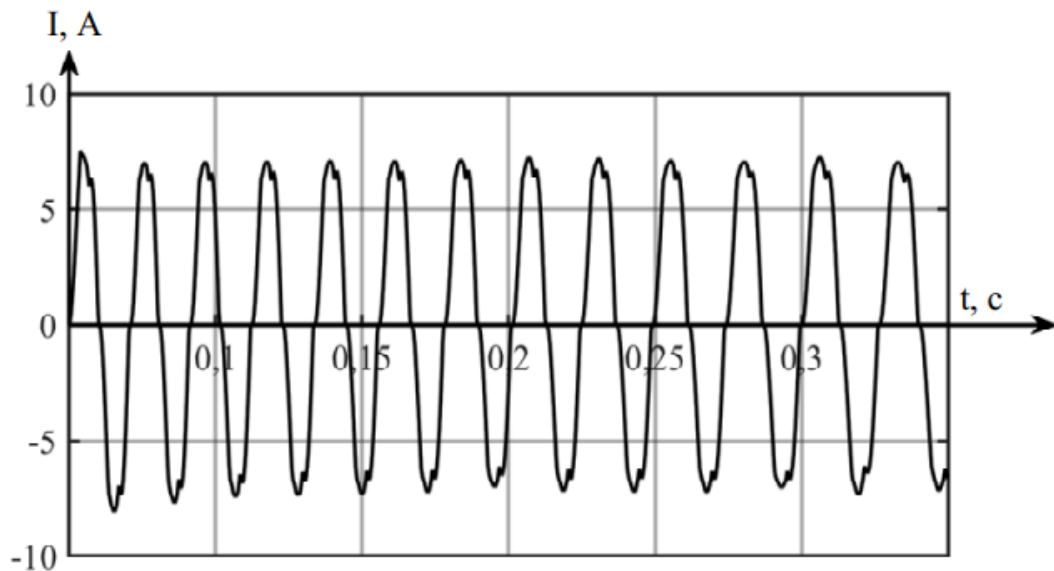


Рисунок 3.12 – Осцилограма струму в фазі А

Наведена в колі ротора в процесі роботи асинхронного електродвигуна ЕРС і струм випрямляється некерованим мостовим діодним випрямлячем.

Розглянемо перехідні процеси за напругою та струмом у ланці постійного струму. На рисунках 3.13, 3.14 показані осцилограми напруги і струму на виході випрямляча і до конденсатора C , що фільтрує. Виміряний струм використовується для роботи системи управління інвертором.

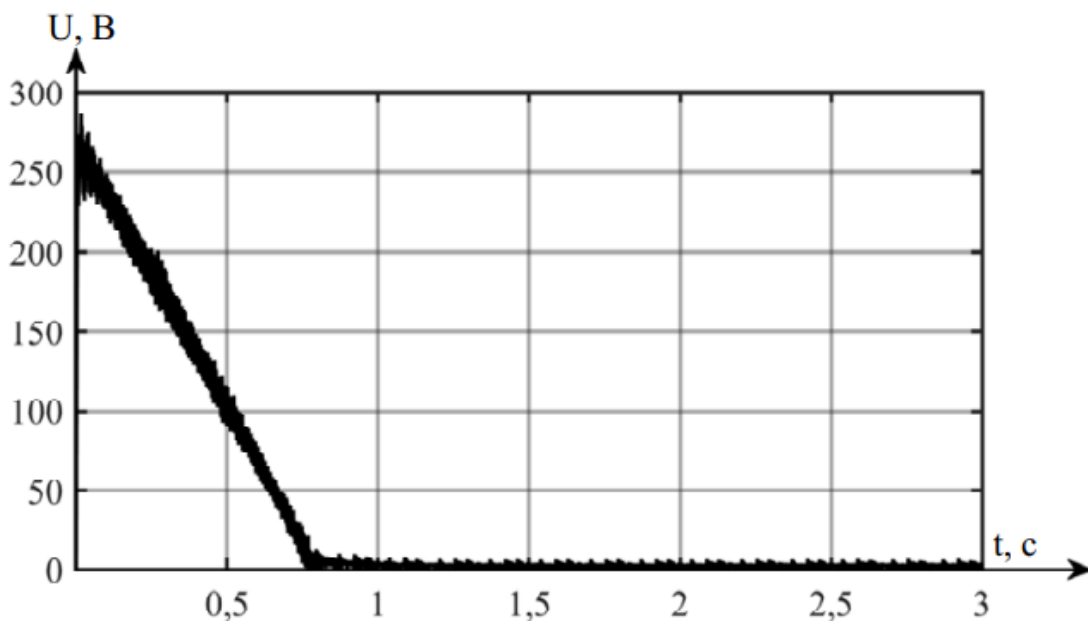


Рисунок 3.13 – Осцилограма напруги у ланці постійного струму

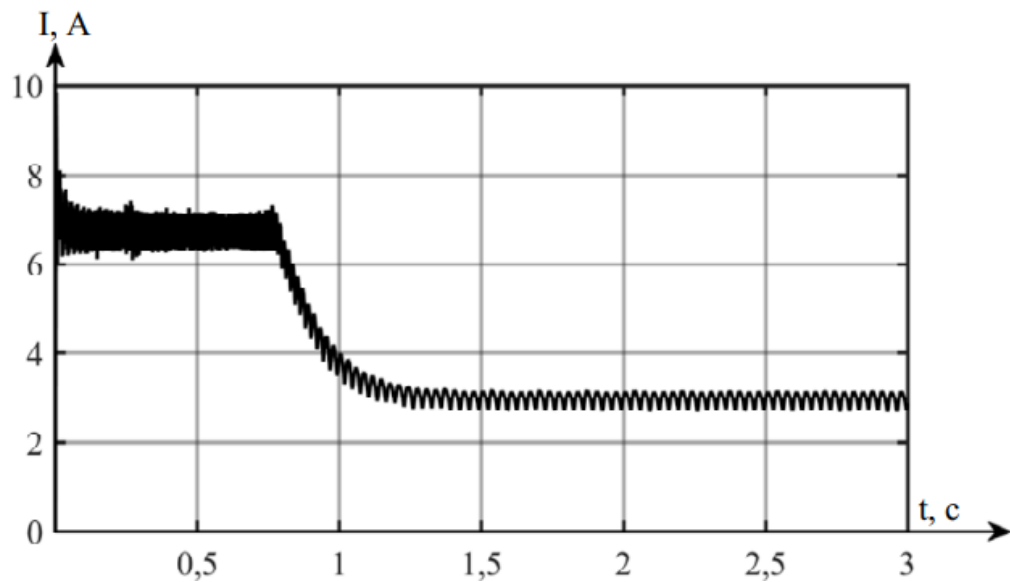


Рисунок 3.14 – Осцилограма струму у ланці постійного струму

Випрямлена напруга та струм інвертуються за допомогою автономного інвертора напруги. Управління ключами базується на широтно-імпульсній модуляції. Система керування містить три контури: швидкості, струму та частоти.

Контур швидкості здійснює завдання на пусковий струм та мінімальне значення вихідної частоти, потрібне для розгону до зниженої швидкості або переходу на неї. У контурі швидкості використовується регулятор П-типу та його вихідний сигнал показаний малюнку 3.15.

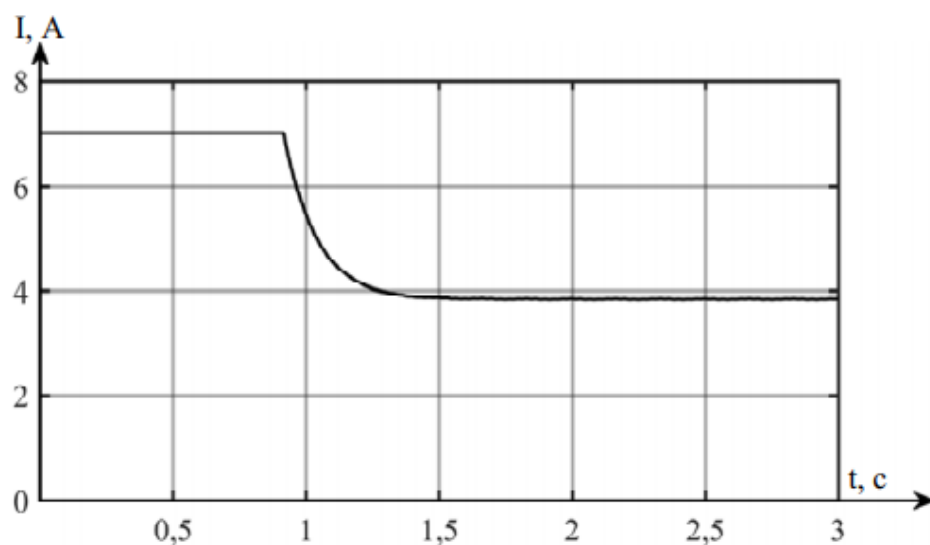


Рисунок 3.15 – Осцилограма вихідного сигналу П-регулятора швидкості

Контур струму представлений регулятором І-типу. Його вихідний сигнал здійснює завдання на частоту в залежності від виміряного значення струму у ланці постійного струму. Вихідний сигнал контуру струму приведений на рисунку 3.16.

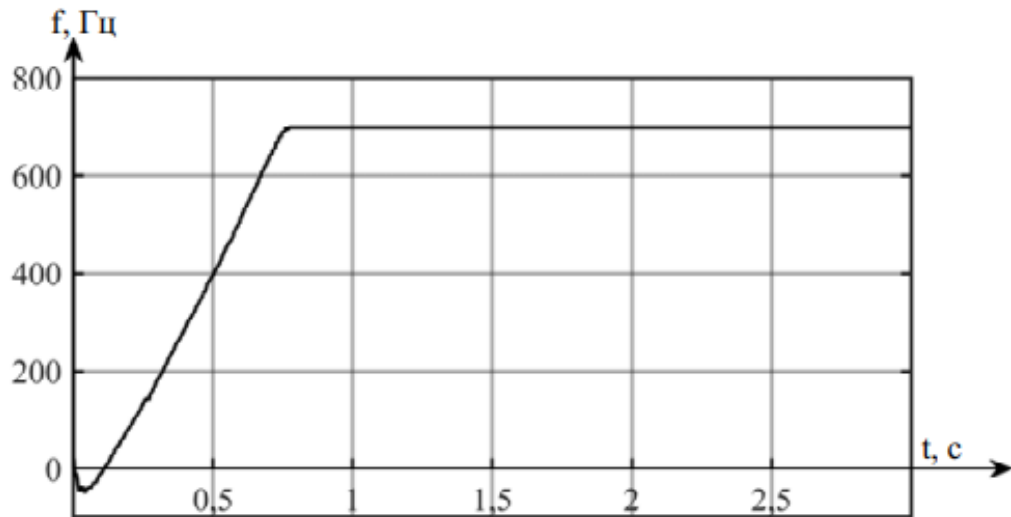


Рисунок 3.16 – Осцилограма вихідного сигналу І-регулятора струму

Інвертована напруга та струм з виходу інвертора надходять на індукційний опір. Принцип дії індукційного опору описаний у попередньому розділі. Розгорнуті за часом осцилограми напруги та струму у фазі А на опір індукції представлені на малюнках 3.17, 3.18.

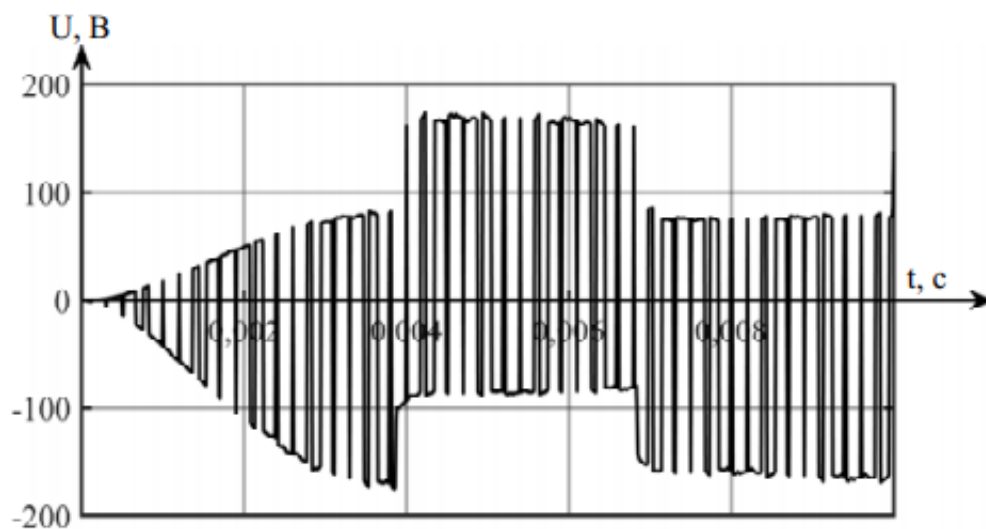


Рисунок 3.17 – Осцилограма напруги на обмотках ІО

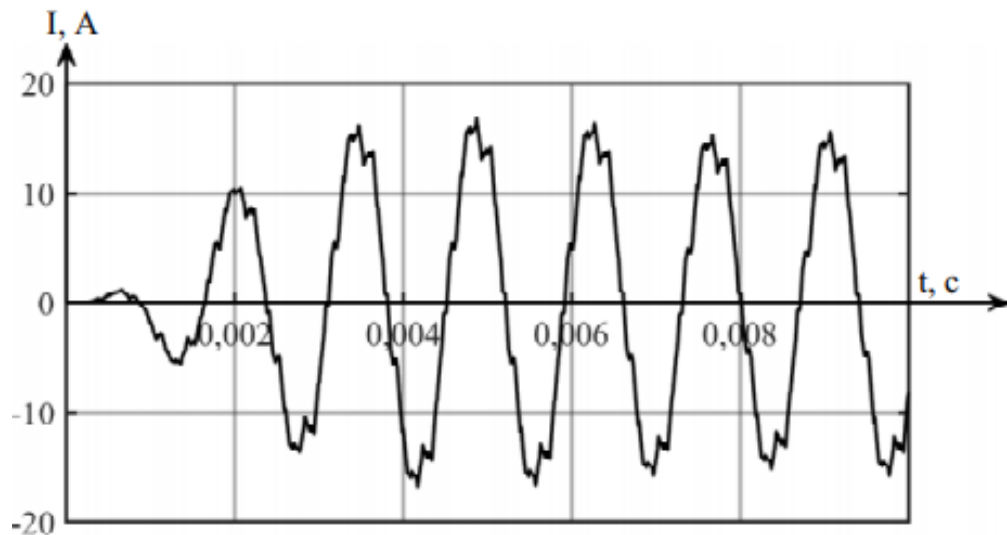


Рисунок 3.18 – Осцилограма струму в обмотках ІО

З графіків видно, що струм на виході інвертора більше струму на виході випрямляча, це пояснюється процесом заряду-розряду ємності, що фільтрує, в результаті обміну енергії між конденсатором C у ланці постійного струму і індукційним опором.

Розглянемо механічні характеристики системи, побудовані за умов роботи, описаних вище. На рисунку 3.19 приведені осцилограми $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ та $s=f(t)$. З них видно, що пропонована система забезпечує пуск електродвигуна з постійним пусковим моментом та плавним набором швидкості.

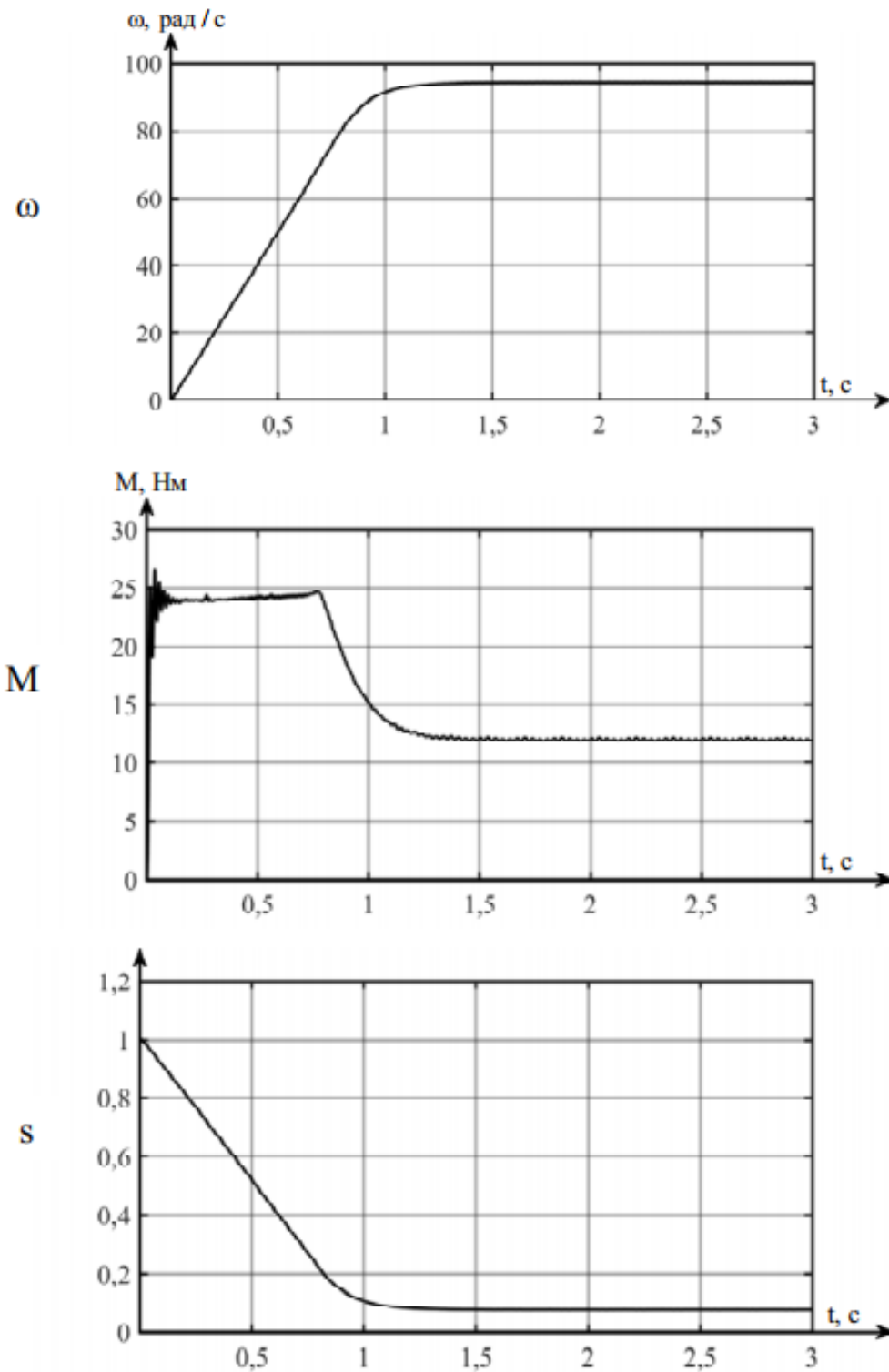


Рисунок 3.19 – Осцилограми виду $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ и $s=f(t)$

Для розімкнених регулювальних характеристик будуть побудовані залежності $\omega=f(M)$, $\omega=f(t)$, $M=f(t)$. Т.к. Гц. Робота електроприводу в режимі розімкнутої системи керування здійснюється без зворотного зв'язку по

частоті та завдання швидкості електроприводу забезпечується блоком БМЗЧ (рисунок 3.2).

На рисунку 3.20 приведені розімкнені характеристики системи електроприводу, а на рисунках 3.21, 3.22 відповідні графіки залежностей $\omega=f(t)$, $M=f(t)$.

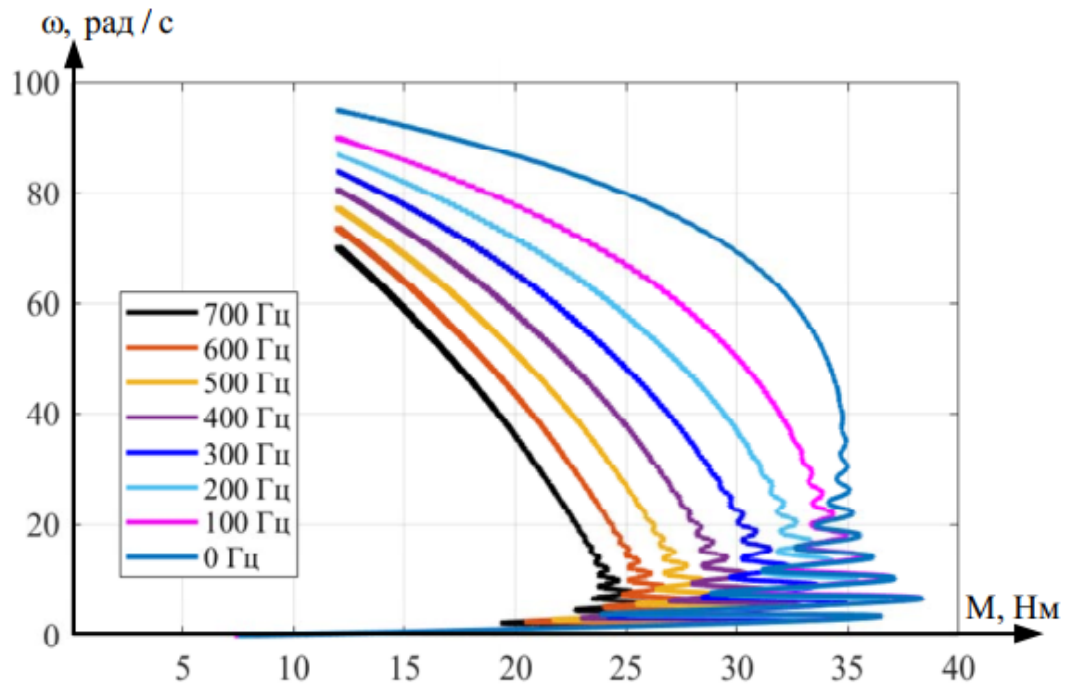


Рисунок 3.20 – Розімкнені механічні характеристики електроприводу

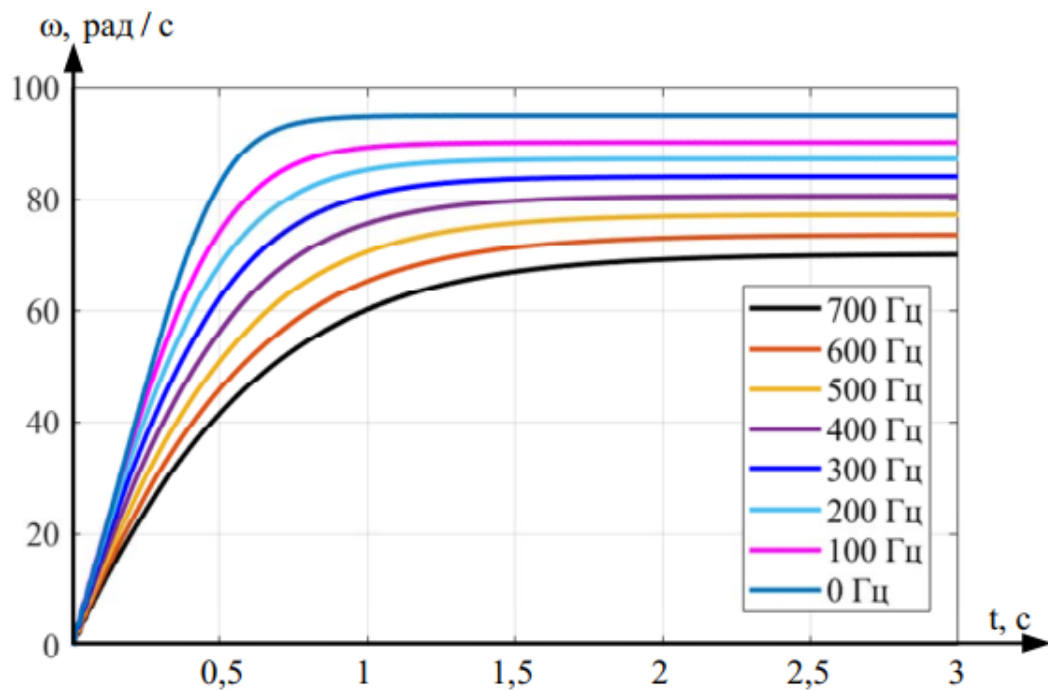


Рисунок 3.21 – Графіки залежностей $\omega=f(t)$ при різних частотах

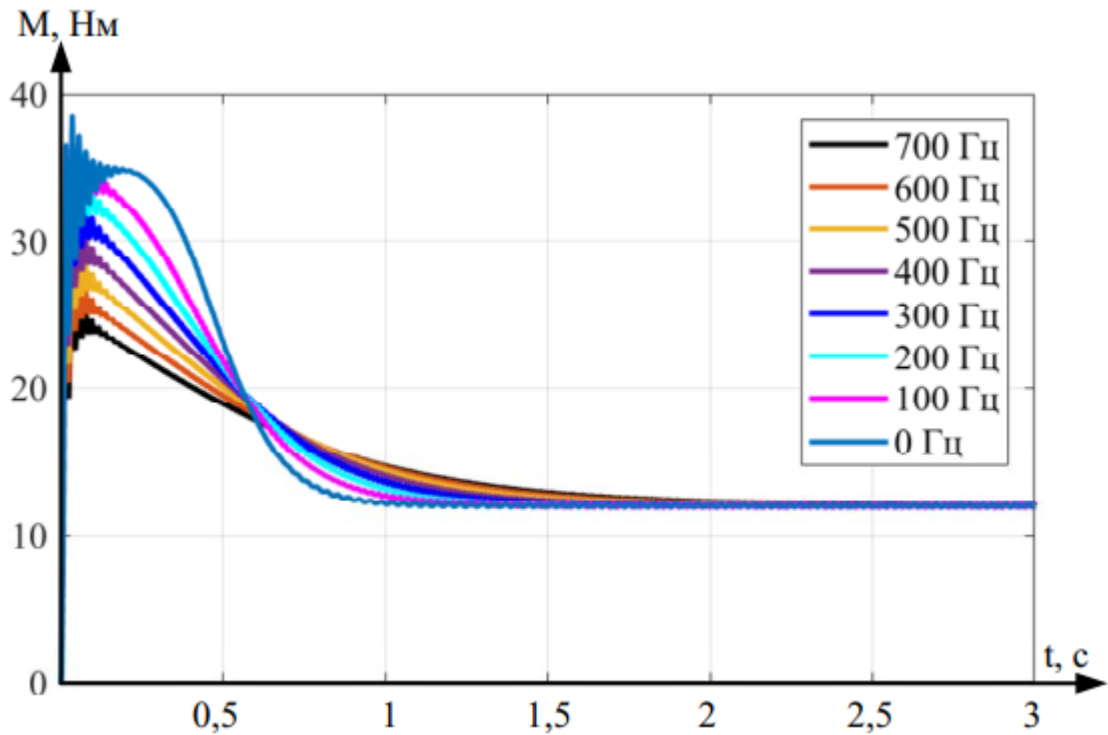


Рисунок 3.22 – Графіки залежностей $M=f(t)$ на різних частотах

Замкнуті регулювальні характеристики забезпечуються триконтурною системою керування (рисунок 3.2). Робота системи управління описана в параграфі 3.1. Оскільки управління здійснюється за параметрами ланки постійного струму, за основу розрахунку передавальних функцій регуляторів за швидкістю та струмом взято розрахунок для імпульсної системи регулювання швидкості АТ з ФР.

Осцилограми вихідних сигналів із контуру завдання частоти (рисунки 3.23).

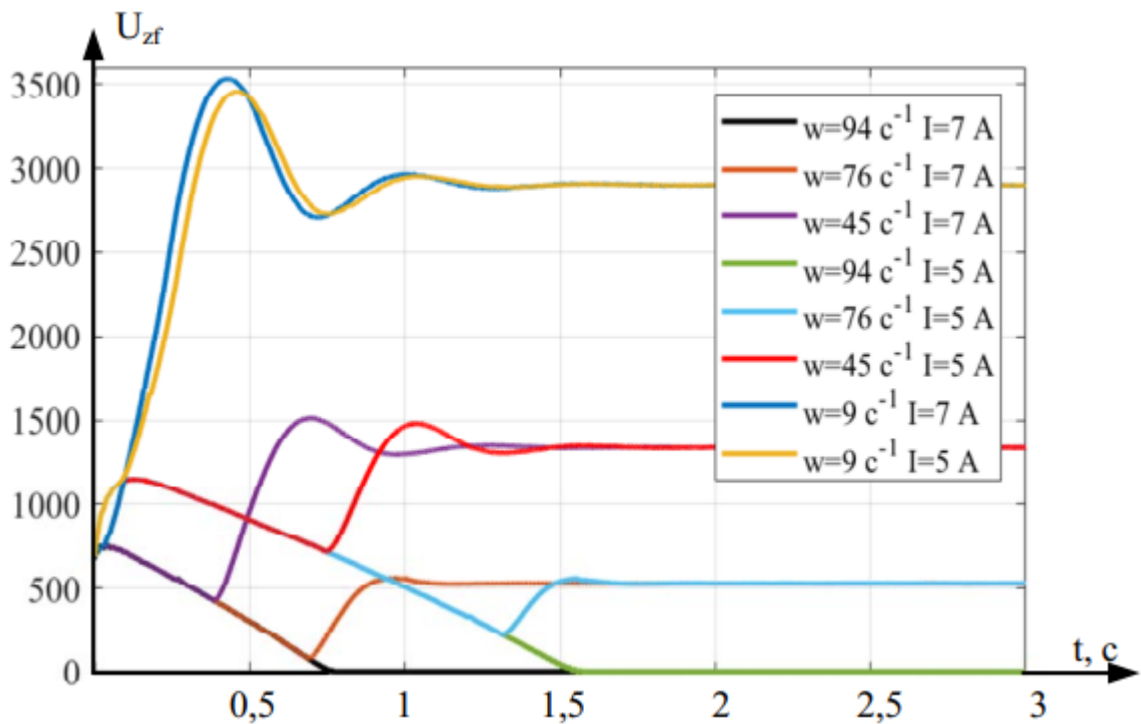


Рисунок 3.23 – Сигнали завдання на частоту

3.3 Розробка системи гальмування електропривода із самозбудженням

Найбільш простим способом гальмування асинхронного електродвигуна є електродинамічний.

Електродинамічне гальмування асинхронного двигуна — це метод зупинки або уповільнення обертів двигуна шляхом використання власних електричних характеристик двигуна під час роботи в режимі генератора. Це особливо корисно в тих випадках, коли потрібно швидко зупинити двигун або зменшити його швидкість без застосування механічних гальм.

Принцип роботи електродинамічного гальмування.

Режим генератора: Під час нормальної роботи асинхронний двигун споживає електричну енергію для створення механічної роботи. Однак коли двигун зупиняється або працює в умовах, коли швидкість обертання зменшується, він починає працювати як генератор, перетворюючи механічну енергію в електричну. Це відбувається через те, що ротор двигуна

обертається в магнітному полі статора, що індукуює в ньому електричний струм.

Струм у ротора: Коли двигун переходить в режим генератора, індуковані струми в роторі створюють магнітні сили, що протидіють його обертанням. Це явище називається зворотнім електромагнітним моментом і є основою гальмування.

Електродинамічний момент: Зворотний момент, що виникає в результаті індукції струмів в роторах, зменшує швидкість обертання ротора. Це приводить до уповільнення обертів двигуна.

Гальмування через втрати енергії: Частина механічної енергії, що витрачається на рух ротора, перетворюється в електричну енергію, яка поглинається навантаженням або скидається через зовнішні резистори. Цей процес супроводжується енергетичними втратами, що додатково сприяють гальмуванню.

Переваги електродинамічного гальмування:

Швидка зупинка: Може забезпечити значне уповільнення або повну зупинку двигуна за короткий проміжок часу.

Економічність: У порівнянні з механічними гальмами, електродинамічне гальмування не потребує додаткових механічних частин, що зменшує витрати на технічне обслуговування.

Мінімум фізичних зносів: Оскільки відсутнє механічне тертя, знижується знос деталей і підвищується довговічність обладнання.

Контроль швидкості: Можливість тонкого налаштування процесу гальмування, що важливо для забезпечення безпечних і ефективних операцій.

Недоліки електродинамічного гальмування:

Накопичення тепла: Енергія, що втрачається під час гальмування, перетворюється на тепло, що може призводити до перегріву двигуна або його елементів.

Необхідність у додаткових схемах: Для ефективного застосування електродинамічного гальмування можуть бути потрібні додаткові елементи, такі як резистори або інвертори для перетворення енергії.

При електродинамічному гальмуванні на статор асинхронної машини подається постійний струм, що створює необхідний гальмівний момент. Пропонована в роботі система електроприводу дозволяє реалізувати електродинамічний гальмування за допомогою інверторного блоку перетворювача частоти, який в момент гальмування працює як тиристорний керований випрямляч. У режимі електродинамічного гальмування ротор електродвигуна закорочується. Трифазний вихід блоку інвертора підключається до мережі, а виходи у ланку постійного струму замикаються дві фази статора асинхронної машини.

Схема електродинамічного гальмування показано на рисунку 3.24.

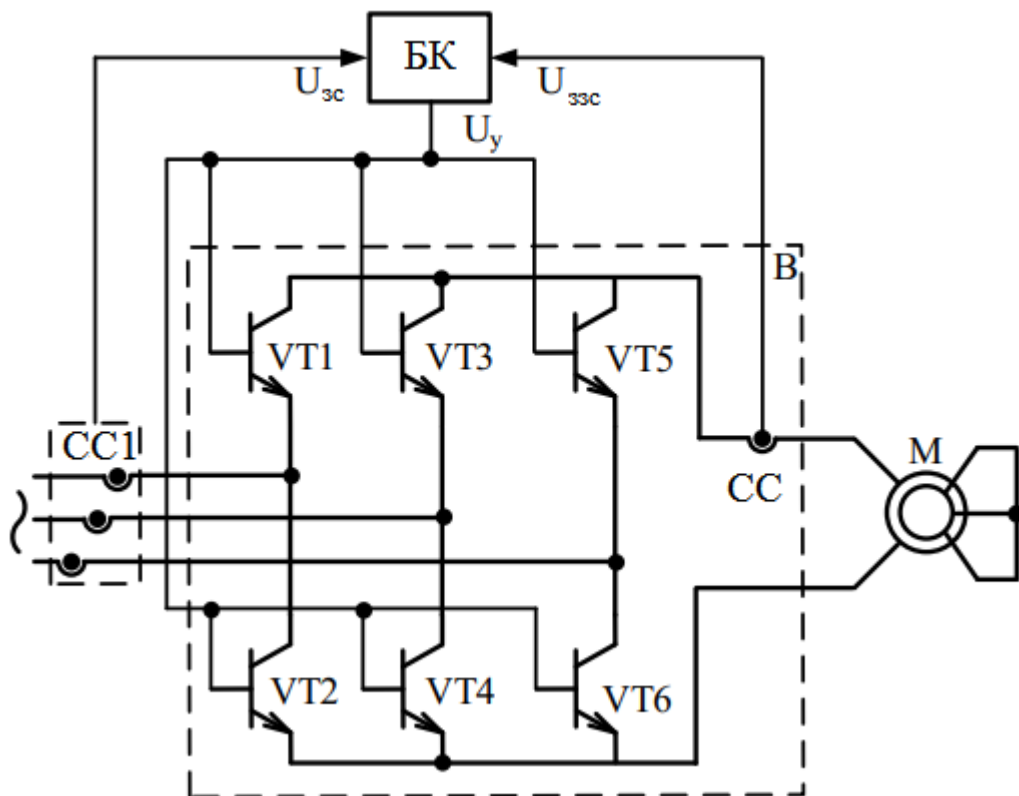


Рисунок 3.24 – Схема електродинамічного гальмування

На рисунку приведена система управління випрямлячем, виконаним з урахуванням IGBT-транзисторів. Суматором 1 порівнюється завдання на

струм у ланці постійного струму і сигнал зворотного зв'язку з датчика ДТ струму, результуючий сигнал подається на вхід ПІ-регулятора струму. Вихідний сигнал ПІ-регулятора струму пройшовши інверсне координатне перетворення Парку, суматором 2 порівнюється зі струмом мережі живлення, результуючі сигнали порівняння подаються на блок релейного регулятора струму РС. Вихідні сигнали релейного регулятора струму є керуючими і через драйвер подаються на керуючі входи транзисторів IGBT.

Однак при даному способі гальмування ми не використовуємо запасену енергію електродвигуна. Асинхронний електродвигун із фазним ротором дозволяє використовувати цю енергію при реалізації системи електродинамічного гальмування самозбудженням з додатковим підживленням контуру постійного струму.

У режимі електродинамічного гальмування самозбудженням система електроприводу, приведена на рисунку 3.1, перетворюється відповідно до рисунку 3.25, де КВ – керований випрямляч, В – некерований випрямляч, БК – блок керування, СС – датчик струму, С – ємність, М – електродвигун.

У ротор асинхронного електродвигуна залишається включений некерований діодний випрямляч, до виходу якого підключений конденсатор великої ємності, що служить обмеження кидка струму. Інверторний блок перетворювача частоти працює в режимі тиристорного керованого випрямляча і служить для підживлення ланки постійного струму.

У початковий момент часу система використовує запасену енергію електродвигуна, яка випрямляється некерованим випрямлячем і через конденсатор надходить на статор. У блоці завдання струму БЗС задається значення струму, що протікає у ланці постійного струму при гальмуванні, яке порівнюється зі значенням, що надходить від датчика струму. У міру зменшення запасеної енергії електродвигуна відбувається зниження струму у ланці постійного струму, вихідний сигнал ПІ-регулятора струму перестає дорівнювати нулю і здійснюється підживлення гальмівного контуру від зовнішнього джерела. Подальша робота блоку управління описана вище при

розгляді електродинамічного гальмування. Інтенсивність гальмування регулюється значенням струму у ланці постійного струму. В якості зовнішнього джерела живлення використовується трифазна мережа 220 В.

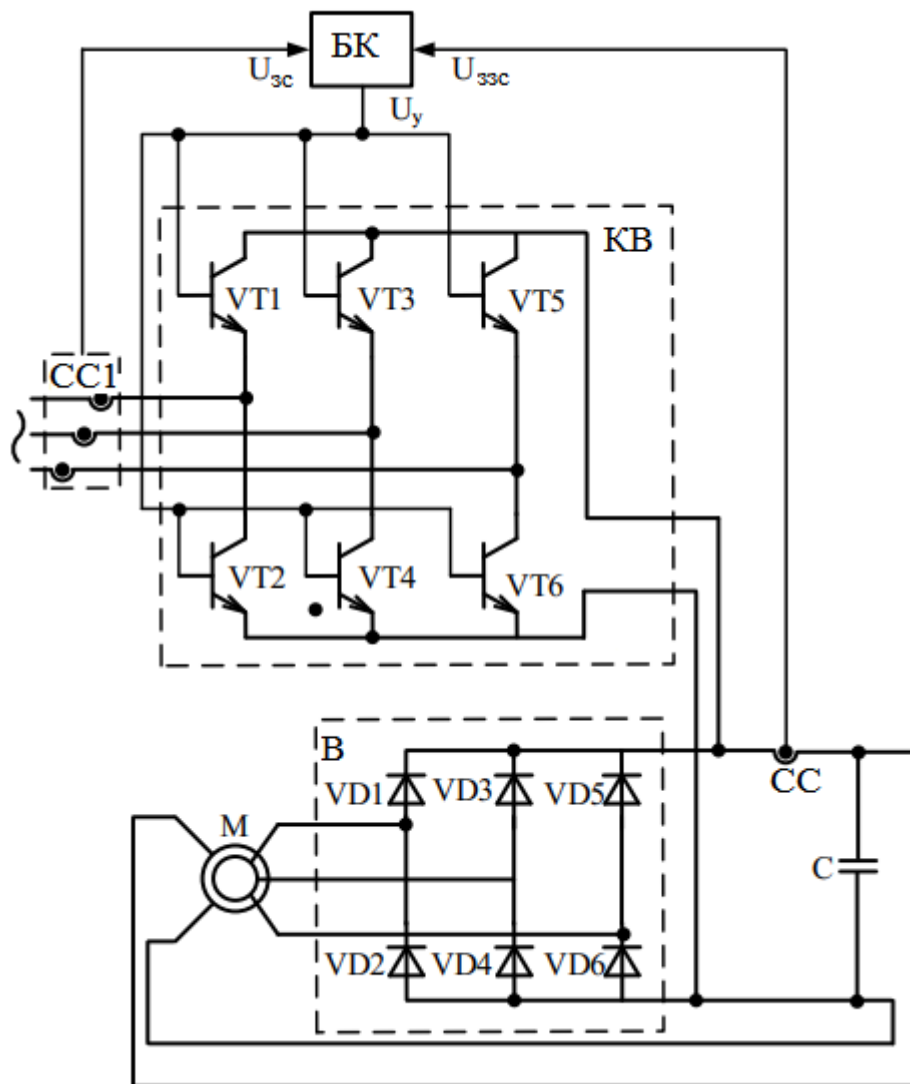


Рисунок 3.25 – Схема електродинамічного гальмування самозбудженням

Крім представлених вище способів гальмування, існує частотне гальмування, представлене в системах електроприводу ПЧ-АД. Оскільки при частотному гальмуванні запасена енергія електродвигуна розсіюється в гальмівному контурі або вимагає додаткового комплексу силових елементів для віддачі енергії в мережу, воно не розглядалося для застосування запропонованої системи електроприводу.

Реалізація частотного гальмування самозбудженням можлива лише для двигунів з k_e наближеному до 1 та має досить складну систему управління. Крім цього, воно вимагає постійного підживлення контуру постійного струму від мережі та наявності гальмівного ланцюга скидання енергії, що призводить до збільшення необхідної для гальмування кількості енергії.

Для моделювання динамічних процесів електродинамічного гальмування наведемо додсистему ланки постійного струму DC (рисунок 3.26) та підсистему ланцюга підживлення Voltage Source (рисунок 3.27).

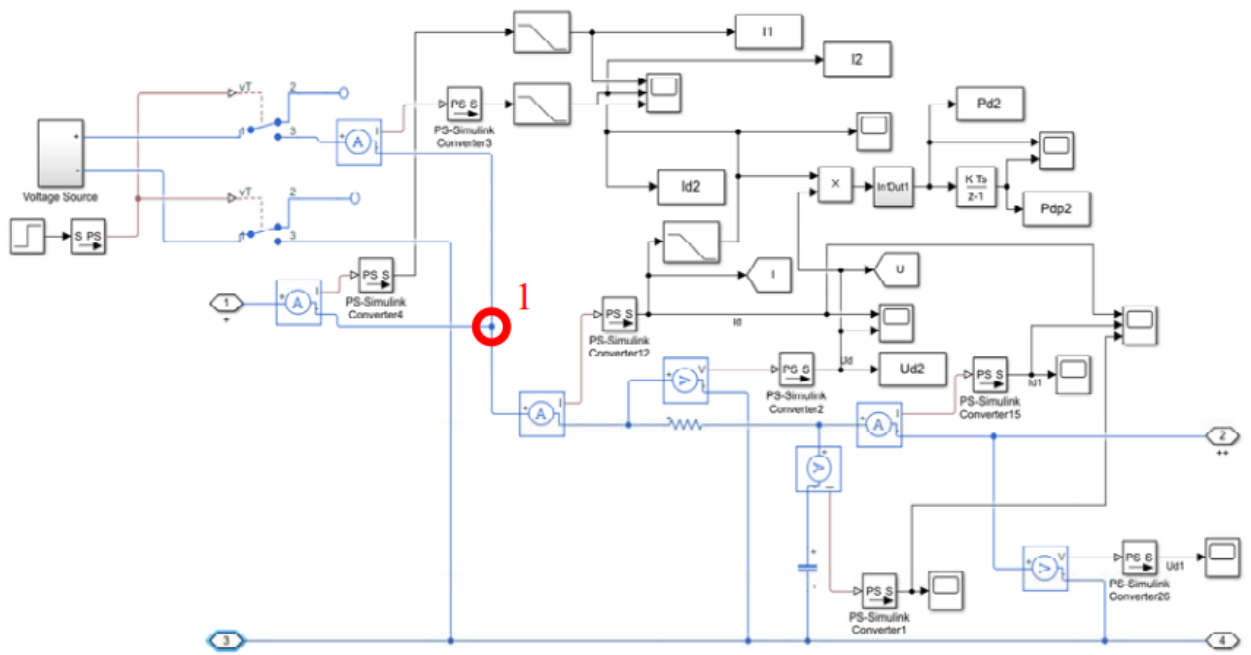


Рисунок 3.26 – Підсистема ланки постійного струму DC

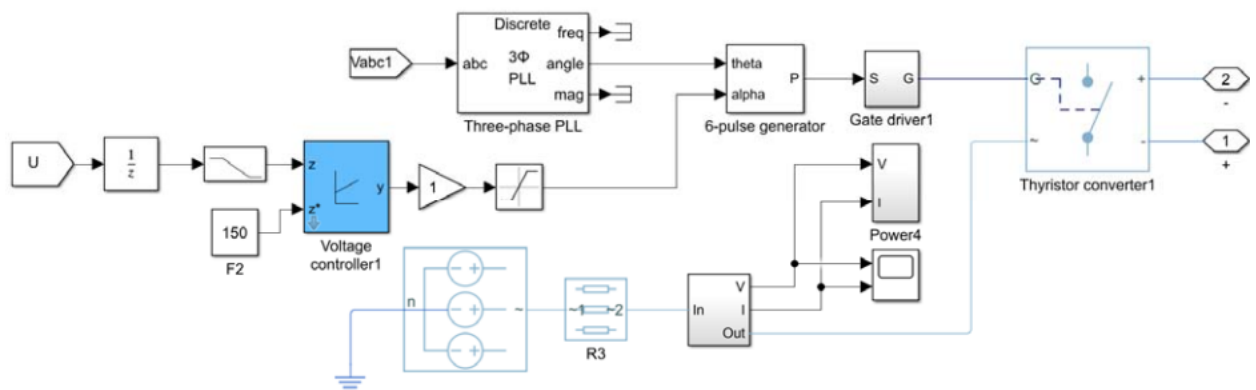


Рисунок 3.27 – Підсистема ланцюга підживлення Voltage Source

Механічні характеристики $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ та $\omega=f(M)$ даної моделі гальмування самозбудженням у порівнянні з класичним електродинамічний гальмуванням, приведені на рисунках 3.28, 3.29, 3.30.

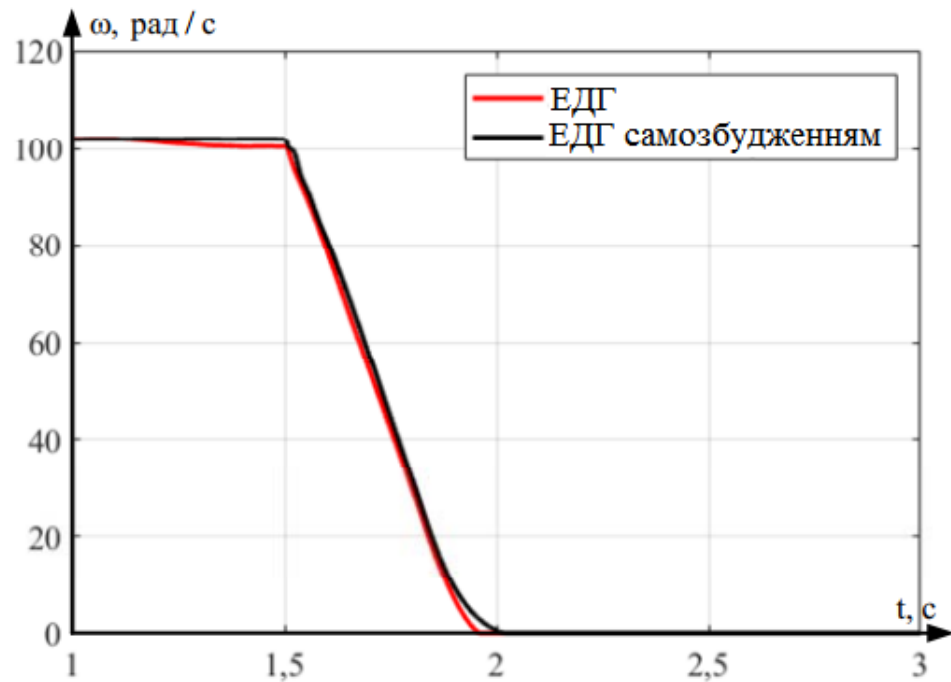


Рисунок 3.28 – Графіки $\omega=f(t)$ при електродинамічному гальмуванні та електродинамічному гальмуванні самозбудженням

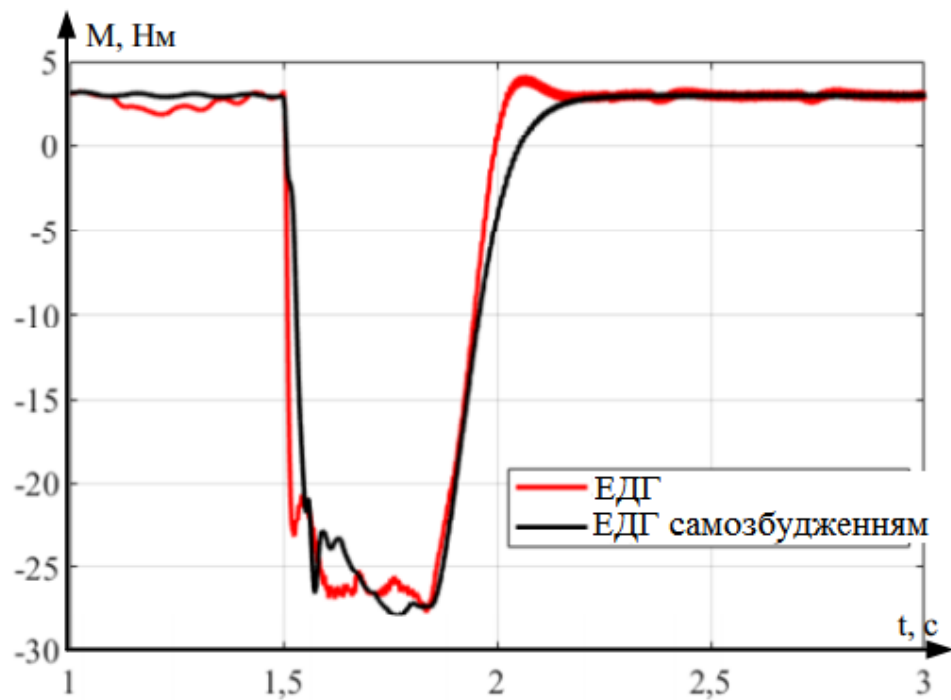


Рисунок 3.29 – Графіки $M=f(t)$ при електродинамічному гальмуванні та електродинамічному гальмуванні самозбудженням

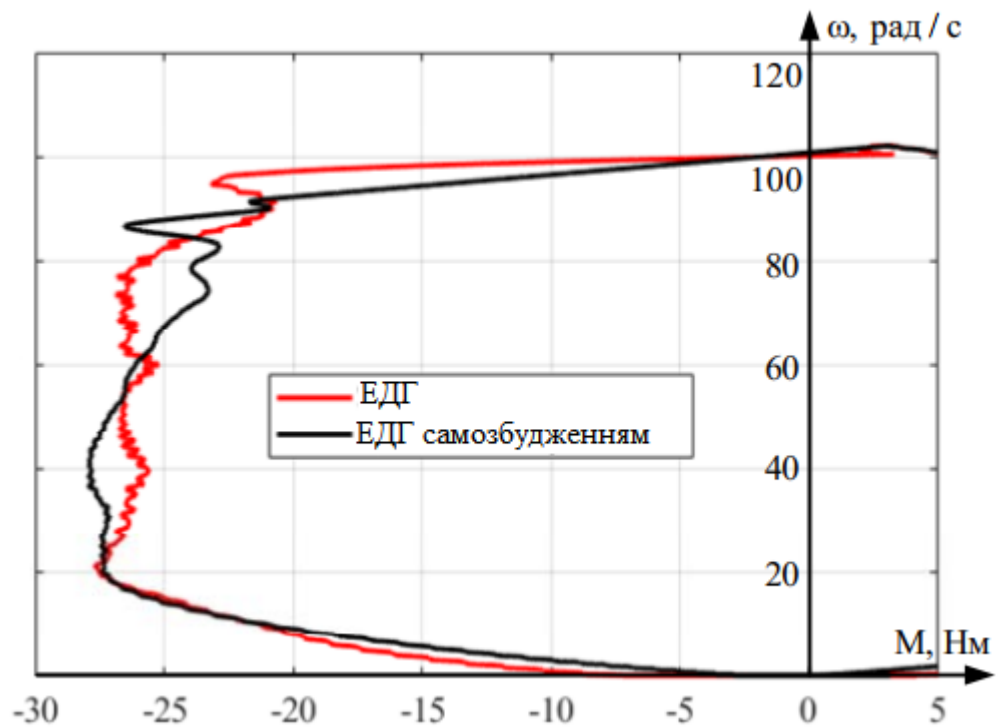


Рисунок 3.30 – Графіки $\omega=f(M)$ для електродинамічного гальмування та електродинамічного гальмування самозбудженням

З побудованих залежностей можна зробити висновок, що зупинка системи електроприводу відбувається з однаковим темпом і за рівне значення часу за підтримки заданого значення гальмівного моменту.

3.4 Висновки

1. Система здатна забезпечити плавний пуск електродвигуна під навантаженням і характеризується простотою та надійністю, оскільки регулюється один параметр: частота струму на виході інвертора та характеризується відсутністю перенапруги в роторному ланцюзі.

2. Можливе глибоке регулювання швидкості вниз від основної, однак цей режим роботи супроводжується втратами у вигляді теплової енергії, що виділяється на індукційному опорі.

3. Реалізовано енергозберігаючу систему електродинамічного гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором із самозбудженням та додатковим підживленням ланки постійного струму, що забезпечує підтримку необхідного гальмівного моменту та дозволяє регулювати час зупинки електродвигуна.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Електроприводи механізмів стрічкового типу (конвеєра) мають свої характерні особливості, які впливають на ефективність експлуатації та визначають вимоги до його роботи. Використання транспортних механізмів безперервної дії, зокрема стрічкових конвеєрів із постійною швидкістю руху, демонструє досить низьку ефективність: продуктивність складає приблизно 50–70%, а коефіцієнт використання часу – 60–70%. Така низька ефективність пов'язана з істотною нерівномірністю вантажних потоків, що негативно впливає на техніко-економічні показники роботи та збільшує вартість транспортування вантажів [20].

Ефективність використання транспортних машин при роботі з нерівномірними вантажопотоками можна підвищити шляхом регулювання швидкості їх руху відповідно до обсягу вантажопотоку. Сучасні технології оптимального управління та засоби автоматизації дозволяють ефективно вирішувати такі завдання.

Особливу увагу слід приділити стабілізації тягових характеристик багатодвигунних стрічкових конвеєрів, у яких тяговий механізм розташований по всій довжині. Окрім забезпечення рівномірного розподілу навантажень між приводами, необхідно підтримувати належне зчеплення між тяговими елементами та основним конвеєром [20].

Алгоритми управління автоматичним натяжним пристроєм дозволяють оптимізувати роботу конвеєра як у статичних, так і в динамічних режимах, забезпечуючи стабілізацію тягового фактору. Це сприяє зменшенню зусиль у стрічці, що, своєю чергою, дозволяє використовувати менш міцні й, відповідно, дешевші типи стрічок. Такі заходи знижують знос стрічки, запобігають її прослизанню та пробуксовці приводів, дають змогу збільшити

довжину конвеєрної системи та зменшити ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Ще одним важливим аспектом автоматизації конвеєрного транспорту є управління конвеєрними лініями та збірними конвеєрами. У разі об'єднання конвеєрів у транспортні лінії системи автоматизації мають забезпечувати можливість централізованого запуску всієї лінії з однієї зручної точки.

Крім того, при узгодженні роботи окремих конвеєрів із параметрами вантажопотоків, що надходять на них, алгоритми управління збірним конвеєром стають значно складнішими. Для підвищення ефективності роботи конвеєрної лінії необхідно розробити методи попереджувального управління вантажопотоками, які дозволять запобігати або мінімізувати простої окремих конвеєрів, уникати перевантажень і накопичення матеріалів на збірному конвеєрі.

Для конвеєрів з великою довжиною та продуктивністю зазвичай використовують електроприводи на основі асинхронних двигунів з фазним ротором, які дозволяють обмежити пускові струми та прискорення. Для зменшення динамічних навантажень застосовують попередні пускові ступені, які допомагають правильно налаштувати зазори в передачах і створити початковий натяг стрічки. Крім того, використовують велику кількість пускових ступенів, щоб знизити миттєві збільшення моменту двигуна під час перемикання пускових резисторів. Це зменшує виникнення пружних коливань в тяговому органі і запобігає його прослизанню за цимбалами.

В якості базового варіанту системи електропривода досліджуваного механізму приймається ПЧ-АД, яка розглядається як така, що підлягає модернізації.

В таблиці 5.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на модернізацію системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на електроустаткування базового та нового варіантів

Найменування електрообладнання	Кошторисна вартість варіанту	
	Базова (ПЧ-АД з КР)	Нова (ПЧ-АД з ФР)
Вартість двигуна МТФ-111-Н6 Р=132 кВт)	36500,0	54750,0
Вартість системи керування	80074,0	76420,0
Кабелі, апарати захисту, сенсори та інше обладнання	14260	16440
Вимірювальні прилади, показчики, реєстратори захищеного виконання	8200	8200
Спеціалізований інструментарій	4370	4370
Частотно-параметричний регулятор в колі ротора	—	12500
Блок керування електродинамічного гальмування	—	8680
Разом капіталовкладення:	143404,0	181360,0
Транспортні витрати 13%	18642,5	23576,8
Всього ціна обладнання	162046,5	204936,8
Монтажні роботи 10%	16204,7	20493,7
Капітальні витрати	178251,2	225430,5

Отже, $K_6 = 178251,2$ грн.; $K_n = 225430,5$ грн.

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік .

Експлуатаційні витрати включають такі складові:

1. Амортизаційні відрахування E_a .
2. Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату).
3. Витрати на силову електроенергію E_e .
4. Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$.
5. Інші витрати $E_{ін}$.

Вираз, який включає в себе усі вище перераховані складові експлуатаційних витрат, має вигляд:

$$З = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (5.1)$$

5.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування для базового та нового варіантів становлять (норма амортизації становить 10 % в рік):

$$E_{аб} = 178251,2 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 17825,1 \text{ грн.};$$

$$E_{ан} = 225430,5 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 22543,0 \text{ грн.}$$

5.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Таблиця 5.1 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_3 = E_{30} + E_{3д}, \quad (5.2)$$

де E_{30} – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{3д}$ – додаткова заробітна плата;

$$E_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_c \cdot \beta, \quad (5.3)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують систему частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором ($N = 1$ чол.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду. Залежить від мінімальної заробітної платні, яка станом на 2024 рік складає 6700 грн. Тому розмір ставки робітника 1-го розряду приймаємо рівним 40 грн./год;

K – тарифний коефіцієнт ($K_6 = 1,8$, $K_n = 2,03$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд робочого часу за рік (приймаємо рівним 240 год.);

K_c – коефіцієнт співвідношень, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$ для базового варіанту, $\beta = 0,78$ для нового варіанту).

Розрахуємо E_{30} для базового та нового варіантів.

$$E_{30\ 6} = 1 \cdot 40 \cdot 1,8 \cdot 240 \cdot 1 \cdot 1 = 17280 \text{ (грн.)},$$

$$E_{30\ n} = 1 \cdot 40 \cdot 2,03 \cdot 240 \cdot 1 \cdot 0,78 = 15201 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{3д}$ (за професійну та майстерну діяльність) становить 10 % основної заробітної плати. $E_{3д}$ для базового та нового варіантів відповідно становить:

$$E_{3д\ 6} = 17280 \cdot 0,10 = 1728,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{3д\ n} = 15201 \cdot 0,10 = 1520,1 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату для базового та нового варіантів зведемо в таблицю 7.2.

Таким чином в результаті виконання підстановки у вираз (7.2) маємо:

$$E_{зб} = 17280 \cdot + 1728,0 = 19008 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зн} = 15201 \cdot + 1520,1 = 16721,1 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 7.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Базовий варіант	Новий варіант
Основна заробітна плата, $E_{зо}$, грн.	17280	15201
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$, грн.	1728,0	1520,1
ВСЬОГО з нарахуванням, грн.	19008	16721,1

7.2.3 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_{\text{вм}} \cdot K_z, \quad (5.4)$$

де B – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для малих побутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з класом напруги та групою електроспоживання (група А чи В), яка включає в себе вартість кВт год електричної енергії та вартості розподілу, з ПДВ складає приблизно 9,5 грн/кВт·год. (5,9 грн/кВт – вартість кВт/год без ПДВ, 2,02 грн./кВт – вартість розподілу кВт/год без ПДВ).

P – встановлена потужність приводного двигуна (30 кВт);

η – ККД установки;

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом);

K_z – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Коефіцієнт корисної дії обчислено як добуток ККД двигуна і силового перетворювача. Для базового варіанту ККД складає 0,84, для нового варіанту ККД приймаємо рівним 0,92. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,8 в обох варіантах, а коефіцієнт завантаження для базового варіанту рівний 0,78, а для нового – 0,8.

Ефективний фонд робочого часу для двох варіантів при режимі роботи в 1 зміну протягом 95 % часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{еф}} = 250 \text{ днів} \cdot 8 \text{ год.} \cdot 0,95 = 1900 \text{ (год.)}$$

Отже, з виразу (5.4) для базового та нового варіантів маємо:

$$E_{\text{ЕБ}} = \frac{30}{0,84} \cdot 9,5 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,78 = 405476 \text{ (грн./рік)}.$$

$$E_{\text{ЕН}} = \frac{30}{0,92} \cdot 9,5 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 381216 \text{ (грн./рік)}.$$

5.2.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів, у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Графік планово-попереджувальних ремонтів для базового та нового варіантів наведено в таблицях 5.3 та 5.4.

Таблиця 5.3 – Графік ремонтів для базового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	7			6			7			7		8	35
АД		5			5			5			5		20
Кабельна мережа	4					4				5		6	19
Апарати ком-ії та захисту		10				11				11			32
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість													118

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер п'ятого розряду для базового варіанту та шостого – для нового (система на базі новітнього обладнання потребує вищої кваліфікації працівника). Із врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт, (5.3) прийме вигляд:

$$E_{30} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}}, \quad (5.5)$$

Таблиця 5.4 – Графік для нового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудомісткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	6			5			5			6		6	28
АД з ФР		4			5			4			5		18
Кабельна мережа	5					5						6	16
Частотно-параметричний регулятор в колі ротора		4			5			5			5		19
Апарати ком-ії та захисту		6				6				6			19
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість													112

З попередніх розрахунків відомо, що $T_1 = 40$ грн./год, отже, маємо:

$$E_{306} = 40 \cdot 2,7 \cdot 118 = 12744(\text{грн.}),$$

$$E_{\text{зо н}} = 40 \cdot 2,33 \cdot 112 = 10439 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату (38 %):

$$E_{\text{зн б}} = 12744 \cdot 0,38 = 4843 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зн н}} = 10439 \cdot 0,38 = 3967 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

- для базового варіанту: $12744 + 4843 = 17587 \text{ (грн.)}$,
- для нового варіанту: $10439 + 3967 = 14406 \text{ (грн.)}$.

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймаємо рівними 15 % витрат на основну заробітну плату. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становлять:

- для базового варіанту: $17587 \cdot 0,15 = 2638 \text{ (грн.)}$;
- для нового варіанту: $14406 \cdot 0,15 = 2161 \text{ (грн.)}$.

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр б}} = 17587 + 2638 = 20225 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{пр н}} = 14406 + 2161 = 16567 \text{ (грн.)}.$$

7.2.5 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін б}} = (17825,1 + 19008 + 405476 + 20225) \cdot 0,05 = 23126,71 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{ін н}} = (22543 + 16721,1 + 381216 + 16567) \cdot 0,05 = 21852,36 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за (6.1) наведемо у вигляді таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Базовий варіант	Новий варіант
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	17825,1	22543
Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу, грн.	19008	16721,1
Витрати на електроенергію E_e , грн.	405476	381216
Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$, грн.	20225	16567
Інші витрати $E_{ін}$, грн.	23126,71	21852,36
Всього експлуатаційні витрати $З$, грн.	485660,81	458899,46

Оскільки ми розраховуємо ефективність нової системи після модернізації, то необхідно порівняти експлуатаційні витрати, використовуючи відносні показники.

Для порівняння експлуатаційних витрат розрахуємо показник відносної економії (зменшення) витрат:

$$\lambda_B = \frac{З_B - З_H}{З_B} \cdot 100\%, \quad (5.6)$$

$$\lambda_B = \frac{485660,81 - 458899,46}{485660,81} \cdot 100\% = 5,51\%$$

З результатів наведених розрахунків робимо висновок, що модернізація системи стрічкового конвеєра є економічно доцільною. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,51 %.

5.3 Визначення терміну окупності нового рішення

При оцінці ефективності використання нового варіанта визначаються і порівнюються також термін окупності додаткових капітальних затрат, рік:

$$T_{ок} = (K_H - K_6) / (З_{еб} - З_{ен}), \quad (5.7)$$

$$T_{ок} = (225430,5 - 178251,2) / (485660,81 - 458899,46) = 1,76 \text{ (роки)}.$$

Отже, розраховані економічні показники свідчать про цілком виправдану економічну доцільність модернізації системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором та дуже високу експлуатаційну надійність та ефективність, підвищенню якої присвячені дослідження в даній роботі.

Висновки: Вдосконалення системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором за рахунок дообладнання системи електропривода є економічно доцільним та виправданим. За рахунок модернізації системи електропривода досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,51 %, що підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі магістерської дипломної роботи розглянуті питання з охорони праці, що були враховані під час розробки заходів з підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода. На електротехнічний персонал, що буде здійснювати оперативне обслуговування системи управління електроприводом, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21, 22].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря. Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил). Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час оперативного обслуговування електроустановок

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівництвом підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку знань ПБЕ ЕЕС та ПТЕ ЕЕС.

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою понад 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В. Оперативні працівники повинні працювати за графіком, затвердженим особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства чи структурного підрозділу.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком. Припинення чергування без здачі зміни забороняється. У виняткових випадках залишення робочого місця є припустимим з дозволу оперативного працівника вищої посади. Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією;
- одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві;
- перевірити і прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції;
- ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування;
- оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в

оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає;

- доповісти старшому зміни про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Забороняється прийняття та здача зміни у випадках, коли на ділянці, яка обслуговується, робочі місця не прибрані, устаткування забруднене. Прийняття зміни, коли устаткування несправне чи є відхилення від нормального режиму його роботи, допускається тільки з дозволу особи, відповідальної за електрогосподарство підприємства, або оперативного працівника вищого рівня, про що робиться запис в оперативному журналі. Оперативні працівники під час свого чергування є відповідальними за правильне обслуговування та безаварійну роботу всього устаткування на закріплених за ними ділянках.

В разі порушення режиму роботи, пошкодженні чи аварії електроустаткування оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміні працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство. У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії.

Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріплених за ним ділянках. Огляд електроустановок може виконуватись одноосібно: адміністративно-технічним працівником з групою V в електроустановках понад 1000 В і з групою IV – в електроустановках до 1000 В; оперативним працівником, який обслуговує цю електроустановку.

Список адміністративно-технічних працівників, яким дозволяється одноосібний огляд, встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство і затверджується керівником підприємства.

Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку

роботу.Огляди, виявлення та ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконуються централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті (чи групі об'єктів). Періодичність цих робіт встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство, залежно від місцевих умов. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені.Для кожного приміщення має бути не менше двох комплектів ключів, один з яких є запасним. Ключі від приміщень РУ не повинні пасувати до дверей комірок і камер.Ключі підлягають поверненню щоденно після закінчення роботи.

6.1.2 Електробезпека

Проектування та експлуатація електричних мереж і установок повинна здійснюватися за умови дотримання вимог з їхньої електробезпеки [4, 5].Живлення силового обладнання заводу та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – особливо небезпечні, так як роботи виконуються назовні приміщень. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [21, 23]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги; електрозахисні засоби захисту (до 1000В) поділяються на основні (ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні

килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

6.3 Електродвигуни та їх апарати керування і захисту

Вимоги поширюються на електродвигуни та їх апарати керування і захисту в стаціонарних установках виробничих та інших приміщень різного призначення. На ці установки поширюються також вимоги, наведені в главі 5.1 Правил улаштування електроустановок [23], і відповідні вимоги інших глав.

У цій главі Правил є посилання на такі нормативні документи: ДСТУ 2848-94 Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення ДСТУ 3025-95 (ГОСТ 9098-93) Вимикачі автоматичні низьковольтні. Загальні технічні умови СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6 – 35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільних установках EN 61800-3:2004 Adjustable speed electrical power drive systems. - Part 3: EMC requirements and specific test methods (Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування)

1. Заходи щодо забезпечення надійності живлення треба вибирати залежно від категорії відповідальності електроприймачів. Ці заходи можна застосовувати не до окремих електродвигунів, а до трансформаторів, які їх живлять, і перетворювальних підстанцій, розподільних пристроїв та пунктів. Резервувати лінію, яка безпосередньо живить електродвигун, не потрібно незалежно від категорії надійності електропостачання.

2. Якщо необхідно забезпечити безперервність технологічного процесу в разі виходу з ладу електродвигуна, його комутаційної апаратури або лінії, яка безпосередньо живить електродвигун, то резервування треба здійснювати шляхом установлення резервного технологічного агрегату або іншими способами.

3. Електродвигуни та їх апарати керування і захисту треба вибирати і встановлювати таким чином і в необхідних випадках забезпечувати такою системою охолодження, щоб температура їх під час роботи не перевищувала допустимої.

4. Електродвигуни та їх апарати керування і захисту треба встановлювати таким чином, щоб вони були доступними для огляду і заміни, а також за можливості – для ремонту на місці встановлення. Якщо електроустановка містить електродвигуни або апарати масою 100 кг і більше, то треба передбачати пристрої для їх такелажу. 5.3.9 Частини електродвигунів і обертові частини, які з'єднують електродвигуни з механізмами (муфти, шків), повинні мати захисні огороження від випадкових дотиків.

5. Електродвигунита їх апаратикерування із захисту треба заземлювативідповідно до вимог глави 1.7 цих Правил [25].

6. Виконання електродвигунів та їх апаратів керуванняі захисту має відповідати умовам використання.

7. Оскільки захист електродвигуна робить його суттєво дорожчим, необхідність і доцільність встановлення слід ретельно прорахувати. Велика кількість елементів захисту робить використання електродвигуна економічно не вигідним, а їхня відсутність або неправильно підібрані заходи запобігання перепадам напруги та температур можуть призвести до поломок і передчасного аварійного виходу електромотора з ладу.

Серед видів захисту електродвигунів найважливішим є запобігання: зниженню напруги, зникненню однієї із фаз (фазочутливий захист);

- теплового перегріву;
- короткому замиканню;
- перевантаженню струмом.

8. Підбирається захист для електродвигуна таким чином, щоб урахувати умови функціонування агрегату, його потужність, передбачуване навантаження, режими роботи, можливість присутності підготовленого

персоналу. Однією з найчастіших причин несправності електричного двигуна є перегрів через:

1. перевищення допустимої тривалості безперервної експлуатації; надлишкове навантаження;
2. заклинювання обертового валу внаслідок порушення техніки експлуатації агрегату
3. потрапляння сторонніх предметів; коротке замикання на обмотках;
4. знос частин двигуна; невідповідні умови експлуатації.

9. Для механічного захисту асинхронних електродвигунів від перевантажень застосовується біметалеве реле, чутливий до нагрівання елемент якого вигинається зі збільшенням температури. Цей елемент замикає/розмикає контакт реле, після чого сигнал про відключення надходить на силовий агрегат.

10. У роботі з асинхронними електродвигунами слід враховувати можливе зниження напруги в мережі або пропадання однієї фази. У такому разі напруга на обмотках зменшується, а струм збільшується. Щоб захистити електродвигуни від негативних наслідків такої зміни вольтажу та амперажу, застосовуються реле та теплові сенсори, що встановлюються в обмотки.

Для моментального захисту від короткого замикання використовуються:

1. автомати-вимикачі з електромагнітним роз'єднанням;
2. реле (електронні чи електромеханічні);
3. запобіжники з плавкими одноразовими вставками.

Якщо потужність електродвигуна за нормальних умов роботи не перевищує номінальну, зазначену в технічній документації до агрегату, частина реле може не застосовуватися. Тоді захисні елементи можна налаштувати на нижчий робочий струм.

Перегрів трифазних асинхронних електродвигунів може бути спровокований збільшенням температури:

1. на обмотці статора;

2. на підшипниках;
3. у роторі;
4. у точці електричного підключення.

11. Зазвичай теплові датчики встановлюються на обмотці – найчастішому джерелі перегріву електродвигуна, розташованому в меншій частині мотора, що обдувається вентилятором. Датчиками перегріву виступають напівпровідникові терморезистори РТС – термістори чи позистори.

Висока ефективність термісторного захисту обумовлена тим, що вона має високу швидкість відповіді на будь-яку з причин перегріву електродвигуна:

1. заклинювання підшипників;
2. навантаження;
3. обрив фази;
4. низька якість вентиляції й охолодження.

12. Автомати та температурні реле застосовуються для захисту від перевантаження струмом. У цьому випадку захист електродвигунів налаштовується так, щоб відсікати тривале протікання великого струму, що призводить до перегріву та швидкого зношування ізоляції.

13. Частотні перетворювачі реалізують захист електричного двигуна програмно й апаратно за допомогою датчиків, виключаючи необхідність у механічному захисті за допомогою редукторів або муфт.

Завдяки частотним перетворювачам контроль роботи електродвигуна відбувається постійно незалежно від присутності технічного персоналу. При зміні навантаження та надходженні відповідних сигналів з датчиків електроживлення двигуна переводиться у відповідний режим, перешкоджаючи перегріву та гарантуючи захист від короткого замикання або заклинювання електродвигуна.

13. Електродвигуни і апарати, за винятком тих, які мають ступінь захисту, не меншу ніж IP44, резистори і реостати всіх виконань має бути

встановлено на відстані, не меншій ніж 1 м від конструкцій будівель, виконаних із горючих матеріалів.

14. Кабелі і проводи, які приєднують до електродвигунів, установлених на віброізолювальних основах, на ділянці між рухомою і нерухомою частинами основи повинні мати гнучкі мідні жили.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення ефективності електропривода стабілізації швидкості зі скалярним керуванням» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування частотного електропривода та отримано такі результати досліджень:

1. Виконано огляд основних особливостей сучасних частотних перетворювачів і електроприводів стабілізації швидкості асинхронних двигунів, проведено аналіз сучасних систем електроприводу, рекомендованих для конвеєрних установок.

2. Розроблено систему плавного пуску АД з ФР, що забезпечує сталість пускового моменту і можливість регулювання швидкості в діапазоні до 1:10.

3. Запропоновані математичні моделі пристроїв, що входять до складу електроприводу, описано електромагнітні процеси в каскадній схемі. Визначено, що при регулюванні швидкості шляхом зміни амплітуди додаткової напруги на роторі під дією навантаження відбувається зменшення швидкості обертання, машина має перевантажувальну здатність не вище за природну. Робота машини при швидкості нижче $0,5\omega_0$ при регулюванні швидкості зміною амплітуди недоцільна через зменшення моменту двигуна.

4. Запропоновано спосіб електродинамічного гальмування електроприводу з самозбудженням за рахунок віддачі енергії електродвигуна з кола ротора через керований випрямляч в коло статора з додатковим підживленням ланки постійного струму від незалежного джерела енергії. Система гальмування самозбудженням забезпечує зниження споживаної енергії на 33% порівняно з електродинамічним гальмуванням.

5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних

експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beshta O.S. Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes, Scientific Bulletin NSU, 2012, Vol. 4, pp. 98-107. The original source of material: <http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/34-04/530-2012-4-beshta/0>.
2. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
3. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2
4. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина ІV. Трансформатори. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2008. - 219 с.
5. Остроухов І. О., Борисенко В.Ф. Порівняльний аналіз систем електроприводів шахтних підйомних установок // Збірник трудів ДонНТУ. - 2005. –с.143-145.
6. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.
7. Голуб А.П., Кузнєцов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.

9. Печеник М.В. Особливості підвищення енергетичної ефективності електромеханічної систем конвеєра / М. В.Печеник, С. О. Бур'ян, А. О. Горбатовський // Вісник НТУУ“ХПІ”, Серія : Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика. – Харків : – 2013. – № 36. – с. 65-72

10. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.

11. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

12. Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс]: для підготовки докторів філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікація за спеціальністю 171 Електроніка за спеціалізацією «Електронні системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. О. Терещенко – Електронні текстові данні (1 файл:5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

13. Воронов Р.В – Дисертація: «Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», Харків 2020 1-97с.

14. Модернізація системи керування електропривода транспортної лінії припортового заводу / О.А. Паянок, М.М. Матевосян – *Матеріали конференції* «LII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету», Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL:<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17445/14518>– Вінниця : ВНТУ, 2023. – 3 с.

15. Схеми автоматизації механізмів безперервного транспорту Школа для електрика: пристрій, проектування, монтаж, налагодження, експлуатація

та ремонт електрообладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://bezremonta.net>.

16. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ :Національний гірничий університет,2003.-226 с.

17. Вимоги до конвеєрного транспорту, вантажопотоку, сфер застосування, характеристики вантажів., [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bukvar.su/promyshlennost-proizvodstvo/page,5,89079-Issledovanie-irazrabotka-SAR-skorosti-lenty-konveyera-KL5250-dlya-ekskavatora-ERSHR-D5250.html> [razrabotka-SAR-skorosti-lenty-konveyera-KL5250-dlya-ekskavatoraERSHR-D- 5250.html](http://bukvar.su/promyshlennost-proizvodstvo/page,5,89079-Issledovanie-irazrabotka-SAR-skorosti-lenty-konveyera-KL5250-dlya-ekskavatora-ERSHR-D5250.html)

18. Печеник М.В. Особливості підвищення енергетичної ефективності електромеханічної систем конвеєра / М. В.Печеник, С. О. Бур'ян, А. О. Горбатовський // Вісник НТУУ“ХПІ”, Серія : Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика. – Харків : – 2013. – № 36. – с.65-72.

19. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.

20. Розробка і реалізація ПІД-регуляторів в середовищі Matlab [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://matlab.com>

21. НПАОП 40.1-1.32-01.(ДНАОП 0.00-1.32-01).Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.[Чинний від 2002-01-01].URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>.

22. ДСТУ 2848-94 Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення.

23. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01].Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

24. EN 61800-3:2004 Adjustable speed electrical power drive systems. - Part 3: EMC requirements and specific test methods (Системи силового

електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування).

25. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України), Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

«10» вересня 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЧАСТОТНО- ПАРАМЕТРИЧНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

08-24.МКР.005.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

Олександр ПАЯНОК

«10» вересня 2024 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-23м

Роман ДИМИДЮК

«10» вересня 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором».

Скорочене найменування розробки – «Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Системи керування електродвигуном із фазним ротором, як правило, будуються на параметричних елементах, включених у роторне коло. Вони можуть бути не регульованими, наприклад, що забезпечують пуск за допомогою індукційного опору або регульованими, що забезпечують реостатний релейно-контакторний пуск, імпульсне регулювання швидкості за допомогою напівпровідникових елементів. Незважаючи на те що, дані системи управління забезпечують необхідні пускові характеристики електродвигуна, обмежуючи пусковий струм і забезпечуючи необхідне значення прискорення, вони мають наступні недоліки: значні втрати енергії в процесі пуску на реостатах, можливість міжвиткового короткого замикання в роторному ланцюгу внаслідок перенапруження, що виникло там для імпульсних систем регулювання), низький коефіцієнт потужності.

4 Вимоги до розробки

Система електропривода має забезпечувати плавний пуск асинхронного електродвигуна з фазним ротором та регулювання швидкості в заданому діапазоні.

Система гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором шляхом самозбудження. При даному способі гальмування ми не використовуємо запасену енергію електродвигуна. Асинхронний електродвигун із фазним ротором дозволяє використовувати цю енергію при реалізації системи електродинамічного гальмування самозбудженням з додатковим підживленням контуру постійного струму.

5 Комплектація розробки

Електропривод містить: асинхронний електродвигун з фазним ротором (М), сенсор струму в колі ротора (СС1), некерований мостовий діодний випрямляч (В), конденсатор у ланці постійного струму (С), сенсор струму (СС), автономний інвертор напруги (І), блок управління ключами інвертора (БК), блок обчислення швидкості (БОШ), частотно-залежний індукційний опір (ІО).

Блок керування містить: блок завдання швидкості (БЗШ), блок завдання максимальної частоти (БЗМЧ), регулятор швидкості П-типу (Пр), регулятор струму І-типу (Ір), блоки обмеження (БО), регулятор частоти (РЧ), функціональний перетворювач (Ф), суматори (1,2,3).

6 Джерела розробки

1. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.

2. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч.

закладів / М.П. Бєлов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.

4. Печеник М.В. Особливості підвищення енергетичної ефективності електромеханічної систем конвеєра / М. В.Печеник, С. О. Бур'ян, А. О. Горбатовський // Вісник НТУУ“ХПІ”, Серія : Проблеми автоматизованого електропривода теорія і практика. – Харків : – 2013. – № 36. – с. 65-72.

7 Технічні характеристики

Дана схема електропривода дозволяє реалізувати плавний пуск електродвигуна із заданим обмеженням пускового моменту до необхідної швидкості. Підтримуючи постійним струм у ланці постійного струму система управління забезпечує стабілізацію пускового моменту.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

Двигун, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т. ін. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

10 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

11 Показники технологічності

Спосіб електродинамічного гальмування електроприводу з самозбудженням за рахунок віддачі енергії електродвигуна з кола ротора через керований випрямляч кола статора з додатковим підживленням ланки постійного струму від незалежного джерела енергії. Система гальмування самозбудженням забезпечує зниження споживаної енергії на 33% порівняно з електродинамічним гальмуванням.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації та відповідний контингент фахівців, які займаються програмуванням робота. Технічний огляд механізму здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконано напругою 380 В від силової мережі підприємства.

14 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**Підвищення ефективності системи частотно-параметричного
керування асинхронним двигуном з фазним ротором**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Актуальність теми дослідження: залишається актуальною задача вдосконалення систем регульованого електроприводу на базі електродвигуна з фазним ротором у напрямку створення гібридних систем з частотним перетворювачем у колі ротора та параметричним індукційним пристроєм із частотно-залежним опором.

Об'єктом є процеси перетворення енергії, які протікають в електроприводі, виконаному на базі асинхронного електродвигуна з фазним ротором для конвеєрних механізмів безперервної дії.

Предметом є математичні моделі та структури, які втілюють створення системи частотно-параметричного управління асинхронним електродвигуном з фазним ротором, що забезпечує регулювання швидкості і стабілізацію пускового моменту за допомогою перетворювача частоти, включеного в коло ротора, до виходу інвертора напруги якого підключено частотно регульований індукційний опір, і реалізацію за допомогою цього перетворювача частоти економічного режиму.

Метою є підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором з включеними в коло ротора блоків частотно-параметричного керування гальмування з самозбудженням.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- розробити систему плавного пуску асинхронного електродвигуна з фазним ротором, що забезпечує регулювання швидкості в заданому діапазоні;
- розробити математичні моделі пристроїв, що входять до складу системи електроприводу за допомогою програмного пакету MatLab Simulink;
- запропонувати систему гальмування асинхронного електродвигуна з фазним ротором шляхом самозбудження;
- запропонувати рішення дволанкового перетворювача частоти, що складається з некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги, що дозволяє працювати при змінюваному напрузі на вході інвертора і має широкий діапазон регулювання вихідної частоти.

Характеристики технологічного механізму

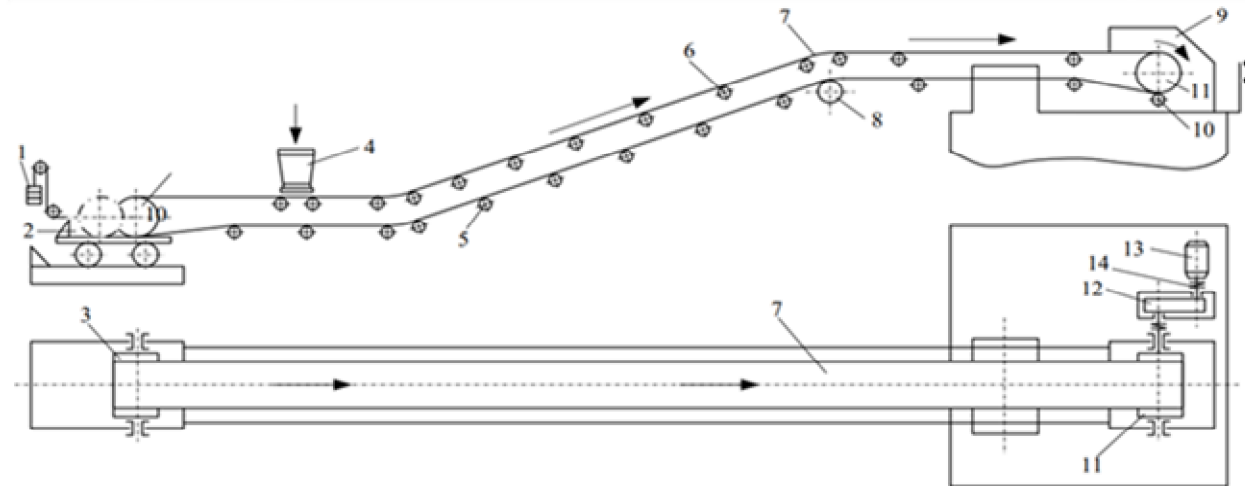
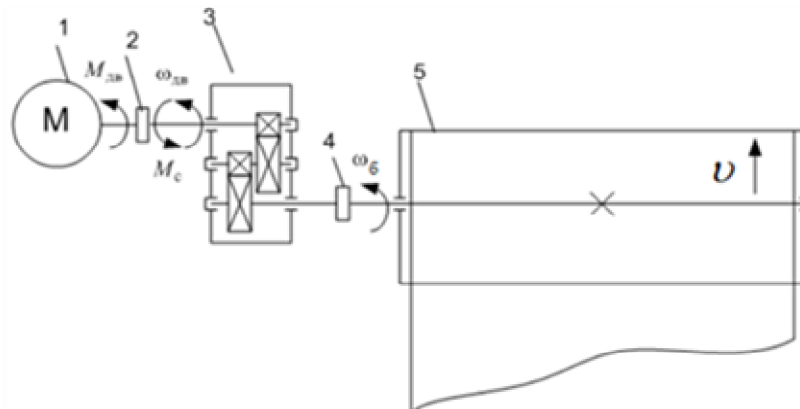


Рисунок 1 – Схема типового похило-горизонтального стрічкового конвеєра

На схемі 1.2 наведено такі позначення: 1 – противага; 2 – натяжний пристрій; 3 – барабан; 4 – завантажувальний пристрій; 5, 6 – ролики опори; 7 – робочі гілки стрічки; 8 – відхилючий барабан; 9 – розвантажувальний пристрій; 10 – пристрій для очищення стрічки; 11 – електропривод; 12 – редуктор; 13 – електродвигун; 14 – з'єднувальна муфта.



На схемі рисунка 1.3 прийняті такі позначення: 1 – електродвигун; 2,4 – жорстка муфта; 3 – редуктор; 5 – приводний барабан; $M_{дв}$ – крутний момент, що розвивається приводним двигуном; M_c – момент опору механізму (статичного навантаження); $\omega_{бт}$ та $\omega_{дв}$ – кутові швидкості барабана та двигуна; v – швидкість стрічки.

Рисунок 2 – Кінематична схема механізму

ОГЛЯД СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АД

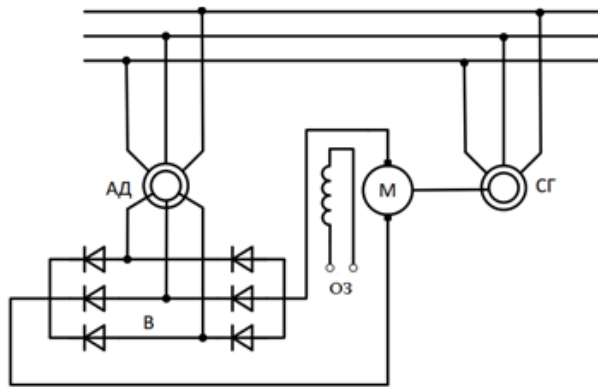


Рисунок 3 – Схема вентильно-машинного каскаду

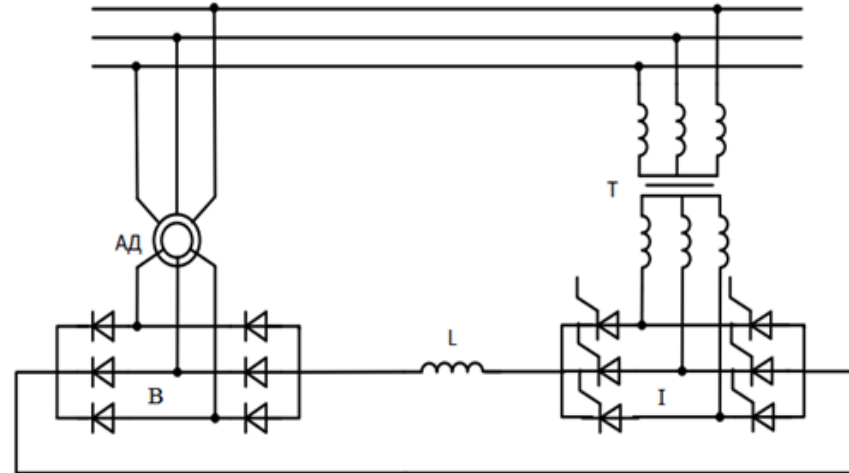


Рисунок 4 – Схема асинхронно-вентильного каскаду

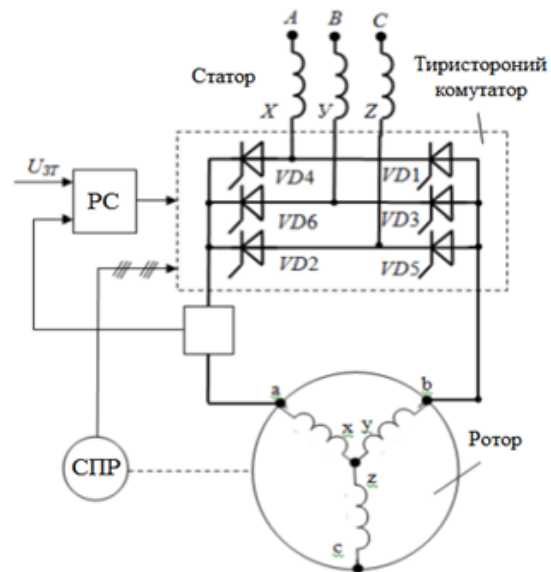


Рисунок 5 – Функціональна схема електроприводу з імпульсно-векторним керуванням

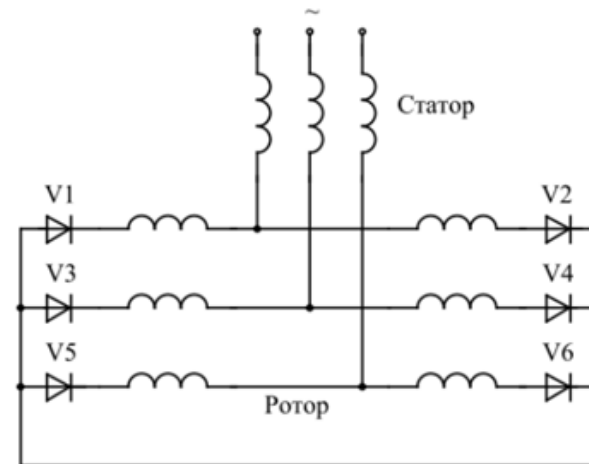


Рисунок 6 – Схема підключення двигуна в режимі синхронно-асинхронної машини

РЕКОМЕНДОВАНІ СХЕМИ ДЛЯ КОНВЕЄРНИХ УСТАНОВОК

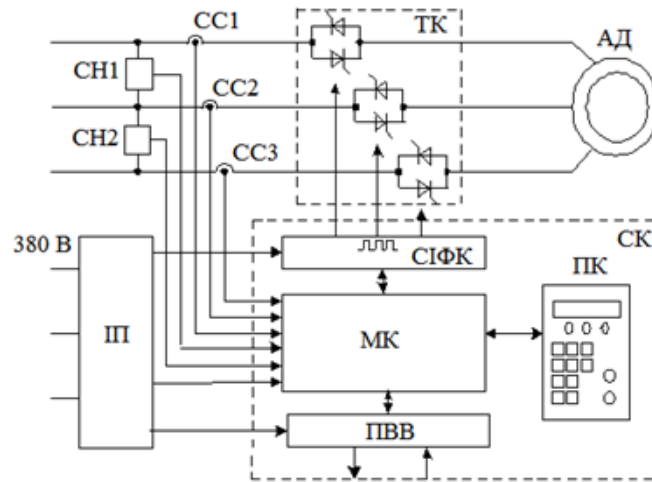


Рисунок 7 – Функціональна схема САЕП з пристроєм плавного пуску

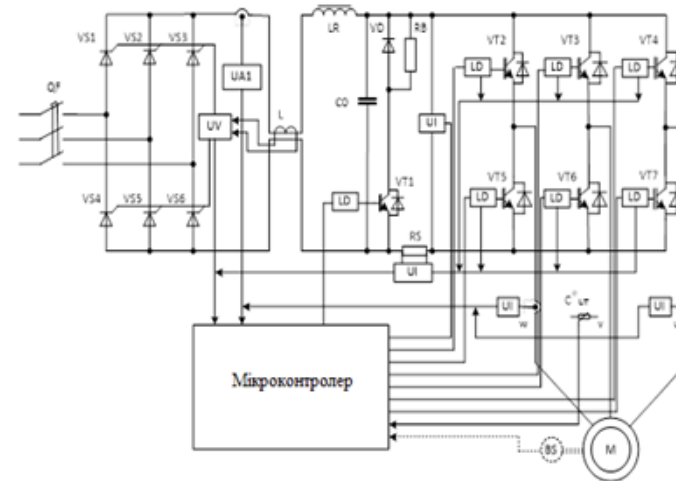


Рисунок 8 – Типова схема низьковольтного асинхронного частотно-регульованого ЕП з АІН

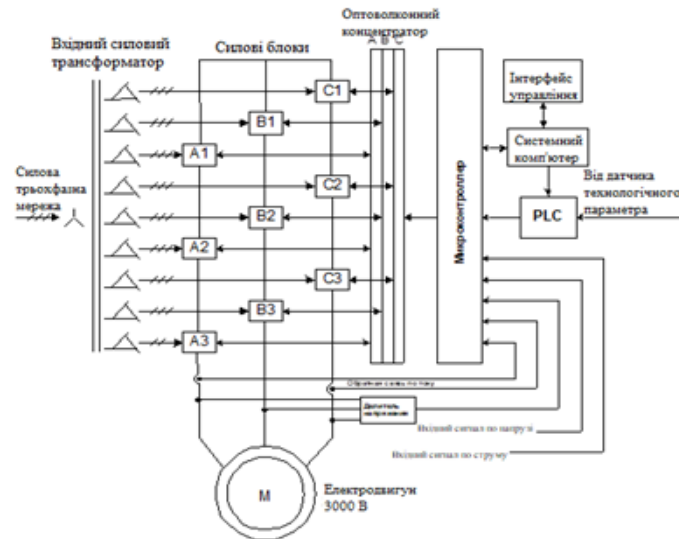


Рисунок 9 – Типова схема функціональна схема високовольтного частотно-регульованого електроприводу з інвертором напруги

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АД В РІЗНИХ РЕЖИМАХ

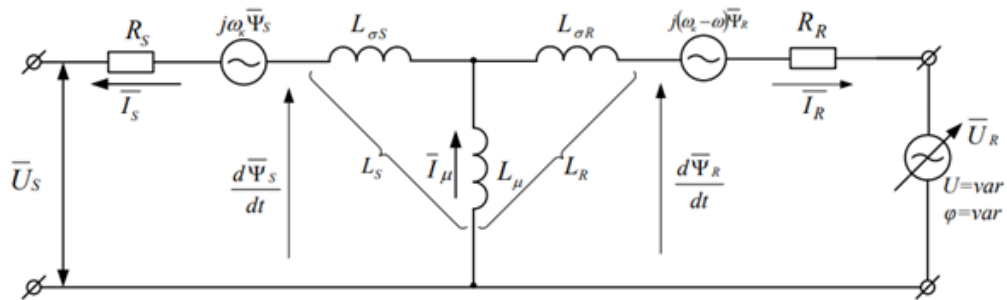


Рисунок 10 – Схема заміщення машини подвійного живлення

Система рівнянь (3.4) описує машину подвійного живлення:

$$\begin{cases} \bar{I}_s = \frac{1}{\sigma L_s} \cdot \bar{\Psi}_s - \frac{k_R}{\sigma L_s} \cdot \bar{\Psi}_R, \\ \bar{I}_R = \frac{k_s}{\sigma L_R} \cdot \bar{\Psi}_s - \frac{1}{\sigma L_R} \cdot \bar{\Psi}_R. \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} \bar{U}_s = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_0 \right) \cdot \bar{\Psi}_s - \frac{R_s k_R}{\sigma L_s} \cdot \bar{\Psi}_R, \\ \bar{U}_R = \frac{R_R k_s}{\sigma L_R} \cdot \bar{\Psi}_s + \left(\frac{R_R}{\sigma L_R} + j\omega_0 s \right) \cdot \bar{\Psi}_R, \\ M = -\frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{L_\mu}{L_s \cdot L_R - L_\mu^2} \cdot (\bar{\Psi}_s \times \bar{\Psi}_R). \end{cases} \quad (3.4)$$

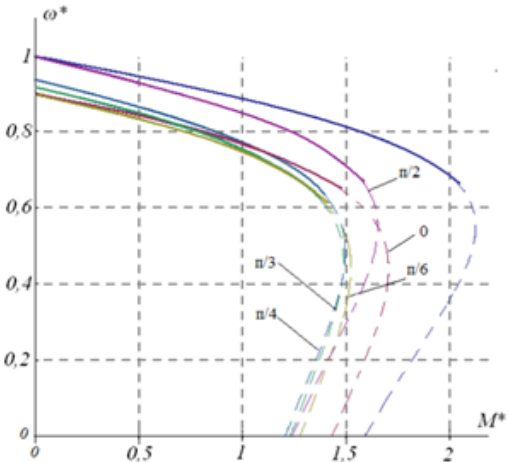


Рисунок 11 – Механічні характеристики МПЖ в асинхронному режимі

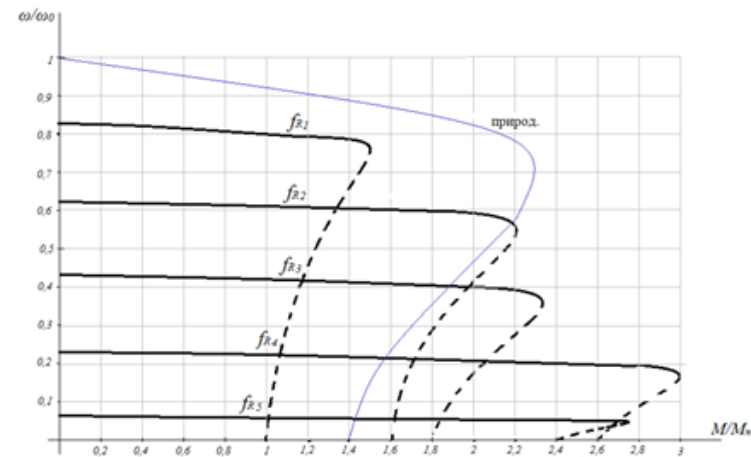


Рисунок 12 – Сімейство механічних характеристик МПЖ в синхронному режимі

ЕКВІВАЛЕНТНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АД

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (\omega_{0E} - \omega) \pm \Delta\omega_K - (\omega_{0E} - \omega) = \Delta\omega, \\
 M = \left(\frac{C_{EM}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_{0E} - \omega), \\
 E_R = -k_E \cdot \omega + u_S, \\
 \Delta u_R = u_R + E_R, \\
 i_{Ra} = \Delta u_R \cdot \frac{1/R_R}{T_R \cdot p + 1}, \\
 M_a = \frac{3z_{II} \cdot L_{\mu}}{2R_S} \cdot i_{Ra} \cdot u_S, \\
 M_{\Sigma} = M_a + M, \\
 \omega = \frac{M - M_c}{J \cdot p},
 \end{array} \right. \quad (3.5)$$

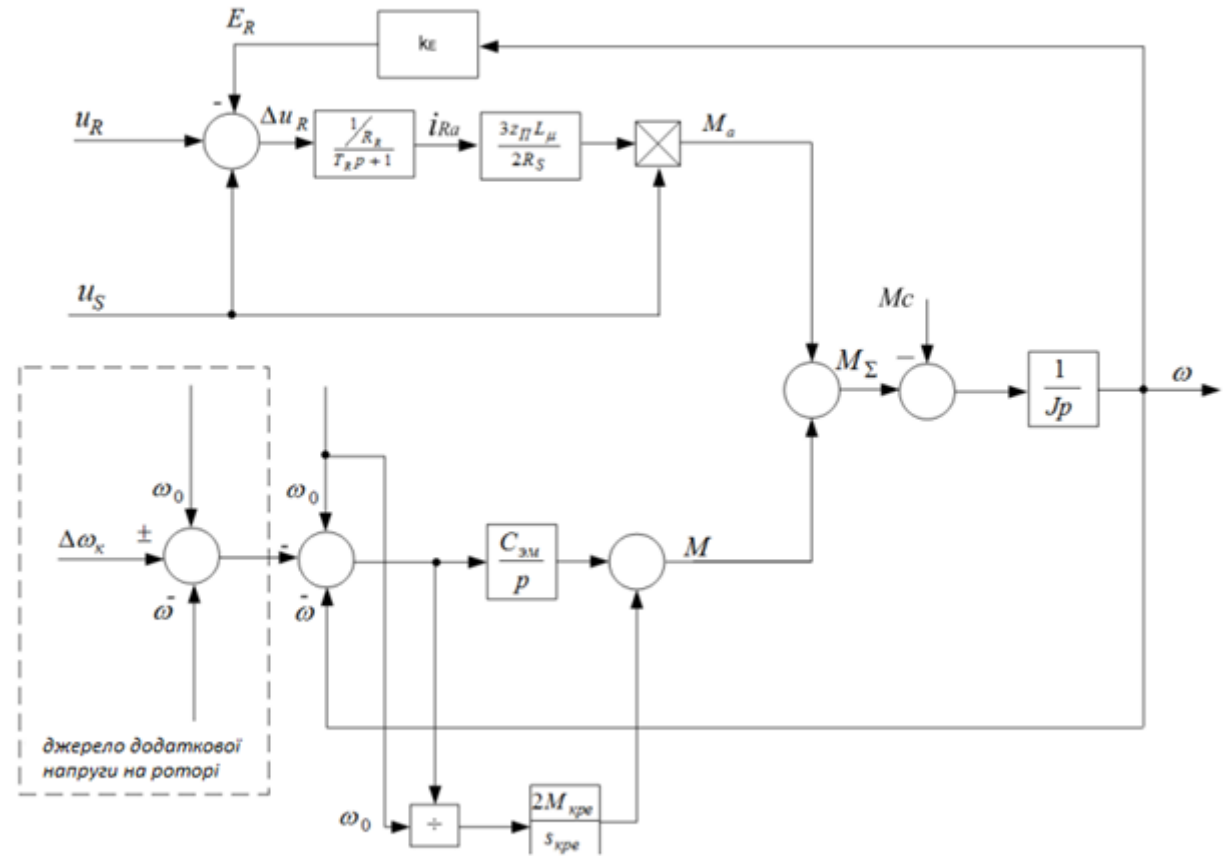


рисунок 13 – Еквівалентна структурна схема асинхронного двигуна з фазним ротором

Математичний опис електромагнітних процесів в АД за частотно-параметричного управління

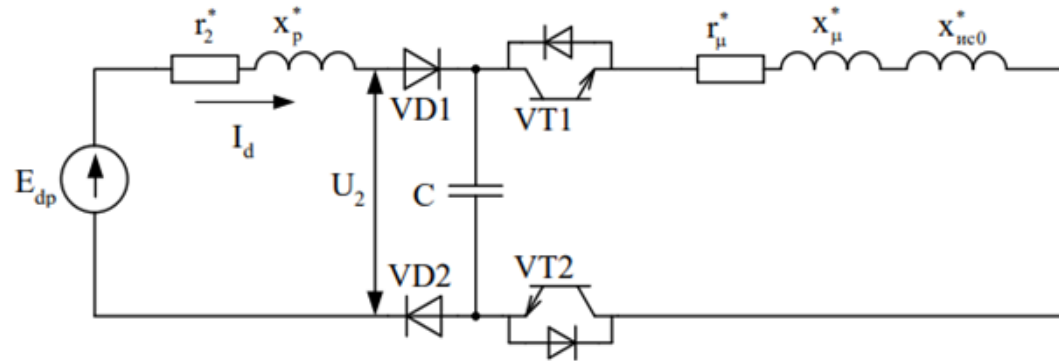
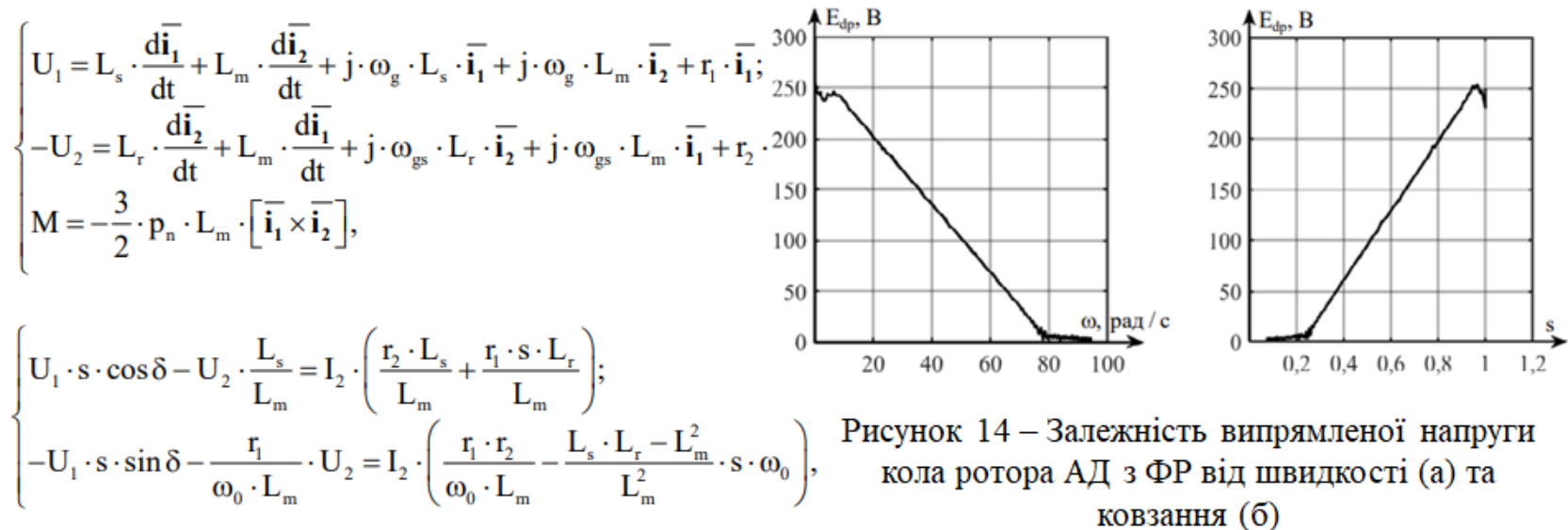


Рисунок 13 – Схема заміщення кола роторного, приведенного до ланки постійного струму



РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

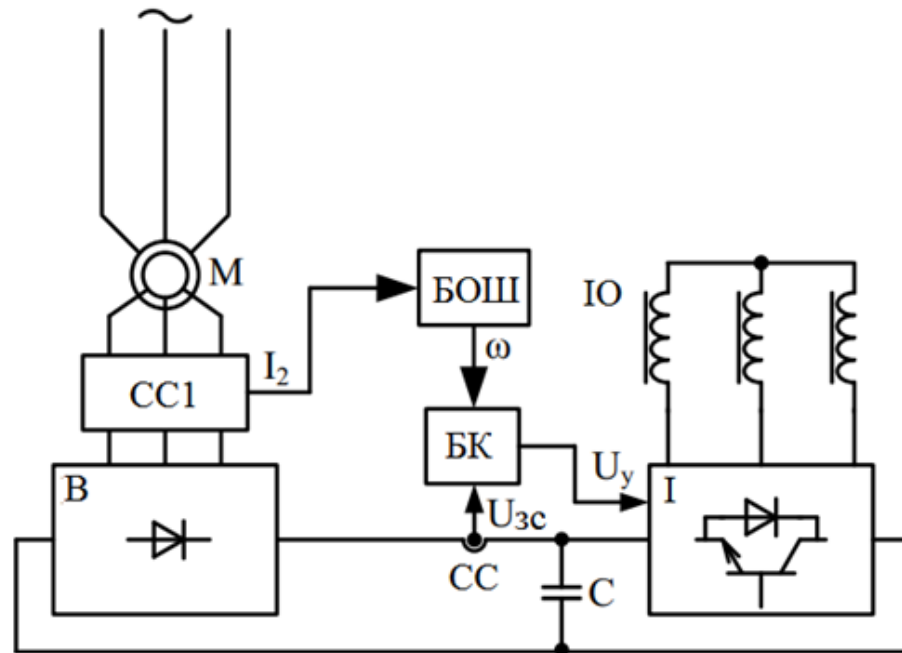


Рисунок 15 – Електропривод з частотно-параметричним регулятором в колі ротора

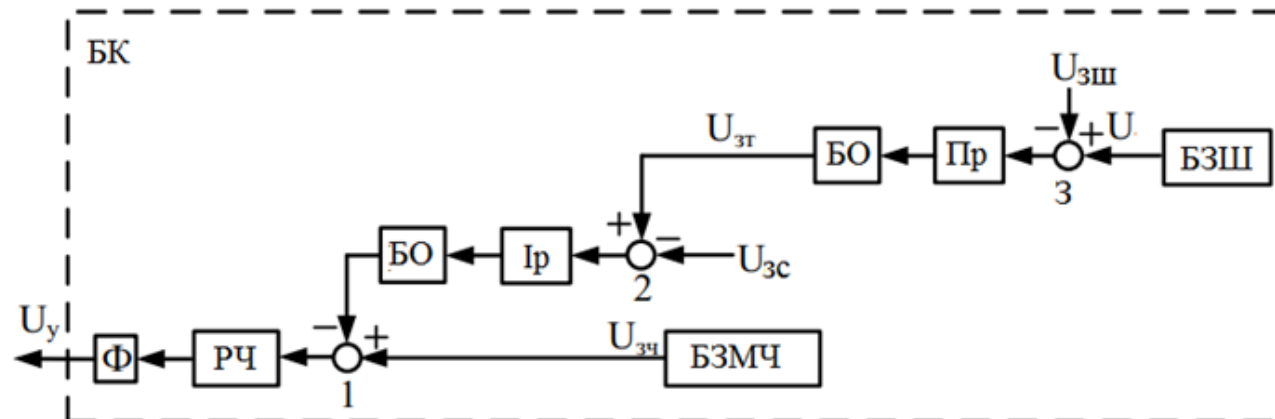


Рисунок 16 – Структурна схема блоку керування електропривода

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕП

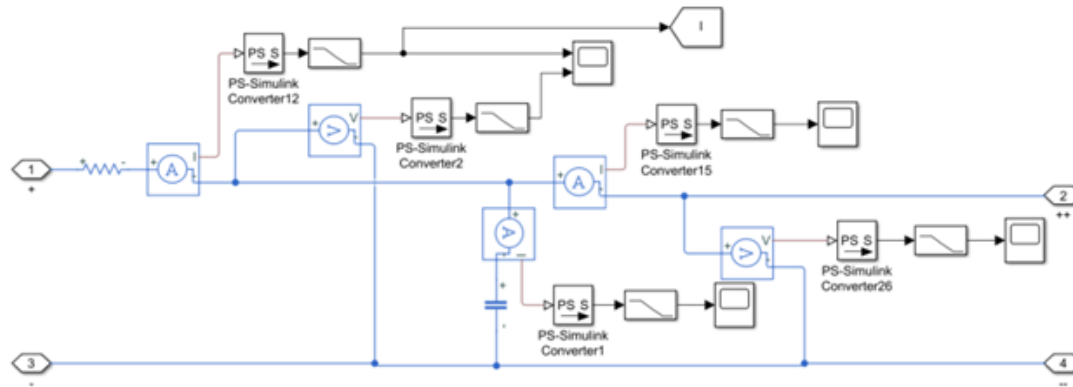


Рисунок 17 – Підсистема ланки постійного струму DC

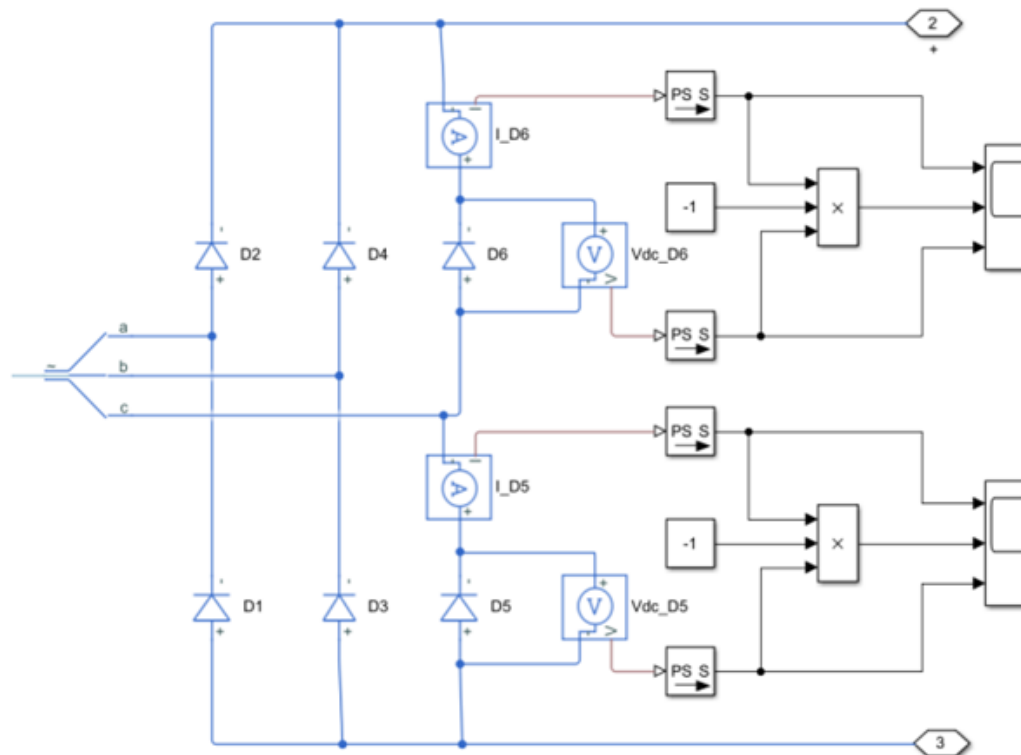


Рисунок 18 – Підсистема мостового діодного випрямляча Rectifier

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕП

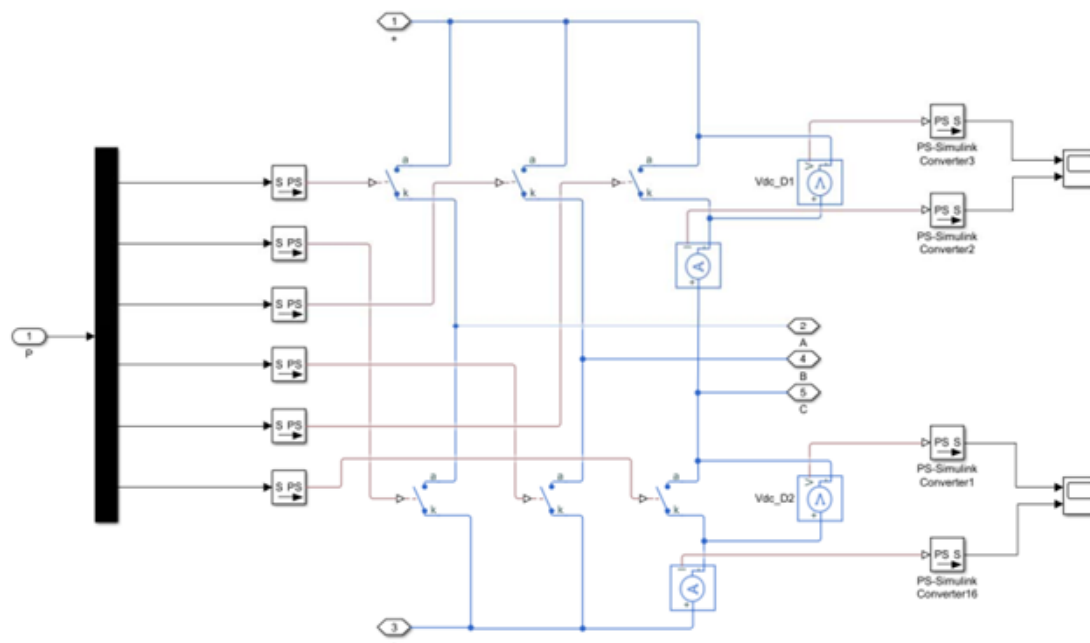


Рисунок 19 – Підсистема автономного інвертора напруги

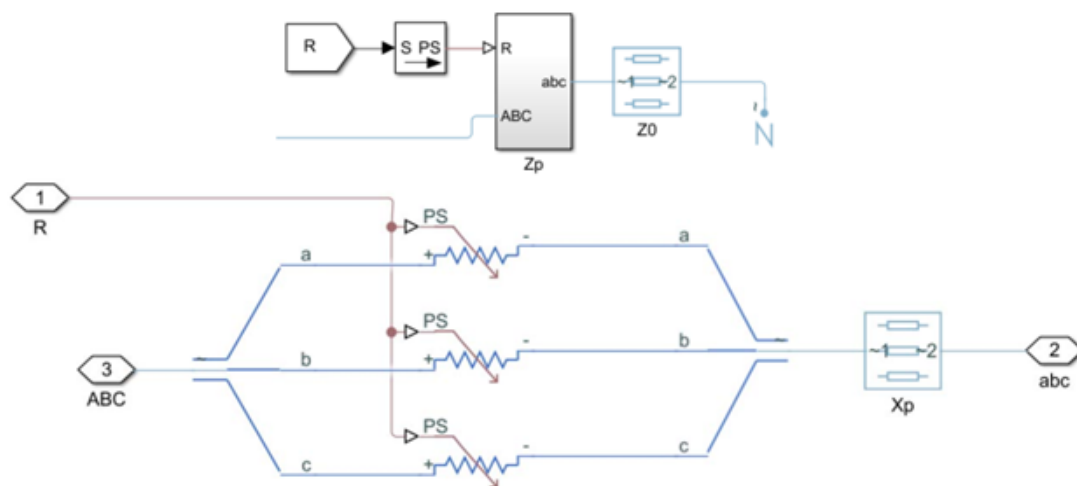


Рисунок 20 – Підсистема індукційного опору

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕП

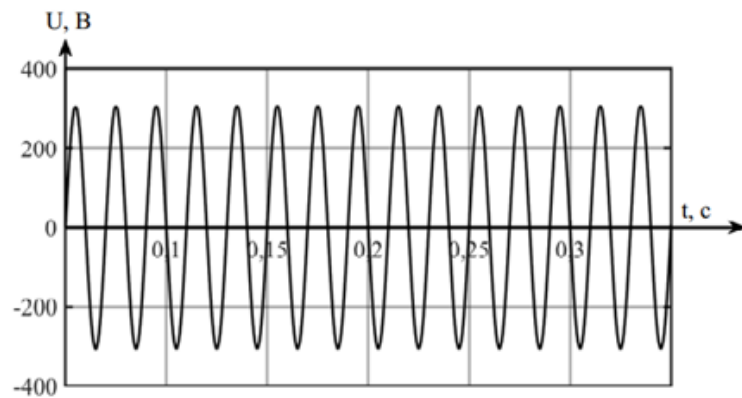


Рисунок 21 – Осцилограма напруги у фазі А

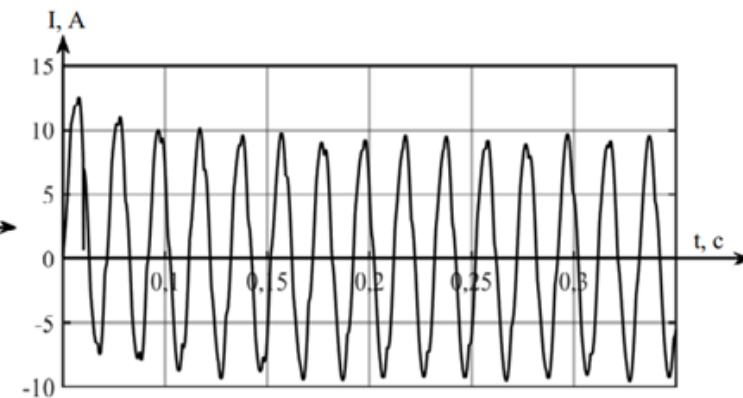


Рисунок 22 – Осцилограма струму в фазі А

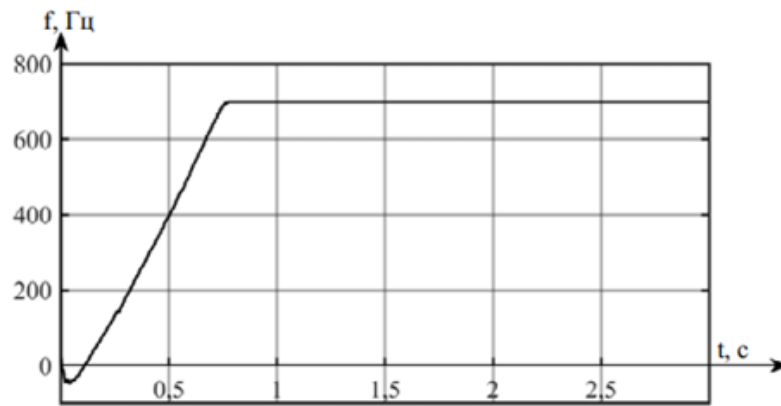


Рисунок 23 – Осцилограма вихідного сигналу І-регулятора струму

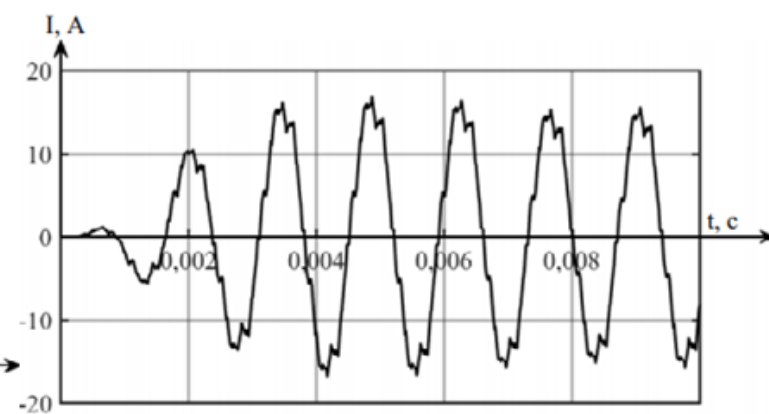


Рисунок 24 – Осцилограма струму в обмотках ІО

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕП

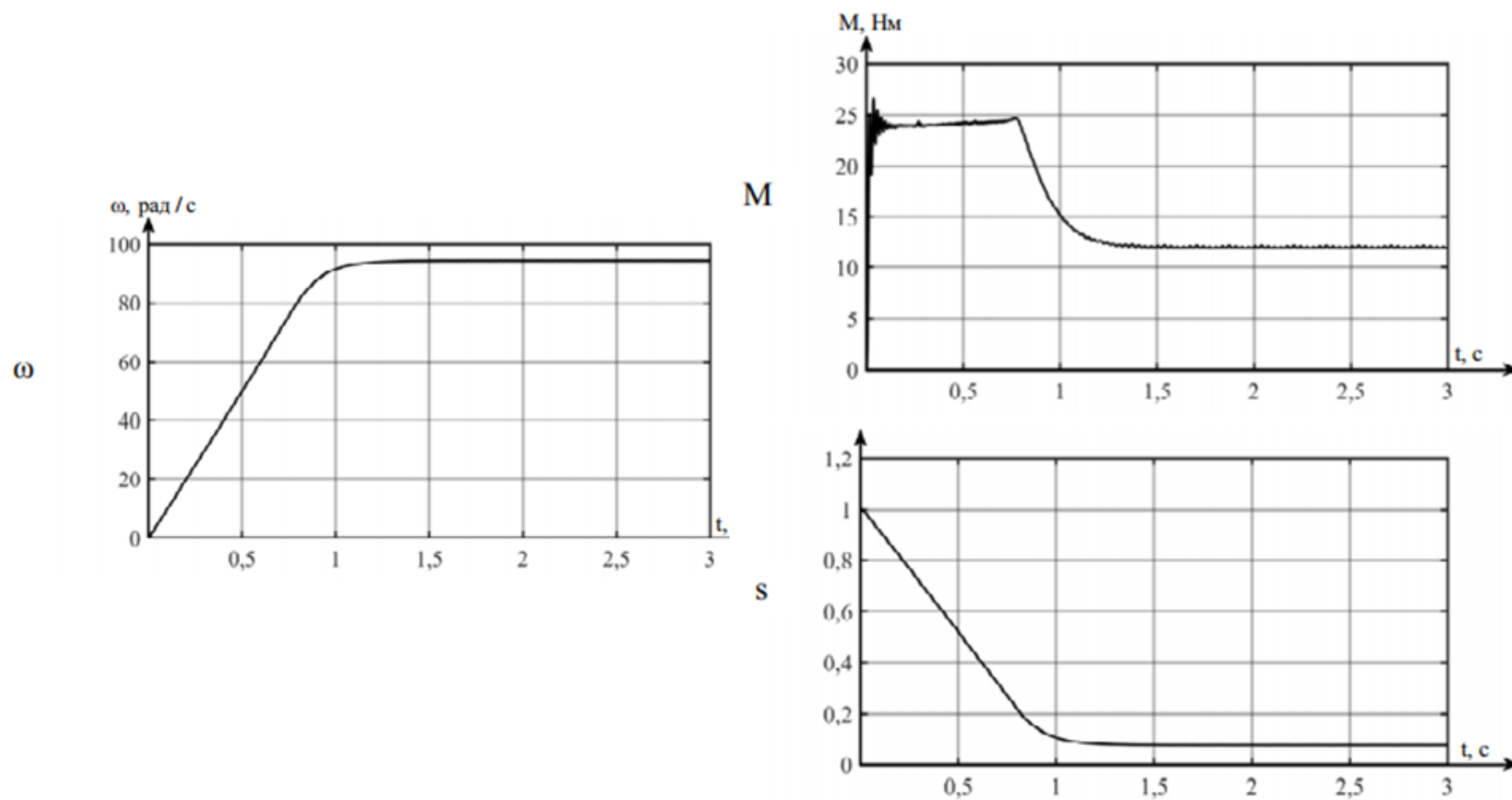


Рисунок 25 – Осцилограми виду $\omega=f(t)$, $M=f(t)$ и $s=f(t)$

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕП

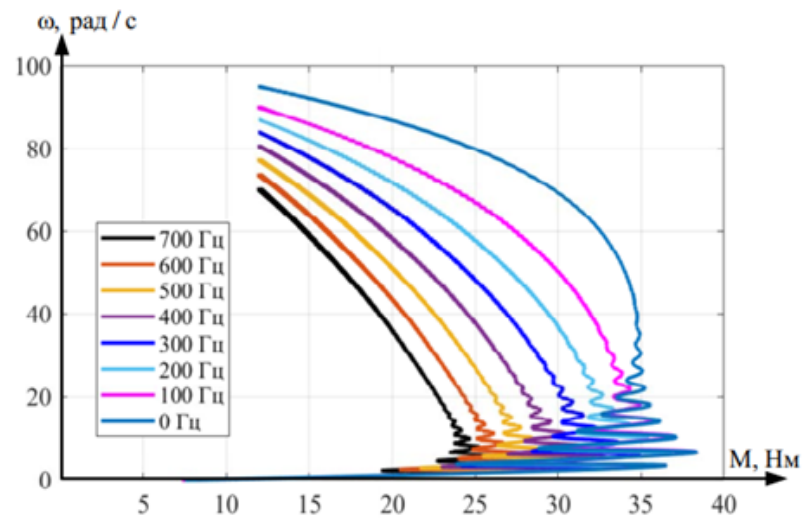


Рисунок 26 – Механічні характеристики електроприводу

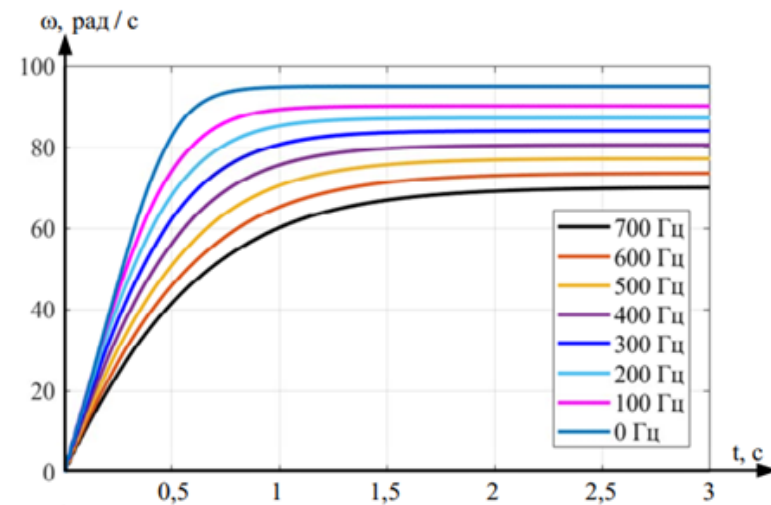


Рисунок 27 – Графіки залежностей $\omega=f(t)$ при різних частотах

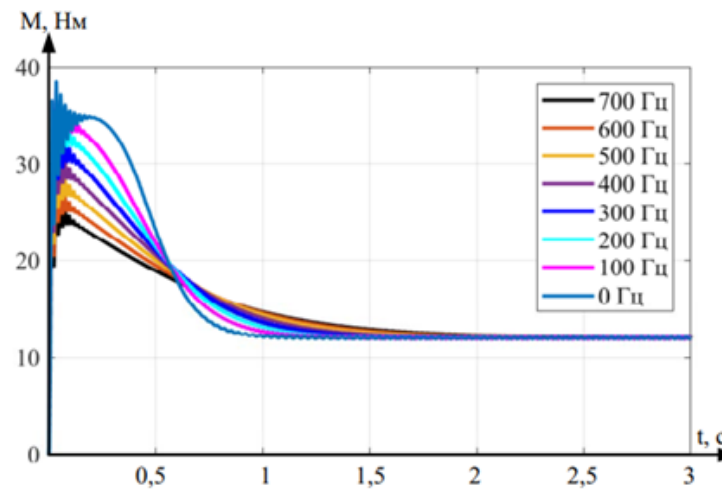


Рисунок 28 – Графіки залежностей $M=f(t)$ на різних частотах

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

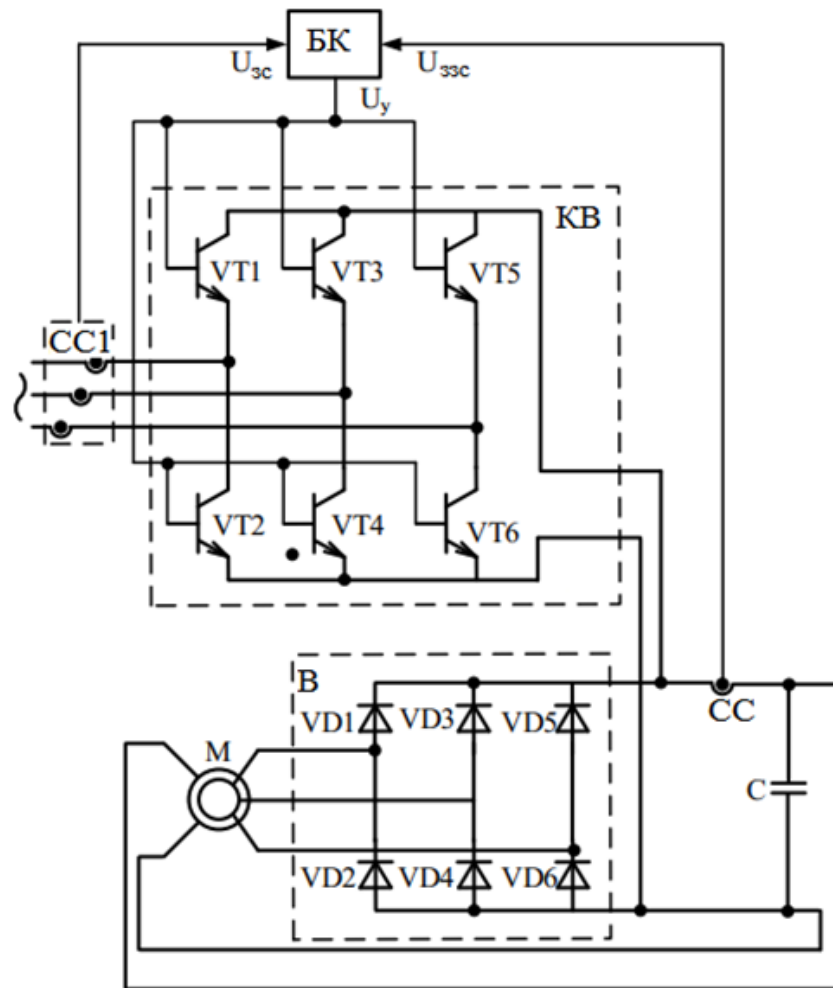


Рисунок 29 – Схема електродинамічного гальмування самозбудженням

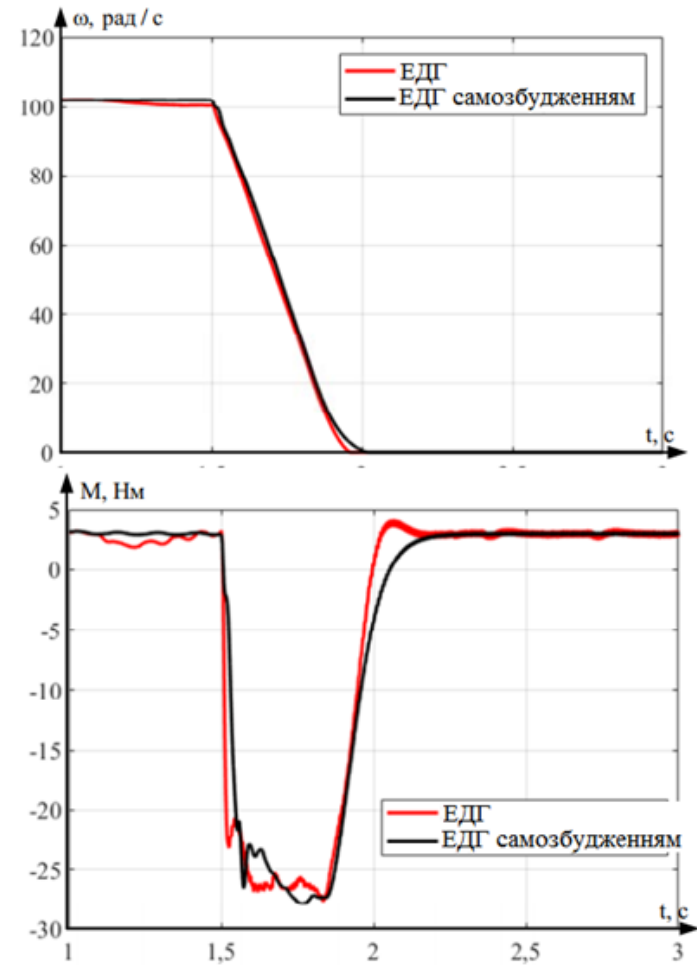


Рисунок 30 – Графіки $\omega=f(t)$ $M=f(t)$

ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд основних особливостей сучасних частотних перетворювачів і електроприводів стабілізації швидкості асинхронних двигунів, проведено аналіз сучасних систем електроприводу, рекомендованих для конвеєрних установок.

2. Розроблено систему плавного пуску АД з ФР, що забезпечує сталість пускового моменту і можливість регулювання швидкості в діапазоні до 1:10.

3. Запропоновані математичні моделі пристроїв, що входять до складу електроприводу, описано електромагнітні процеси в каскадній схемі. Визначено, що при регулюванні швидкості шляхом зміни амплітуди додаткової напруги на роторі під дією навантаження відбувається зменшення швидкості обертання, машина має перевантажувальну здатність не вище за природну. Робота машини при швидкості нижче 0,5 ω_0 при регулюванні швидкості зміною амплітуди недоцільна через зменшення моменту двигуна.

4. Запропоновано спосіб електродинамічного гальмування електроприводу з самозбудженням за рахунок віддачі енергії електродвигуна з кола ротора через керований випрямляч в коло статора з додатковим підживленням ланки постійного струму від незалежного джерела енергії. Система гальмування самозбудженням забезпечує зниження споживаної енергії на 33% порівняно з електродинамічним гальмуванням.

5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Паянок О.А.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	88 %
Загальна схожість	12 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор 
(підпис)

Димидюк Р.С.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Паянок О.А.
(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

					08-24.МКР.006.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи частотно-параметричного керування асинхронним двигуном з фазним ротором	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив:		Димидюк Р.С.		18.11.24					
Перевішив		Паянок О.А.		18.11.24					
Т. контр.									
Рецензент				07.12.24	Аркуш	Аркушів			
Норм.кон.		1189 ксб		19.11.24	ВНТУ, гр. ЕПА-23м				
Затверд.		Мошноріз М.М.		19.11.24					