

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 частотного асинхронного електропривода
стрічкового конвеєра»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-22м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

ОЗС

Олег ЗАДАНЮК

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри КЕМСК

Володимир БОГАЧУК

(прізвище та ініціали)

« 21 » 11 2023 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ЕСЕМ

Бабенко О.В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри [підпис]

« 28 » 11 2023 р.

Протокол № 7

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

“24” 10 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Заданюк Олег Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра

керівник роботи Володимир Васильович Богачук, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року №247

2. Строк подання студентом роботи 28.11.2023р.

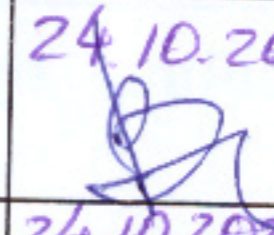
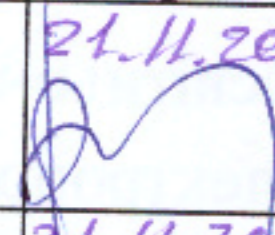
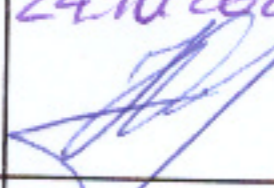
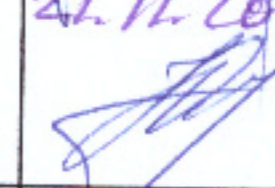

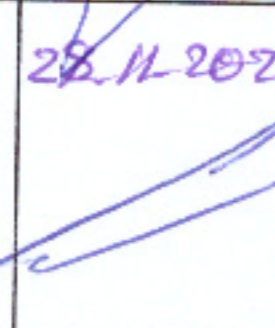
3. Вихідні дані до роботи: режим роботи - тривалий, АД з ФР ротором, кінематична схема, забезпечення режимів роботи електроприводу: розгін з частотною корекцією до надсинхронної швидкості, режим синхронізації АД, робота на заданій швидкості в режимі руху.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Системи електропривода змінного струму стрічкових конвеєрів. 2 Дослідження властивостей синхронізованого електропривода. 3 Розробка системи управління синхронізованим асинхронним електроприводом. 4 Оцінка показників та характеристик частотного асинхронного та синхронізованого електроприводів. 5 Дводвигунний синхронізований асинхронний електропривод стрічкового конвеєра. 6 Комп'ютерне моделювання системи електропривода стрічкового конвеєра. 7 Економічна частина. 8 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. Характеристики технологічного механізму. Завдання автоматизації стрічкових конвеєрів. Особливості та класифікація систем керування. Огляд систем регулювання швидкості ад. Математичні моделі АД в різних режимах. Розробка системи управління синхронізованим асинхронним електроприводом. Оцінка показників та характеристик частотного асинхронного та синхронізованого електроприводів. Дводвигунний синхронізований асинхронний електропривод стрічкового

конвеєра. Оцінка динамічних характеристик системи електропривода. Економічна частина
Висновки

6. Консультанти розділів роботи

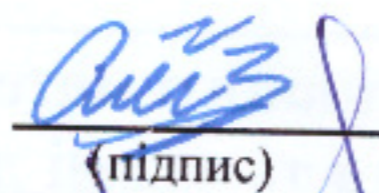
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Богачук В.В.	24.10.2023р. 	21.11.2023. 
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	24.10.2023р. 	21.11.2023р. 
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	24.10.2023р. 	28.11.2023р. 

7. Дата видачі завдання 24.10.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

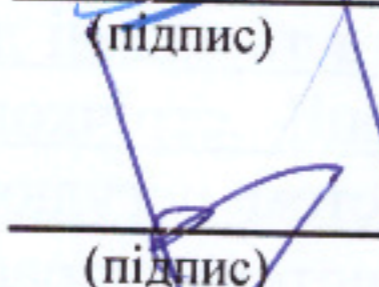
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	03.10.2023р.	пробок. зак. КЕМСК № 3
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	21.11.2023р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	28.11.2023р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.2023р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	28.11.2023р.	
6	Попередній захист МКР	28.11.2023р.	
7	Нормоконтроль МКР	28.11.2023р.	
8	Рецензування МКР (опонування)	11.12.2023р.	
9	Захист МКР	12.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Задатюк В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Богачук В.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 628.440.22

Заданюк О.С. Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2022. 126 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 23 назв; рис.: 48; табл. 13.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування електропривода стрічкового конвеєра. В основній частині роботи розроблено бездатчикову систему управління з адаптивним спостерігачем швидкості асинхронного двигуна, що дозволяє виключити похибку сигналу з датчика швидкості під дією механічних впливів на об'єкт управління, побудовано систему управління синхронізованим асинхронним електроприводом з незалежним живленням обмоток ротора та імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму, що забезпечує знижену кількість комутацій силових транзисторів інвертора за рахунок алгоритму формування струму у ланці постійного струму, що сприяє зниженню комутаційних втрат. Застосування системи управління з незалежним живленням обмоток ротора є актуальним у приводах стрічкових конвеєрів, що характеризуються постійним моментом опору та працюють у тривалому режимі. Для порівняльної оцінки розроблених систем управління побудовано робочі характеристики асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором та синхронізованого асинхронного двигуна при регулюванні ступеня навантаження двигуна.

Графічна частина складається з 18 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, синхронізований електропривод, моделювання, механічні характеристики, математична модель, автономний інвертор струму.

ABSTRACT

Zadanyuk O.S. Increasing the efficiency of the frequency asynchronous electric drive of the belt conveyor. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, ducational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2022. – 126 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 23 titles; fig.: 48; tabl. 13.

The solutions to increase the efficiency of the operation of the electric drive of the belt conveyor were proposed in the master's qualification work. In the main part of the work, a sensorless control system with an adaptive speed monitor of an asynchronous motor was developed, which allows to exclude the error of the signal from the speed sensor under the influence of mechanical influences on the control object, a control system for a synchronized asynchronous electric drive with independent power supply of the rotor windings and a pulse converter in the DC circuit was built of current, which ensures a reduced number of switchings of the power transistors of the inverter due to the current generation algorithm in the direct current circuit, which contributes to the reduction of switching losses. The use of a control system with independent power supply of the rotor windings is relevant in drives of belt conveyors, which are characterized by a constant moment of resistance and operate in a long-term mode. For a comparative evaluation of the developed control systems, the operating characteristics of an asynchronous motor with a short-circuited rotor and a synchronized asynchronous motor were constructed while adjusting the degree of motor load.

The graphic part consists of 18 posters with the results of the work.

In the section on labor protection, the main provisions regarding the safe operation of the studied electrotechnical complex under the influence of harmful factors of the surrounding environment are defined.

Key words: electric drive, asynchronous motor with a phase rotor, frequency converter, control system, synchronized electric drive, modeling, mechanical characteristics, mathematical model, autonomous current inverter.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ	
СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ.....	8
1.1 Особливості та класифікація систем керування електроприводу змінного струму.....	8
1.2 Огляд систем регулювання швидкості асинхронного двигуна у каскадних схемах.....	16
1.3 Принципи реалізації та сфери застосування синхронізованих приводів	19
1.4 Висновок.....	25
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИНХРОНІЗОВАНОГО	
ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	26
2.1 Математична модель синхронізованого асинхронного двигуна.....	26
2.2 Еквівалентна математична модель синхронізованої машини.....	33
2.2 Опис принципу формування вихідних змінних автономного інвертора.....	38
2.4 Висновок.....	43
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМ	
АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	44
3.1 Вдосконалення системи частотного керування асинхронним двигуном на базі інвертора струму з корекцією сигналу завдання частоти струму статора	44
3.2 Система керування синхронізованим асинхронним електроприводом із незалежним керуванням по колу ротора	49
3.3 Аналіз впливу імпульсного перетворювача у колі постійного струму на гармонійний склад струму статора та комутаційні втрати у транзисторах інвертора.....	53
3.4 Висновок.....	55

4 ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО И СИНХРОНИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	57
4.1 Дослідження енергетичних показників розробленої системи синхронізованого електроприводу.....	57
4.2 Робочі характеристики частотного асинхронного та синхронізованого електроприводів.....	58
4.4 Висновок.....	61
5 ДВОДВИГУННИЙ СИНХРОНІЗОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА.....	62
5.1 Висновок.....	67
6 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА.....	68
6.1 Оцінка динамічних характеристик системи електропривода.....	68
6.2 Висновок.....	73
7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	74
8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	85
ВИСНОВКИ.....	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	106
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	111

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В сьогоденні енергозбереження – це один із найважливіших напрямів у енергетичній політиці багатьох виробничих підприємств. Враховуючи, що більшу частину електроенергії, що виробляється, споживають електроприводи можна говорити про високу актуальність завдань пошуку шляхів енергозбереження при експлуатації, модернізації систем управління електроприводів. На підйомно-транспортних механізмах, у тому числі і на конвеєрах, що відрізняються великими моментами інерції та використовуються на багатьох промислових підприємствах, широко використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором. Регулювання швидкості в таких приводах забезпечується низькоефективним способом регулювання опору ланцюга ротора, що характеризується великими втратами. Підвищення енергоефективності даних приводів можливо здійснити застосуванням частотних перетворювачів. Однак замикання накоротко обмотки ротора не сприяє зниженню втрат.

Для усунення вищезгаданих недоліків доцільно виконувати переведення асинхронних двигунів у синхронний режим шляхом подачі постійного струму в коло ротора. При цьому способі керування статичні механічні характеристики асинхронного двигуна на робочій ділянці стають абсолютно жорсткими, суттєво знижуються втрати двигуна. Таким чином, актуальним завданням є створення енергоефективних систем керування синхронізованим асинхронним електроприводом конвеєрів, що забезпечують пуск із постійним прискоренням, регулювання швидкості у широкому діапазоні та формування жорстких механічних характеристик.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода стрічкового конвеєра.

Предметом дослідження є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електроприводу стрічкового конвеєра за рахунок введення бездатчикової системи керування частотним синхронізованим електроприводом та включенням обмоток ротора

асинхронного двигуна з ФР в ланку постійного струму перетворювача частоти з гістерезисними регуляторами струму фаз двигуна.

Метою є розробка та дослідження систем управління синхронізованим асинхронним електроприводом з частотно-струмовим керуванням із забезпеченням необхідних пускових та регулювальних характеристик за рахунок застосування коригувальних контурів регулювання та енергоефективних алгоритмів управління.

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

- аналіз систем керування двигунами змінного струму, зокрема асинхронним двигуном із фазним ротором;
- дослідження математичної моделі асинхронного двигуна з фазним ротором та аналіз варіантів підвищення її стійкості у синхронному режимі роботи за рахунок побудови додаткових контурів регулювання електромагнітних параметрів машини;
- розробка безсенсорної системи частотно-струмового керування синхронізованим електроприводом;
- оцінка розробленої системи управління, дослідження енергетичних показників аналізованого електроприводу в різних режимах роботи;
- 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 теорії теорії автоматичного управління, електричних машин, методів синтезу систем управління, теорії та методів математичного та імітаційного комп'ютерного моделювання та інших системних методів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблена система частотно-струмового керування процесом пуску синхронізованого асинхронного електроприводу, що відрізняється наявністю

блоку корекції сигналу завдання частоти струму статора на підставі непрямого визначення кута між векторами струму статора та основного потокозчеплення, та спостерігача швидкості, що забезпечує роботу контуру регулювання швидкості двигуна.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

- результати отриманих досліджень можуть бути використані в задачах проектування та оптимізації режимів роботи стрічкових конвеєрів;

- розрахункові результати досліджень можуть бути використанні під час вивчення фахових дисциплін таких освітніх програм як «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

- підвищення енергоефективності електроприводів, що містять у своєму складі АДФР, за рахунок переведення їх у синхронний режим із забезпеченням зменшення споживання електроенергії через зниження струму статора приблизно на 7-10%, та виключення низькоефективних способів регулювання швидкості по колу ротора.

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-2023).

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

- Підвищення ефективності асинхронного електропривода стрічкового конвеєра / В.В. Богачук, О.С. Заданюк – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024. – 3 с

1 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

1.1 Особливості та класифікація систем керування електроприводу змінного струму

В сьогоденні енергоефективність є пріоритетним напрямом розвитку енергетики. Більшість електроенергії, що витрачається на промислових підприємствах, припадає на частку електроприводів, що виконують функцію перетворення електричної енергії в механічну. Таким чином, для вирішення актуальних завдань енергозбереження необхідно впроваджувати на виробництві нові, енергоефективні системи керування електроприводами (СКЕП).

Через зростаючі вимоги технологічних процесів до динаміки перехідних процесів, а також необхідність підвищення ефективності використовуваного електроустаткування виникає тенденція переходу від використання електроприводів постійного струму до електроприводів змінного струму.

Сучасний автоматизований електропривод - складна система автоматичного управління, що здійснює крім вироблення механічної енергії збір інформації про параметри технологічного процесу, її обробку та видачу керуючих сигналів на вихідний пристрій, що забезпечує необхідний перебіг процесу [1]. Будь-яку СКЕП можна представити як систему, яка приймає і обробляє сигнали. Розрізняють три основні види систем управління: замкнуті по зворотному зв'язку, розімкнені та комбіновані, що включають елементи двох попередніх систем [2].

У розімкнених системах не застосовується вимірювання та контроль вихідного сигналу або параметра. Сигнал управління залежить від вихідної величини [3]. У таких системах є лише один канал завдання необхідного параметра, що регулюється. СКЕП подібного типу характеризуються

низькою точністю регулювання та використовуються переважно у системах управління пуску та гальмування двигунів, або у системах регулювання швидкості у невеликому діапазоні [4, 5, 6].

У системах управління, що працюють за замкнутим типом, використовуються два канали даних:

- задаючий канал;
- канал зворотного зв'язку, який містить інформацію про фактичне значення регульованого параметра.

Точність роботи СКЕП із зворотними зв'язками вище, що є причиною застосування їх у багатьох галузях техніки:

- системи регулювання швидкості об'єктів управління в широких межах;
- системи регулювання зі складним законом завдання сигналу;
- у групових приводах виробничих механізмів;
- у системах, що мають підвищені вимоги до характеру формованих процесів при пуску, гальмуванні та реверсі.

Самими досконалими та найскладнішими є комбіновані системи. Вони включають елементи як розімкнених, так і замкнутих систем управління. До основи замкнутої структури додається розімкнуте коло з інформацією про збурюючий вплив [7, 8]. У каналі регулювання є складова, що компенсує вплив збурення на вихідний параметр. Це забезпечує незалежне регулювання вихідного параметра сигналу збурення. Вплив збурюючих сигналів на властивості вихідного регульованого параметра нівелює основний зворотний зв'язок.

СКЕП можуть бути аналоговими (безперервними) та дискретними (імпульсними, цифровими) [9, 10]. Також вони поділяються на статичні або астатичні по відношенню до збурюючого впливу.

Залежно від силового перетворювача СКЕП класифікуються на:

- тиристорний перетворювач-двигун;
- магнітний пускач - двигун;

- релейно-контакторні системи; - системи безконтактного управління;
- системи дросельного регулювання;
- перетворювач частоти-двигун;

Залежно від виконуваної функції СКЕП прийнято класифікацію:

- системи пуску, гальмування та реверсу;
- системи підтримки заданої величини в статичних або динамічних режимах;
- системи стеження за параметрами, що вводяться в СК;
- системи, що працюють за заздалегідь заданою програмою (програмне управління);
- системи вибору оптимальних параметрів роботи ЕП (адаптивні).

В даний час найбільш поширеним типом промислового регульованого електроприводу, що масово випускається у світі, є електропривод змінного струму на базі асинхронного двигуна (АД) [12, 13, 14]. Це можна пояснити тим, що цей тип двигуна характеризується надійністю роботи, простотою конструкції тощо. Застосування регульованого електроприводу змінного струму стало можливим насамперед завдяки розвитку напівпровідникової перетворювальної техніки. Розробка нових силових напівпровідникових елементів і швидкодіючих трифазних перетворювачів на їх основі, що мають високі енергетичні показники, дала можливість керувати не тільки величиною напруги, що підводиться до статора, але і його частотою.

Якщо класифікувати способи частотного управління за критерієм сигналу, що управляє, можна виділити наступні способи:

- регулювання напруги і частоти статора;
- регулювання частоти та струму статора.

Асинхронний двигун є складним об'єктом регулювання, що включає кілька параметрів, пов'язаних між собою властивостями машини. Завдання формування частоти здійснюється за допомогою замкнутого контуру регулювання швидкості, як різниця між фактичним значенням швидкості і необхідним значенням. Одним із головних критеріїв у процесі частотного

регулювання швидкості асинхронного двигуна є забезпечення необхідної жорсткості механічних характеристик у заданому діапазоні регулювання. При цьому характеристика асинхронних двигунів сама по собі досить жорстка. Це дозволяє у ряді випадків відмовитися від замкнутого контуру швидкості, виключивши сигнали зворотного зв'язку із системи управління. Вибір закону регулювання впливає на перевантажувальну здатність двигуна. У цьому досить складно забезпечити стабілізацію моменту низьких частотах.

У величезній кількості робіт зарубіжних та вітчизняних авторів розглядаються питання розробки оптимальних алгоритмів роботи перетворювачів частоти (ПЧ) для електроприводів, побудованих з двигунами змінного струму [10, 11].

Керовані перетворювачі класифікують так[12]:

- безпосередні перетворювачі частоти (НПЧ).
- дволанкові перетворювачі частоти.

Розробка тиристорів в середині минулого століття сприяла появі систем автоматичного керування саме на цих силових елементах. Були зібрані безпосередні перетворювачі частоти. У своєму складі кожен БПЧ має три двокомплектні реверсивні перетворювачі, по одному в кожній фазі. Кожен комплект працює тільки з однієї напівхвильової синусоїди. У такому перетворювачі напруга подається на двигун одразу через керовані вентилі.

На рисунку 1.1 показана схема безпосереднього перетворювача частоти, що здійснює перетворення трифазної напруги мережі в однофазну з регульованою частотою. Двополярна напруга формується за допомогою перемикання першого та другого комплектів. Можливі два варіанти управління такими перетворювачами: прямокутний та синусоїдальний [11, 12]. У першому випадку на один комплект подаються керуючі імпульси з певним кутом управління протягом напівхвилі, поки він працює у випрямлячому режимі, а далі вже з іншим випереджальним кутом, для зниження струму в інверторному режимі. Після цього подаються аналогічні імпульси на другий комплект. У разі синусоїдального управління кут

управління постійно змінюється, забезпечуючи цим синусоїдальну форму вихідної напруги.

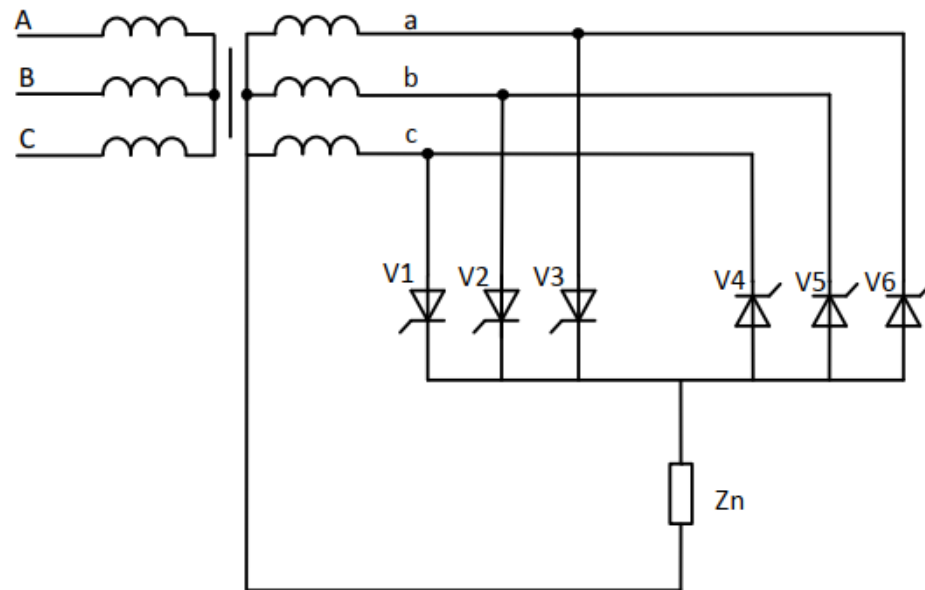


Рисунок 1.1 – Схема трифазно-однофазного БПЧ

Перевагами безпосереднього перетворювача частоти є:

- можливість реверсивної роботи випрямлячів, як наслідок обмін активною та реактивною енергією між двигуном та мережею живлення;
- високі енергетичні показники, оскільки енергія не проходить дворазове перетворення як і дволанкових ПЧ;
- реалізація наднизьких частот вихідної напруги;
- реалізація перетворювачів частоти значної потужності у разі паралельного включення вентилів.

Недоліками безпосередніх перетворювачів частоти є:

- несинусоїдальна форма вихідної напруги на високих частотах;
- велика кількість силових напівпровідникових ключів.

Розрізняють широтно-імпульсне регулювання (ШІР) та широтноімпульсну модуляцію (ШІМ) [12, 14]. На рисунку 1.2 приведено схему дволанкового перетворювача частоти на основі автономного інвертора напруги.

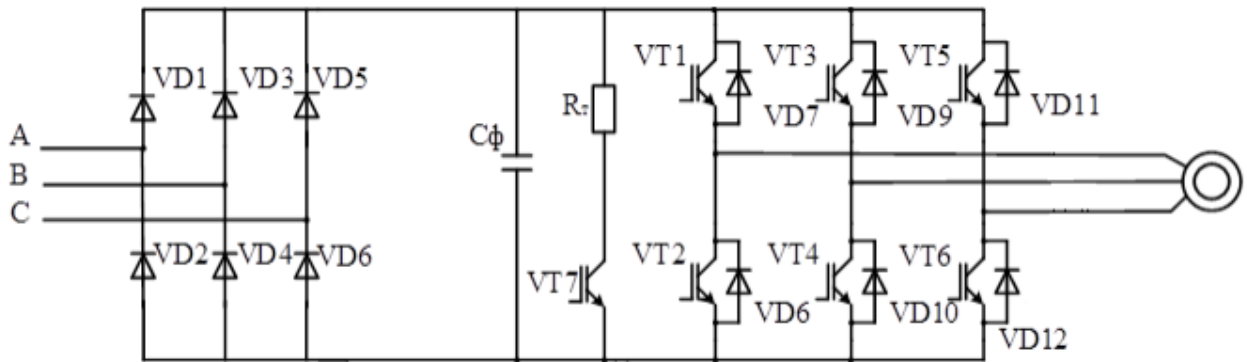


Рисунок 1.2 – Схема дволанкового перетворювача частоти з АИН

Некерований випрямляч зібраний на діодах VD1-VD6 автономний інвертор на транзисторах VT1-VT6, які шунтовані діодами VD7-VD12.

Діоди необхідні для пропускання струму при відключенні відповідного транзистора. Вихідна напруга регулюється за допомогою ШІМ. За рахунок цього напруга на виході інвертора має форму близьку до синусоїдальної. Гальмування здійснюється шляхом переведення АИН в режим випрямляча. Транзистор VT7 необхідний підключення гальмівного опору, у якому відбувається розсіювання зайвої енергії, при перевищенні напруги на конденсаторі фільтра. Таке гальмування отримало назву інверторного. Недоліком таких ПЧ є неможливість рекуперативного гальмування. Для забезпечення рекуперації енергії у мережу під час гальмування у перетворювачах частоти на основі АИН потрібен додатковий комплект тиристорів, які працюватимуть в режимі інвертора. Однак, у такому випадку на вентилі необхідно буде прикладати завищену напругу, що призведе до подорожчання перетворювача внаслідок використання додаткового трансформатора, або забезпечувати роботу випрямляча тільки з кутом управління більше α_{\min} .

У перетворювачах частоти на основі АІС відбувається перетворення постійного струму на вході інвертора в пропорційний змінний струм [14]. Рекуперація енергії в таких перетворювачах проводиться шляхом переведення АІТ у режим випрямлення. Випрямляч переводиться в режим інвертора. При цьому не потрібний додатковий комплект силових ключів.

На рисунку 1.3 приведена схема перетворювача частоти з АІС.

Такі схеми застосовуються в потужних механізмах, і через невисокі енергетичні показники не є перспективними. Значного підвищення показників можна досягти використанням тиристором, що замикаються в АІС. Формування струму на виході інвертора проводиться у разі вже разом із керованим випрямлячем.

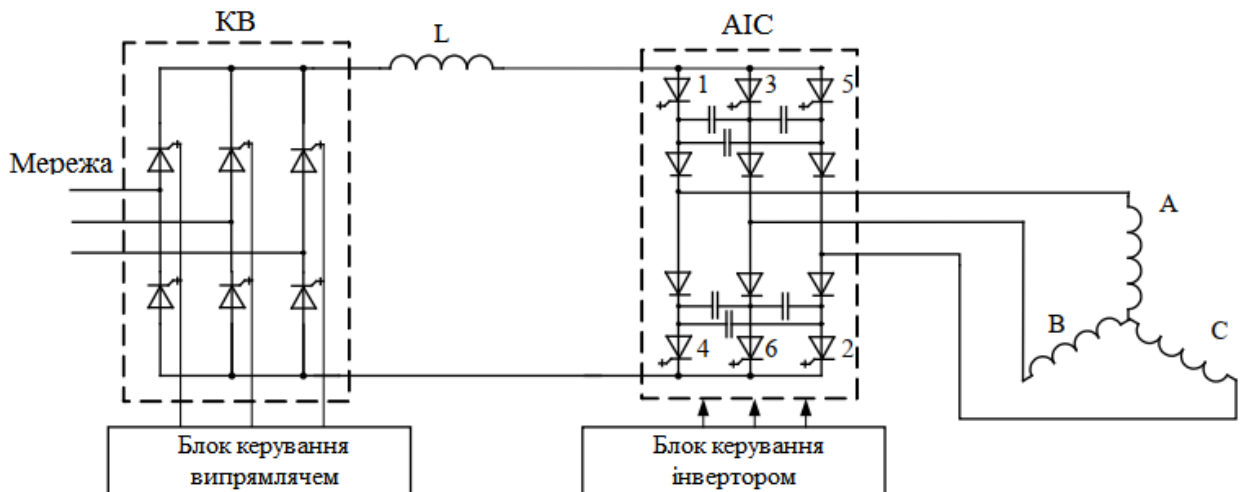


Рисунок 1.3 – Схема дволанкового перетворювача частоти на основі АІС

Це призводить до значного поліпшення форми вихідного струму, яка близька до синусоїдальної. ПЧ із інверторами струму знайшли своє застосування в електроприводах, у складі яких використовуються синхронні двигуни, де замість АІС використовуються інвертори, ведені мережею. Перемикання силових ключів у них проводиться за рахунок ЕРС двигуна.

Перевагами дволанкових перетворювачів є те, що вони дозволяють отримати на виході інвертора напругу як більшої, так і меншої частоти в порівнянні з частотою напруги мережі.

Ще важливим є менша порівняно з ДПЛ кількість силових елементів. Недоліками є перетворення енергії, що призводить до збільшення втрат і залежності комутація ключів від навантаження двигуна. У 90-х роках минулого століття було отримано новий тип керованих напівпровідникових елементів:

- силові транзистори (MOSFET);

- тиристори (GTO), що замикаються;
- біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT);
- тиристори, що замикаються, з інтегрованим блоком управління, комутовані по керованому електроду (IGCT).

У сучасних частотних перетворювачах функції управління двигуном покладено контролери, здатні реалізувати різні алгоритми.

Методи та способи управління відрізняються у перетворювачах різних виробників. Ці методи не розголошуються та є інтелектуальною власністю фірми-виробника.

На сьогодні існують такі основні способи частотного керування:

- ПЧ із скалярною системою регулювання швидкості;
- ПЧ з векторним принципом управління та ШІМ;
- ПЧ на основі прямого керування моментом;
- ПЧ із системами управління, що включають елементи, які ґрунтуються на нечіткій логіці.

У механізмах, які не пред'являють жорстких вимог до точності підтримки кутової швидкості, рідко застосовують датчик положення ротора.

Це призводить до зниження надійності електроприводу та подорожчання компонентів системи керування. У таких випадках можуть бути використані спостерігачі, які не потребують інформації про поточне положення ротора та визначають його за поточними виміряними параметрами системи управління.

Основними способами синтезу спостерігача для бездатчикової системи управління є:

- спостерігач на основі принципу порівняння ЕРС;
- спостерігач від компанії TEXAS INSTRUMENTS;
- спостерігач на основі фільтра Калмана;
- спостерігач Люенберґера;
- адаптивний спостерігач потоку та швидкості Х. Куботи;
- спостерігачі на основі магнітних геометричних параметрів машини.

Алгоритми, які реалізовані в сучасних перетворювачах, є невідомі, оскільки ця інформація є секретною.

1.2 Огляд систем регулювання швидкості асинхронного двигуна у каскадних схемах

На конвеєрах, що використовуються, наприклад, у металургійному виробництві, широко застосовуються асинхронні двигуни з фазним ротором з різними системами управління, серед яких можна виділити неекономічні системи параметричного управління та більш економічні системи з вентильними перетворювачами, що включаються в основному коло ротора двигуна.

У системах управління асинхронним двигуном з фазним ротором найчастіше статор двигуна підключається до мережі, в коло ротора включається опір, або напівпровідниковий перетворювач. У способах управління колом ротора існує важлива можливість регулювання та управління енергією ковзання, що не характерно для систем управління з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. Такі системи управління мають високий ККД, який зберігається при зміні швидкості в широкому діапазоні. Перевантажувальна здатність електроприводу також досить висока.

У вентильно-машинних електромеханічних каскадах потужність ковзання йде на живлення машини постійного струму. Схема каскаду приведена на рисунку 1.4. Якір двигуна постійного струму заживлений від некерованого випрямляча, встановленого в колі ротора АД ФР. Потужність ковзання у такому каскаді йде на формування додаткового моменту. При цьому йде розподіл сумарного моменту за наступним принципом: при ковзанні асинхронного двигуна близького до номінального, більшість моменту розвивається ним, якщо швидкість знижується – двигуном постійного струму. Тим самим забезпечується сталість моменту. Зміною

напруги збудження двигуна постійного струму у подібній схемі керують швидкістю асинхронного двигуна.

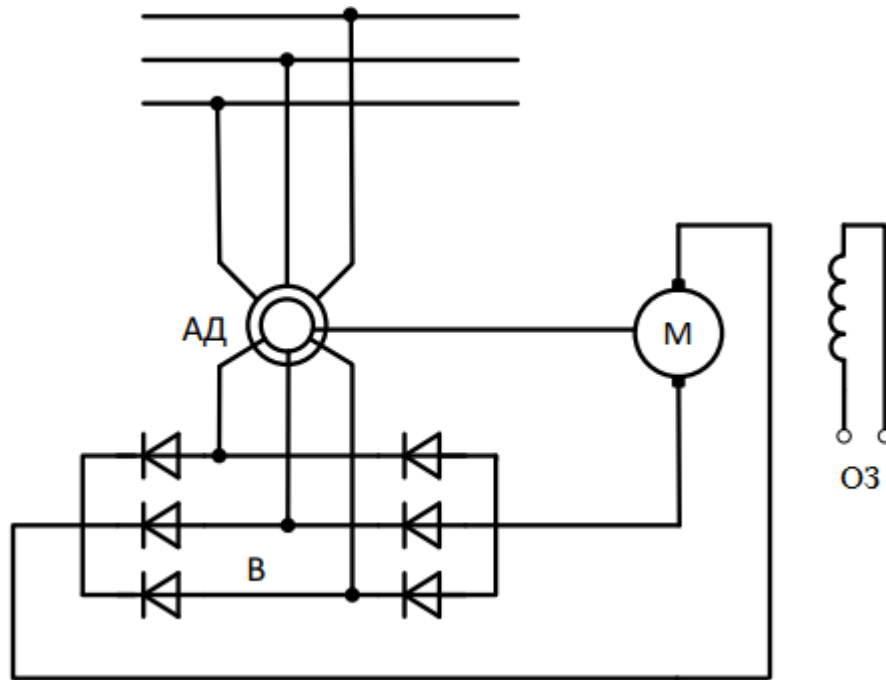


Рисунок 1.4 – Схема вентильно-машинного електромеханічного каскаду

Перевагою даного рішення є сталість розвинутої потужності на валу двигуна внаслідок збільшення моменту при зниженні швидкості.

Однак, зі збільшенням діапазону регулювання швидкості значно збільшуються і масо-габаритні показники двигуна постійного струму, внаслідок чого застосування даного типу каскадів обмежено механізмами, що мають електроприводи з діапазоном регулювання, що не перевищують 2:1.

У вентильно-машинних каскадах, на відміну від попереднього типу, потужність ковзання віддається у мереж. Для цього до двигуна постійного струму механічно приєднано синхронний генератор (рисунок 1.5). Від ротора АД ФР потужність ковзання передається двигуну постійного струму, від нього йде на синхронний генератор і далі віддається в мережу. Тим самим забезпечується дворазове перетворення енергії.

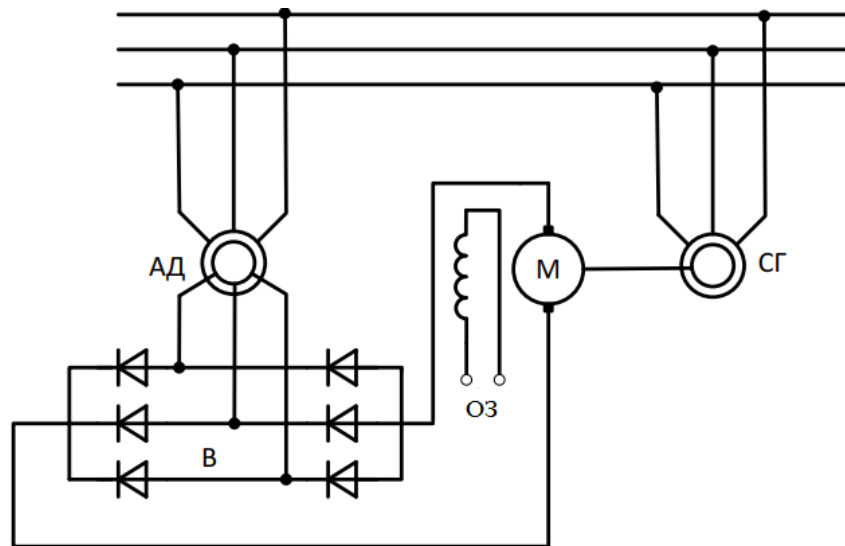


Рисунок 1.5 – Схема вентиляльно-машинного каскаду

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

На рисунку 1.6 приведена схема асинхронно - вентиляльного 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.

Перевагами такої схеми є простота конструкції, більший у порівнянні з вентиляльно-машинним каскадом діапазон регулювання швидкості, та високий ККД за рахунок повернення енергії ковзання в мережу живлення. Однак даний каскад не дозволяє працювати АД у руховому режимі на швидкості вище синхронної і в генераторному на швидкості нижче синхронної. Ці недоліки можна обійти, позбувшись ланки постійного струму, і встановивши два регульовані перетворювачі. При цьому керувати вентилями можна або в залежності від частоти ковзання, або незалежно амплітудою і частотою підведеної додаткової ЕРС. Це дозволить працювати двигуну як у генераторному, так і в двигунному режимах на швидкостях не вище за

синхронну. Але, як і раніше, неможливий двигунний режим АД на швидкості вище синхронної.

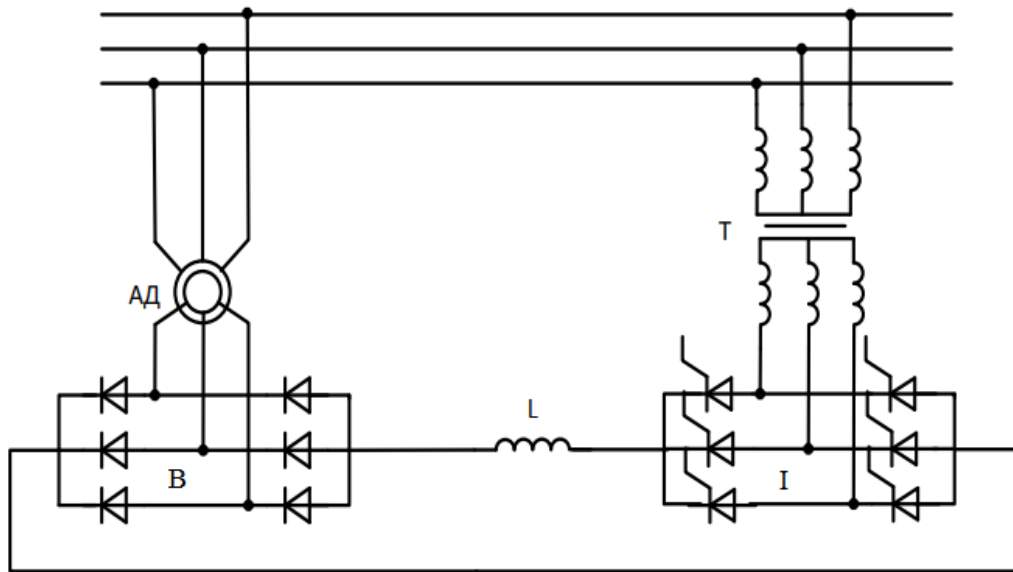


Рисунок 1.6 – Схема асинхронно-вентильного каскаду

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.

1.3 Принципи реалізації та сфери застосування синхронізованих приводів

Механізми, в яких до систем управління пред'являються підвищені вимоги, пов'язані з отриманням жорстких механічних характеристик у широкому діапазоні швидкостей, до яких належать механізми конвеєрів, становлять значний інтерес. В таких випадках можливе застосування частотних способів регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором. Якщо ротор двигуна заживлюється від джерела постійної напруги, то режим, що виникає при цьому, називають синхронізованим режимом роботи асинхронного двигуна. Подібний режим роботи має низку переваг, однією з яких є можливість регулювання коефіцієнта потужності

асинхронного двигуна та енергосистеми в цілому. Подібні способи керування асинхронним двигуном розглядалися та аналізувалися раніше. При підключенні двох обмоток ротора до джерела постійного струму асинхронний двигун має властивості синхронного.

Крім того, існує метод управління двигуном, який отримав назву імпульсно-векторного. Принцип роботи асинхронного двигуна при реалізації цього способу управління показаний рисунку 1.7.

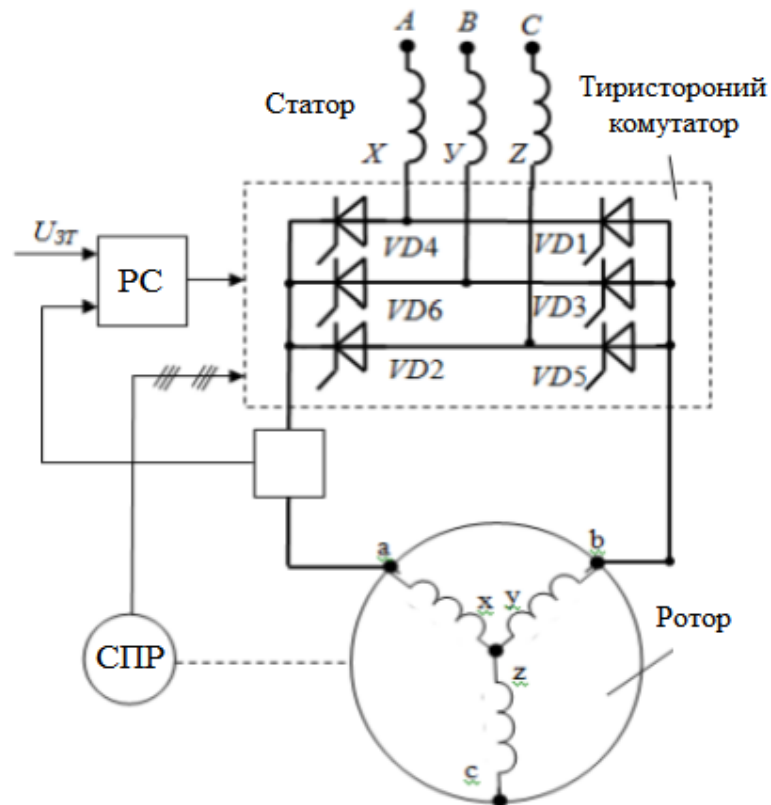


Рисунок 1.7 – Функціональна схема електроприводу з імпульсно-векторним керуванням

Головним недоліком даної системи управління є пульсація електромагнітного моменту асинхронної машини через несинусоїдальну форму кривих струму і напруги. Це є причиною низької точності регулювання швидкості. Включення в даній системі послідовно ротора і статора дозволило скоротити елементну базу і значною мірою спростити схемні рішення, проте при реалізації даного способу машина, що використовується, повинна бути зі співставленими параметрами по колу

ротора і статора, інакше машина буде використовуватися не до кінця у зв'язку з обмеженням по максимальному струму. Конструкція асинхронного двигуна із фазним ротором дозволяє здійснювати послідовне з'єднання обмоток статора та ротора через напівпровідникові прилади. Реалізація цього способу управління за рахунок зменшеної кількості комутаційних елементів сприяє збільшенню енергоефективності та надійності такого електроприводу.

В синхронно-асинхронній машині обмотки статора та ротора включені послідовно один з одним через некеровані ключі. Схема цього методу представлена на рисунку 1.8.

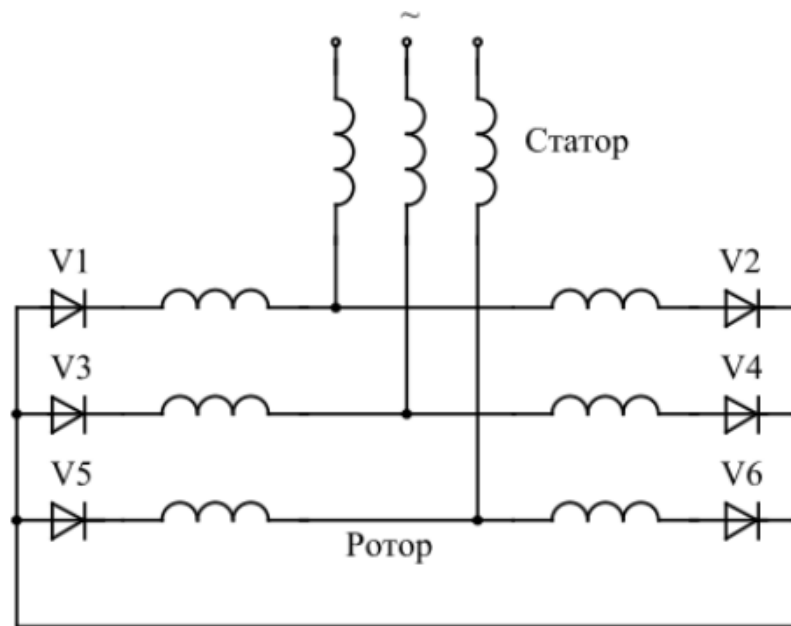


Рисунок 1.8 – Схема підключення двигуна в режимі синхронно-асинхронної машини

Кожна фаза складається із двох гілок. Всі гілки підключені до кола трифазного мостового випрямляча. У свою чергу міст підключений до кінців обмоток статора. Вихідні кола мостового випрямляча підключені накоротко. Струм ротора при цьому має пульсуючий характер. При взаємодії із магнітним полем статора виникає синхронізуючий момент. Виникаючі при цьому моменти обертання кола ротора також мають пульсуючий характер, частота пульсації пов'язана з частотою ковзання. У процесі взаємодії ці два моменти створюють крутний момент. При цьому ККД машини підвищується

через відсутність струмів частоти ковзання кола статора, вони замикаються через вентиля моста [14].

Реалізований таким чином синхронно-асинхронний електропривод забезпечує пусковий момент, що перевищує в три рази відносно номінального при відносно малому пусковому струмі. Жорсткість механічної характеристики можна регулювати шляхом різного включення обмотки ротора в плечі моста.

Цей тип управління застосовується у механізмах, що характеризуються великим пусковим моментом. До недоліків такої схеми управління можна віднести необхідність наявності виводів з середини обмоток ротора, а також установку на роторі обертаючого випрямляча.

На протяжних конвеєрах внаслідок зростання лінійних опорів потрібно забезпечити великий натяг виконавчого елемента, отже привод стає надто важким. Таким чином експлуатація протяжних, важких конвеєрів з одним приводним барабаном стає нераціональна і в ряді випадків зовсім неможлива. Ефективним методом організації переміщення вантажів є використання багатодвигунного приводу. Привідні механізми розташовані на деякій відстані по всій протяжності конвеєра. Вони працюють злагоджено один з одним на загальне навантаження. Використання багатодвигунних приводів дозволяє дещо знизити максимальний натяг виконавчого елемента до необхідного рівня, при цьому знижується енергоспоживання, зменшується вага конструкції конвеєра. Найбільшого поширення багатодвигунний привод отримав у підвісних та пластинчастих конвеєрах, де тяговим елементом є ланцюг.

У стрічкових конвеєрах зусилля на стрічку передається через тертя від приводних барабанів, обертання яких забезпечується двигунами. Використовуються системи з одним та двома барабанами. Однобарабанний більш надійний і простий. Однак, сфера його застосування обмежена. Він застосовується на порівняно невеликих малопотужних конвеєрах, які

потребують великого зусилля при транспортуванні. На потужних, протяжних конвеєрах застосовуються двобарабанні багаторухові приводи [16].

Сучасні тенденції в енергетиці, спрямовані на енергозбереження, диктують умови створення сучасних, енергоефективних систем управління. Переведення асинхронних двигунів у синхронний режим у складі приводів стрічкових конвеєрів доцільний через абсолютно жорсткі характеристики в даному режимі роботи.

Завдання, що виникають при автоматизації стрічкового конвеєрного транспорту можна згрупувати за наступною схемою, приведеною на рисунку 1.9 [2-4].



Рисунок 1.9 – Завдання автоматизації стрічкового конвеєрного транспорту

Типова схема похило-горизонтальної транспортної лінії наведена на рисунку 1.10.

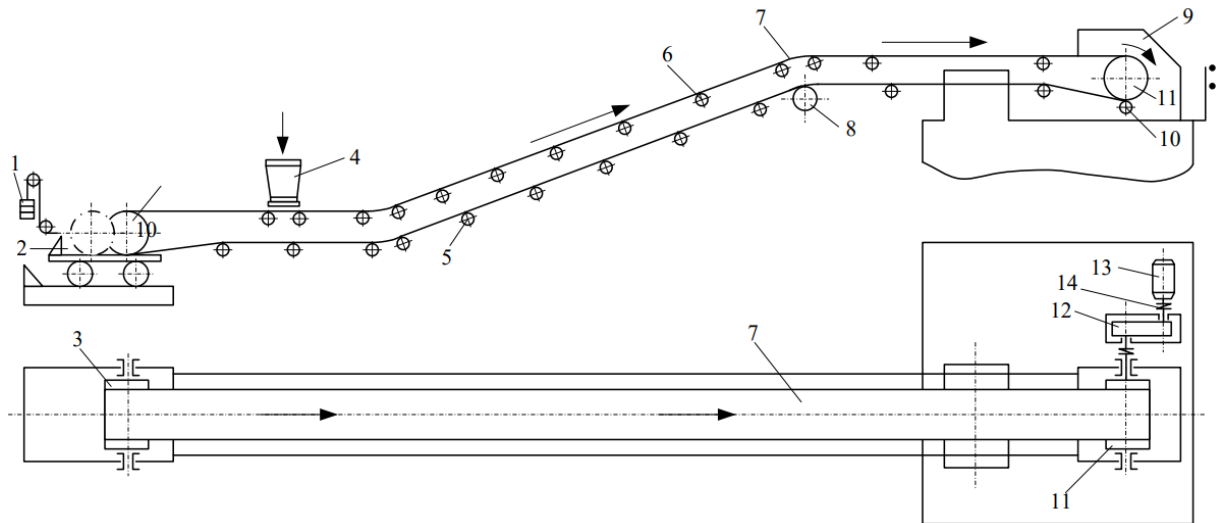


Рисунок 1.10 – Схема типової похило-горизонтальної транспортної лінії

На схемі 1.10 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 1.11 [4].

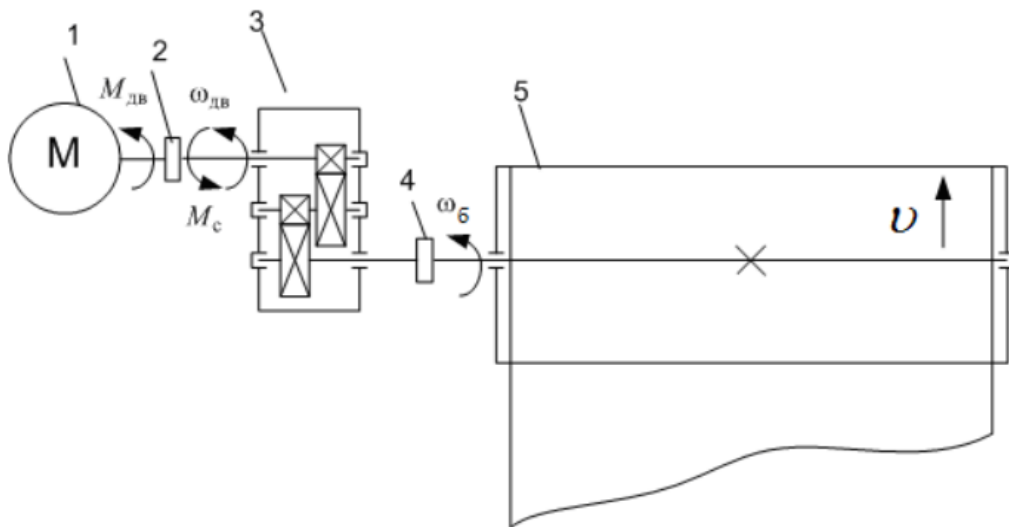


Рисунок 1.11 – Кінематична схема механізму

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.

1.4 Висновок

Розглянуто різні методи та підходи регулювання асинхронних електроприводів. Асинхронний двигун є складним об'єктом регулювання, що включає декілька параметрів, пов'язаних між собою властивостями машини. У синхронізованому асинхронному двигуні з фазним ротором існує можливість впливу на енергетичні показники мережі шляхом регулювання струму ротора. Переведення асинхронних двигунів у синхронний режим у складі приводів стрічкових конвеєрів доцільний через абсолютно жорсткі характеристики в даному режимі роботи.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИНХРОНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Математична модель синхронізованого асинхронного двигуна

Аналіз процесів в електричній машині в природній системі координат досить трудомісткий через складний математичний опис процесів, що протікають, проте даний підхід забезпечує можливість безпосереднього управління струмами і напругами фаз двигуна. У більшості випадків трифазну систему координат замінюють системою ортогональних координат u, v , що обертається в просторі з деякою швидкістю k [16]. На рисунку 2.1 приведено зображення вектора напруги статора у різних системах координат.

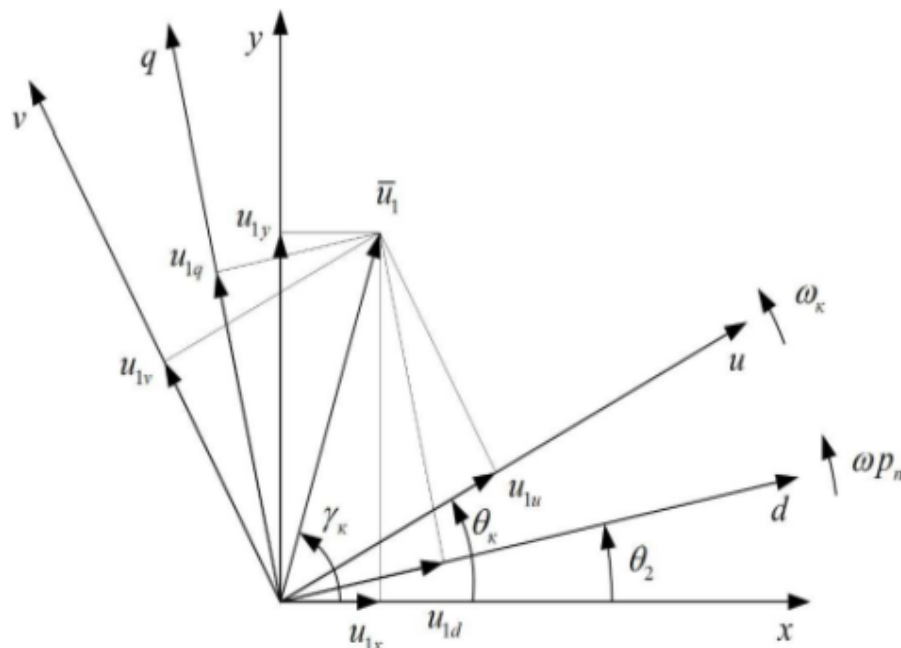


Рисунок 2.1 – Проекції вектора напруги статора різних систем координат

Система координат x, y нерухома і пов'язана з обмоткою статора, d та q – з обмоткою ротора електричної машини і є рухомою системою координат. Значення кута γ_k визначається ступенем повороту вектора напруги статора, величина θ_k відповідає куту повороту системи координат u, v щодо системи координат x, y . θ_2 відповідає куту повороту системи координат, пов'язаної з ротором асинхронної машини щодо нерухомої системи координат [17].

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

Для розробки математичної та побудови механічних характеристик синхронізованої машини під час введення в ротор АД ФР джерела додаткової напруги приведемо Т-подібну схему заміщення машини (рисунок 2.2), в якій враховується підведена до ротора АД ФР напруга.

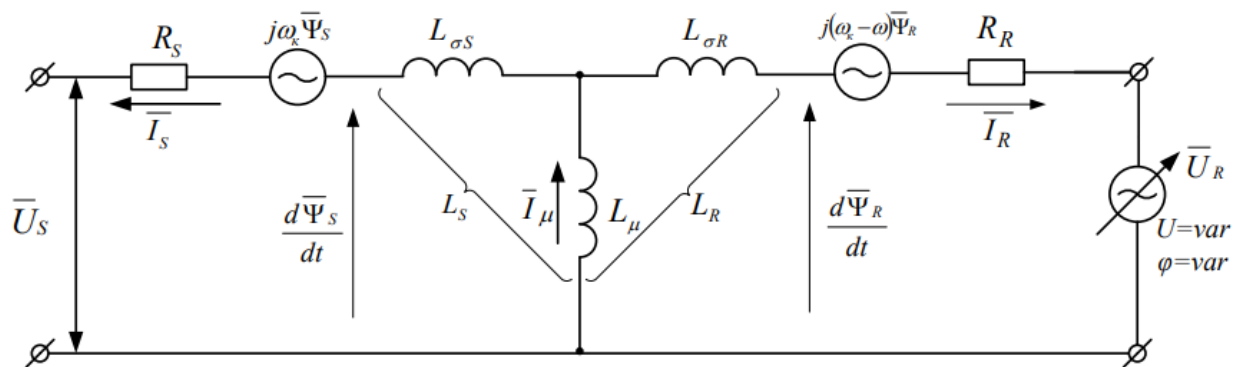


Рисунок 2.2 – Схема заміщення машини подвійного живлення

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}_μ – 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.

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 розсіяння 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 (3.2) 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 (3.3) в (3.1), 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 (3.4) описує машину подвійного живлення.

Для аналізу впливу амплітуди та фази додаткової напруги на роторі на вигляд механічних характеристик, приведемо характеристики електричної машини (рисунок 2.3) в асинхронному режимі.

Механічні характеристики АД приведені в асинхронному режимі роботи машини при різних значеннях амплітуди та фази додаткової напруги на роторі (суцільними лініями показані ділянки характеристики з негативною жорсткістю, прир. – природна характеристика).

За графіками, наведеними на рисунку 2.3, видно, що швидкість ідеального холостого ходу машини знижується і зменшується критичний момент. Жорсткість робочої ділянки характеристик також зменшується щодо природної, причому вона залежить від фазового зсуву додаткової напруги. В цілому, отримані дані аналогічні експериментальним характеристикам, отримані дослідним шляхом.

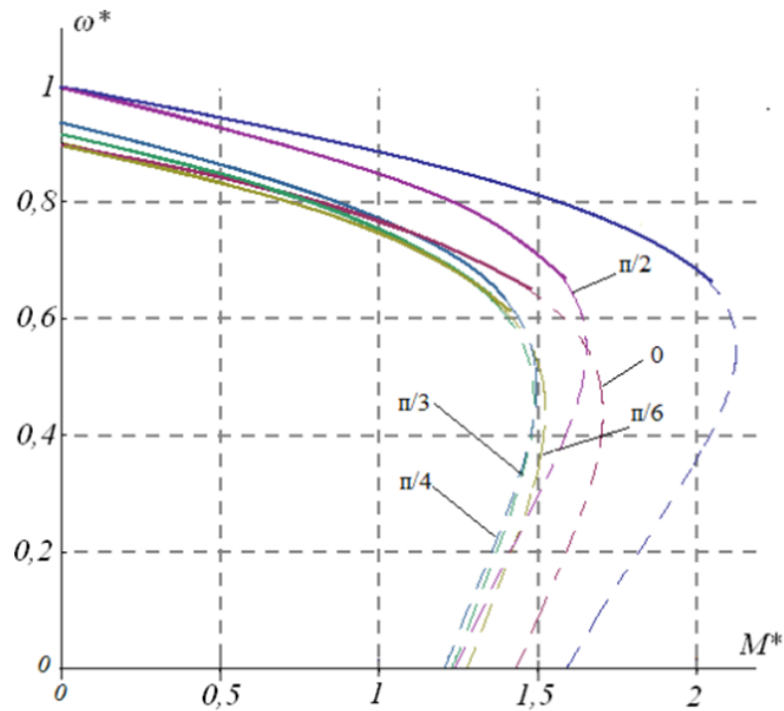


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики ЕМ в асинхронному режимі

Видно, що у цьому випадку швидкість ідеального холостого ходу на штучних характеристиках знижується. Отже, зміною амплітуди додаткової напруги на роторі можна досягти рекуперативного гальмування машини [11-13].

Для визначення можливості роботи АД у діапазоні швидкостей $0 \leq \omega \leq 0,5\omega$ розглянемо сімейство механічних характеристик машини, наведених на рисунку 2.4.

По приведеним характеристикам можна зробити висновок, що перевантажувальна здатність АД падає зі зменшенням швидкості, тому стійка робота машини при номінальному моменті навантаження може бути виконана тільки в діапазоні швидкостей $0,5 \leq \omega \leq \omega$. З цього випливає, що регулювання швидкості ЕМ при зміні лише амплітуди та фазового зсуву додаткової напруги на роторі обмежено діапазоном 2-2,5:1.

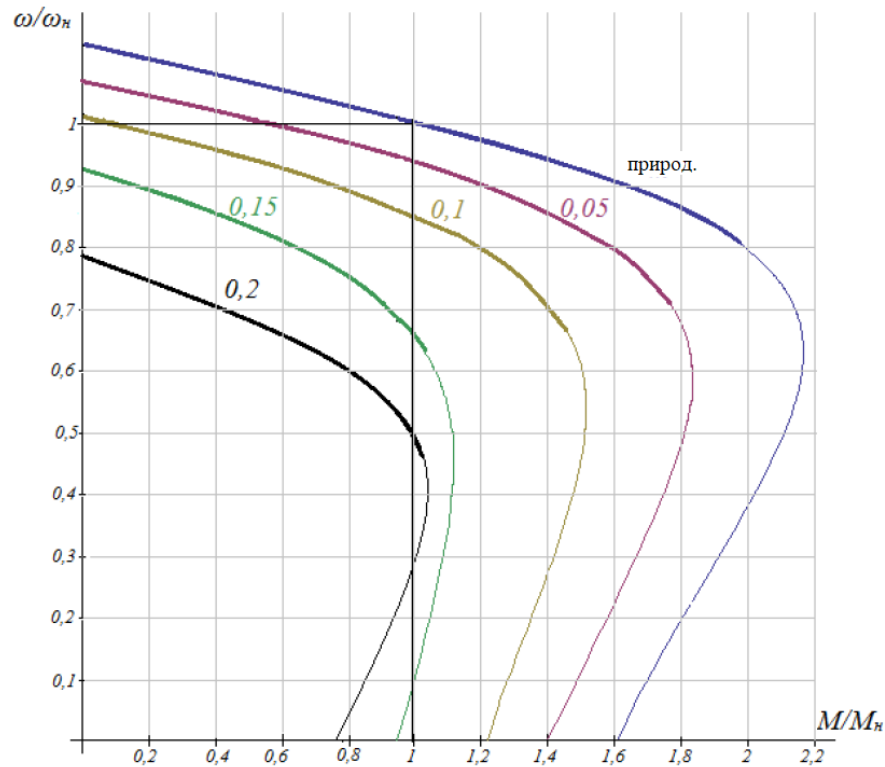


Рисунок 2.4 – Сімейство механічних характеристик ЕМ при фазовому зсуві $\pi/6$

Жорсткість βd механічних характеристик після введення в коло ротора джерела додаткової напруги з частотою, відмінною від частоти власної ЕРС ротора має більшу величину на відміну від жорсткості природної механічної характеристики.

Механічні характеристики АД, який працює в синхронному режимі, наведено на рисунку 2.5. По характеристикам, наведеним на рисунку 2.5 видно, що в даному режимі жорсткість характеристик дійсно більша природної. При цьому, при швидкості обертання ротора машини більшій за $0,5\omega$, перевантажувальна здатність є меншою, ніж природна. Проте синхронний режим роботи може використовуватись тільки для привода установок, які працюють із встановленою постійною швидкістю, що не відповідає існуючим режимам роботи шахтної підйомної установки.

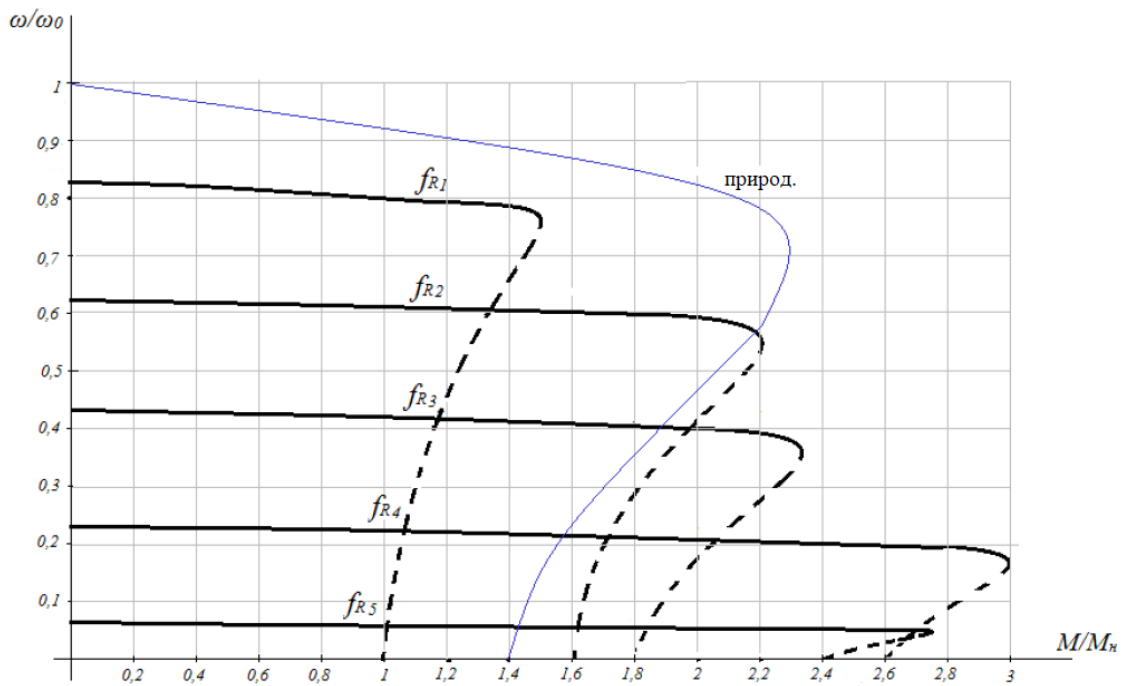


Рисунок 2.5 – Сімейство механічних характеристик МПЖ
в синхронному режимі

Виходячи з проведених в цьому розділі досліджень, можна дійти висновку про те, що при регулюванні швидкості ЕМ шляхом зміни амплітуди та фази додаткової напруги перевантажувальна здатність та жорсткість штучних механічних характеристик зменшуються зі зниженням швидкості ідеального холостого ходу. При швидкості $0,5 \leq \omega \leq \omega_0$ критичний момент ЕМ стає меншим за номінальний; з цієї причини при регулюванні швидкості АД зміною амплітуди та фази додаткової напруги на роторі діапазон регулювання швидкості знаходиться в межах 2-2,5:1. Використання синхронного режиму АД для роботи в електроприводі стрічкового конвеєра є важким через те, що привід більшу частину часу працює в динамічних режимах, тому забезпечити стійкість «синхронного» режиму важко. Таким чином, необхідно знайти спосіб, що дозволяє підвищити діапазон регулювання АД, що передбачає використання синхронного режиму.

2.2 Еквівалентна математична модель синхронізованої машини

Математичний опис АД, позбавлений вище вказаних недоліків, і який дозволяє розширити діапазон регулювання машини 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 ЕМ;

M_{ω} – синхронна складова моменту ЕМ;

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 зміною частоти додаткової напруги. Структурна схема такої системи наведена на рисунку 2.6.

Ця схема дозволяє описати усі можливі режими роботи ЕМ. 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 МПЖ; при $u_{Ri} \neq 0$, $\Delta\omega \neq 0$ схема описує ЕМ при зміні частоти додаткової напруги.

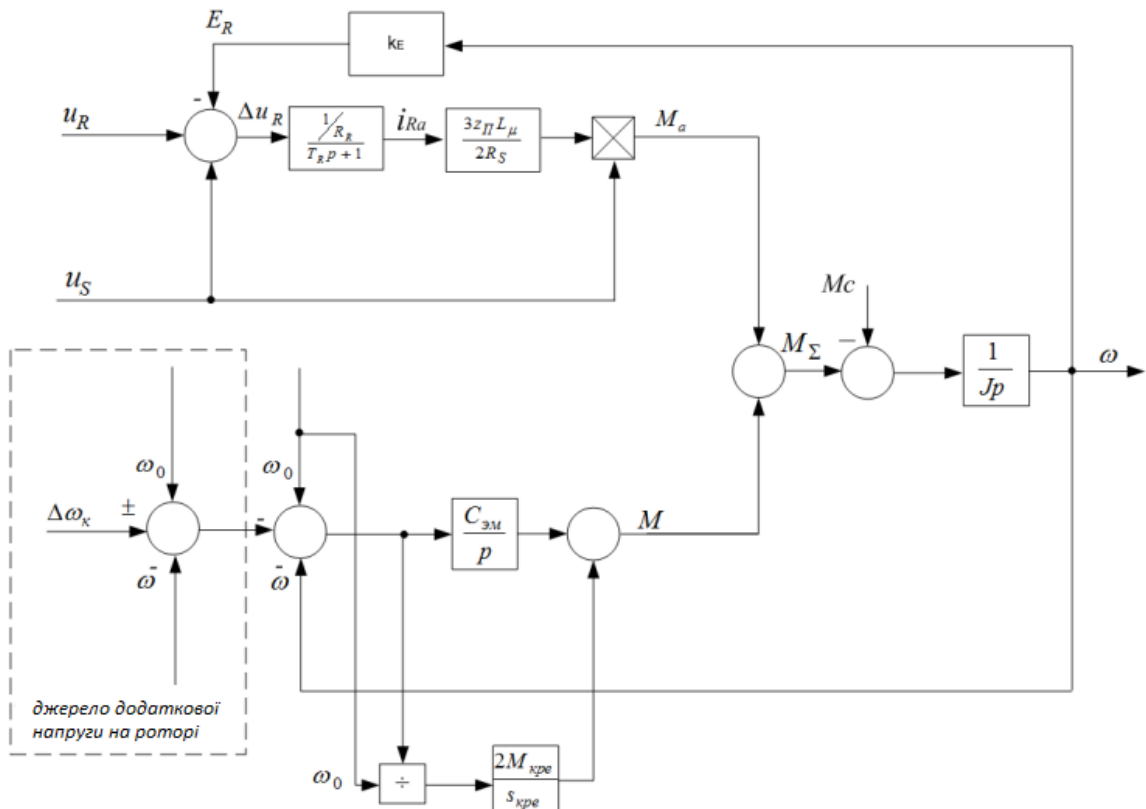


Рисунок 2.6 – Еквівалентна структурна схема асинхронного двигуна з живленням обмотки ротора

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

Для оцінки відповідності перехідних процесів вихідної та запропонованої вище еквівалентної моделі виконаємо її моделювання при одиничній ступінчастій (сходінковій) задаючій дії. Побудова величин моменту та швидкості приведені у відносних одиницях. Результати моделювання приведені на рисунку 2.7.

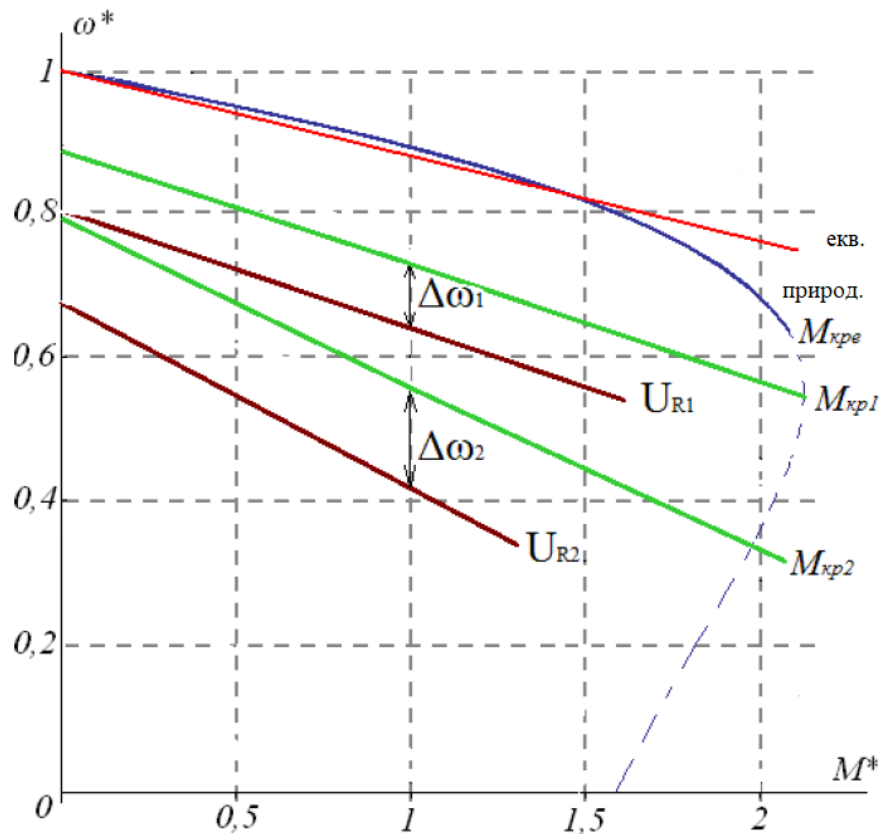


Рисунок 2.7 – Статичні характеристики АД, отримані зі структурної схеми ($U_{R2} > U_{R1}$, $\Delta\omega_{R2} < \Delta\omega_{R1}$)

Основні характеристики перехідного процесу 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 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. Відмінність як перехідних процесів вихідної та еквівалентної моделі пояснюється прийнятими при спрощенні припущеннями. Різниця у часі перехідного процесу становить 5%, різниця в амплітудних значеннях моменту – 3%.

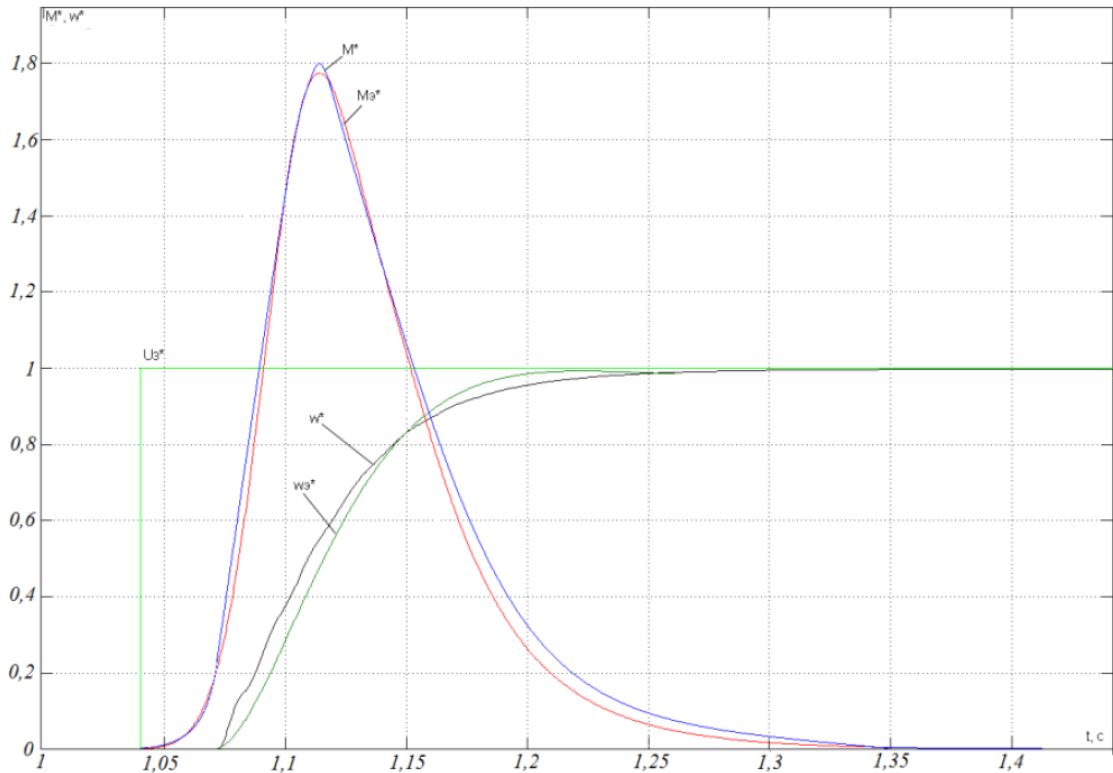


Рисунок 2.8 – Моделювання вихідної та еквівалентної математичних моделей АД

Перехідні процеси вихідної та еквівалентної моделей у випадку ступінчастої зміни номінального навантаження наведені на рисунку 2.9.

Основні характеристики перехідного процесу швидкості: для вихідної моделі – час перехідного процесу 0,15 с, статична похибка – 10%; для еквівалентної моделі – час перехідного процесу 0,15 с, статична похибка – 10%. Основні характеристики перехідного процесу моменту: для вихідної моделі час перехідного процесу 0,15 с, перерегулювання 4%; для еквівалентної моделі – час перехідного процесу 0,15 с, перерегулювання 2%.

Різниця в перехідних процесах для вихідної та еквівалентної моделі (близько 2% за амплітудою) пояснюється тим, що в еквівалентній моделі не враховані компенсовані ЕРС. Таким чином, відмінності між моделями несуттєві і пояснюються прийнятими при спрощенні моделі припущеннями, а еквівалентна модель адекватна вихідній.

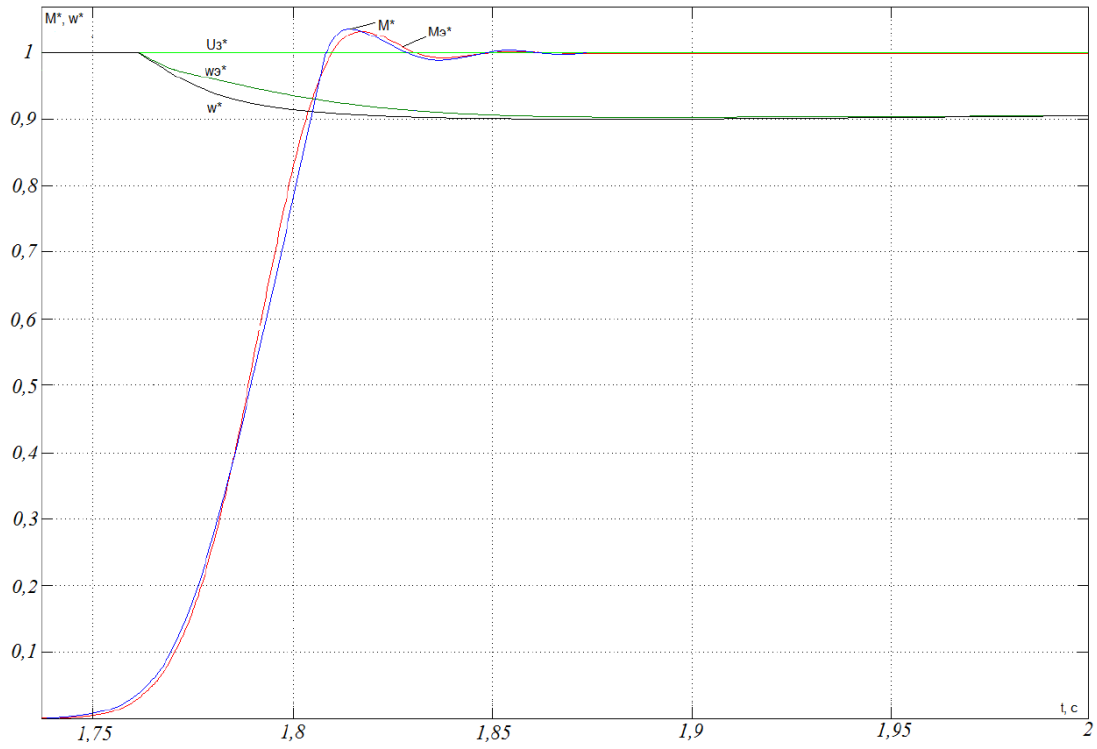


Рисунок 2.9 – Результати моделювання вихідної та еквівалентної математичних моделей АД при ступінчастій зміні номінального навантаження

2.3 Опис принципу формування вихідних змінних автономного інвертора

Найбільшого поширення серед частотних перетворювачів набули перетворювачі, що мають у своєму складі ланку постійного струму. На вході частотного перетворювача встановлюється узгоджувачий трансформатор, або реактор, що захищає мережу від високочастотних гармонік, що виникають у процесі роботи перетворювача [14]. В ланці постійного струму встановлюється фільтр. До ланки постійного струму підключається інвертор, навантаженням якого є асинхронний двигун.

В малопотужних приводах зазвичай використовують некеровані перетворювачі, що характеризуються великим коефіцієнтом потужності по відношенню до мережі. В них відсутня можливість рекуперації енергії в мережу. Таким чином, для забезпечення режиму генераторного гальмування знайшли застосування спеціальні баластові резистори, які підключаються до кола постійного струму та служать для перетворення кінетичної енергії на теплову [14-16].

У механізмах, що мають у складі потужніші електроприводи, а також працюючих значний час в режимах гальмування, встановлюють реверсивні перетворювачі. Управління резистором, розташованим у ланці постійного струму, які слугують для скидання накопиченої енергії в режимі гальмування, здійснюється у функції напруги. У деяких випадках використовуються інші способи гальмування, наприклад динамічне гальмування [14].

Інвертор здебільшого складається із шести силових ключів, включених за мостовою схемою. Кожен ключ має зворотно включений діод. Схема інвертора подібної конструкції зображена на рисунку 2.10. Обмотка статора двигуна може бути з'єднана або в «зірку», або «трикутник».

Перед складанням математичного опису трифазного ПЛ необхідно прийняти такі припущення [14]:

- силові транзисторні ключі зі зворотними діодами необхідно вважати безінерційними, тобто фізичні процеси, що протікають під час їхньої комутації, не враховуються;

- управління роботою ключів здійснюється імпульсами одиничної амплітуди прямої та зворотної полярності ($u_i \pm 1$): при $u_i = 1$ фаза i двигуна підключена до позитивної клеми ланки постійного струму, а при $u_i = -1$ - до негативного полюса, $i = A, B, C$;

- для виключення наскрізних струмів дуже малі затримки часу при перемиканні ключів;

- при відкритому стані силового ключа падіння напруги на ньому дорівнює нулю;

- напруга ланки постійного струму не змінюється залежно від навантаження, інвертор є ідеальним та живлений від мережі нескінченної потужності.

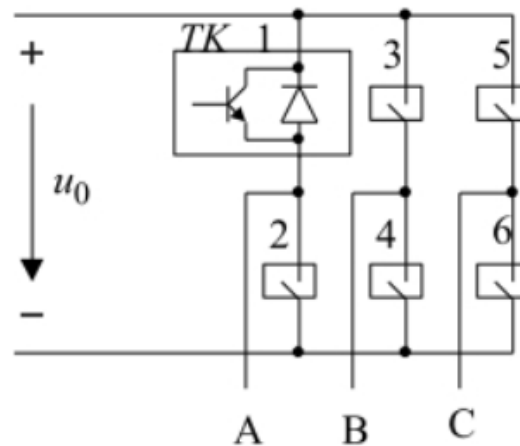


Рисунок 2.10 – Структурная схема автономного інвертора

Позначивши умовно варіанти стану транзисторів перетворювача як $(\pm\pm\pm)$. Знаки «+» і «-» відповідають рівню керуючого сигналу на відкриття, або закриття вентиля кожної фази. На площині можна зобразити вісім векторів, кожен із яких відповідає певному стану інвертора.

На рисунку 2.11 представлено діаграму, коли обмотки статора асинхронного двигуна з'єднані у зірку. Вектору x відповідає один зі станів інвертора. Інші стани позначені рештою сімох вершин. Початок координат

відповідає двом нульовим станам інвертора, коли всі фази підключені до одного з двох полюсів ланки постійного струму.

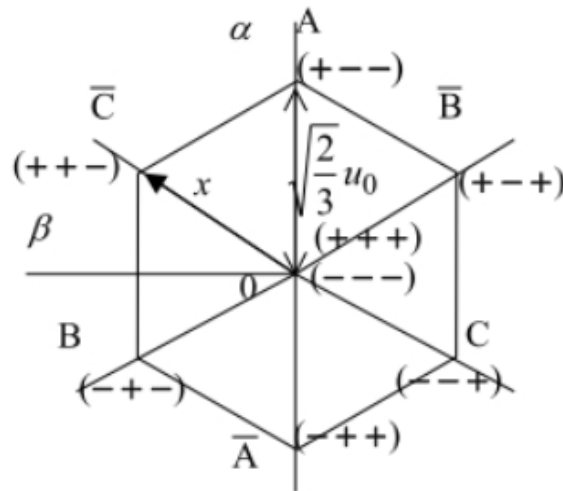


Рисунок 2.11 – Діаграма напруг інвертора у складі перетворювача частоти

Залежність вектора миттєвих значень напруги статора асинхронного двигуна у разі з'єднання обмоток у «зірку» від вектора керуючих впливів $[u_i]$ $= \text{col}(u_a, u_b, u_c)$ відповідає формула

$$U_s = \frac{1}{\sqrt{6}} u_0 A(\gamma_k) P[u_i],$$

де u_0 – напруга на виході ланки постійного струму;

$P[u_i]$ – матриця перетворення трифазної системи координат у двофазну;

$A(\gamma_k)$ – матриця перетворення двофазної системи координат з нерухомої в обертову,

$$A(\gamma_k) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_k & \sin \gamma_k \\ -\sin \gamma_k & \cos \gamma_k \end{bmatrix}.$$

Значення фазної напруги в конкретний момент часу обчислюються відповідно до наступного алгоритму. Нульовим значенням фазної напруги відповідає підключення всіх фаз до одного полюса ланки постійного струму. Фазна напруга на виході інвертора в інших випадках визначається схемою

з'єднання обмоток електродвигуна. Якщо обмотки з'єднані в зірку, лінійна напруга на виході інвертора обернено пропорційна кількості фаз, підключених до одного полюса ланки постійного струму. Напруга фаз, включених паралельно $u_0/3$, а значення напруги третьої фази відповідає величині $2u_0/3$. Знаки напруги визначаються знаком полюса ланки постійного струму, до якого приєднані ці фази.

Таким чином, можна формувати задану напругу на виході інвертора, що здійснюється у стандартних системах частотного керування асинхронним двигуном.

При побудові систем частотно-струмового керування асинхронним двигуном керування моментом здійснюється шляхом регулювання миттєвих значень струму статора. У цьому випадку доцільно використовувати принцип формування миттєвих значень статора струму з використанням релейно-гістерезисних регуляторів [19].

Задаючи значення на фазні струми формуються в блоці розрахунку, показаному на рисунку 2.12, на вхід якого надходять два сигнали: модульне значення струму статора і значення частоти

$$\begin{aligned} I_{1A}^* &= I_m^* \sin(\omega_1^* t); \\ I_{1B}^* &= I_m^* \sin(\omega_1^* t - 120^\circ); \\ I_{1C}^* &= I_m^* \sin(\omega_1^* t + 120^\circ). \end{aligned}$$

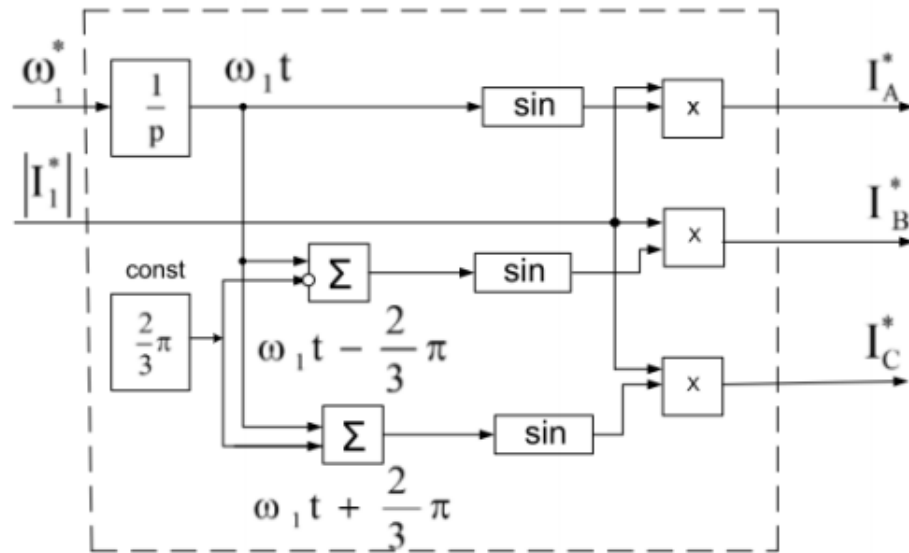


Рисунок 2.12 – Блок розрахунку сигналу завдання статора

На рисунку 2.13 показано систему, що забезпечує керування миттєвими значеннями струму статора.

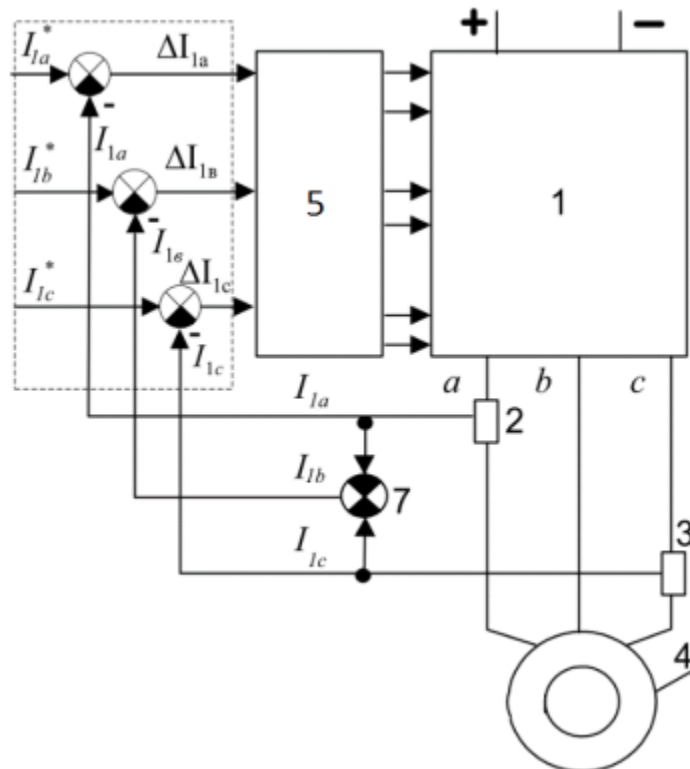


Рисунок 2.6 – Система частотно-струмового управління

На вхід блоку формування імпульсів керованих ключів 5 надходять сигнали, що визначають різницю значень заданих струмів і струмів в

обмотках, виміряних за допомогою датчиків 2, 3. Інвертор 1 двигун 4. Блок 7 служить для розрахунку струму в третій фазі.

Принцип дії релейних регуляторів полягає у наступному [14]:

- якщо значення різниці виміряного та заданого струму близьке до максимальної величини, включається силовий вентиль верхнього плеча відповідної фази і відключається нижній.

- якщо значення різниці виміряного та заданого струму мінімальне, то включається силовий елемент нижнього плеча відповідної фази та відключається верхній [14].

Принцип керування струмом статора за допомогою релейно-гістерезисних регуляторів може бути використаний при реалізації асинхронного пуску двигуна та при подальшому переведенні двигуна в синхронний режим. Тому подальші дослідження проводилися для систем керування, які використовують релейний принцип керування струмом статора.

2.4 Висновки

Математичне опис принципів роботи синхронізованого асинхронного двигуна краще виконувати в системі координат d, q , ніж у трифазній системі A, B, C . Виконано математичний опис принципу формування вихідного сигналу автономного інвертора, який дозволить виконати побудову та моделювання частотно регульованого синхронізованого електроприводу.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

3.1 Вдосконалення системи частотного керування асинхронним двигуном на базі інвертора струму з корекцією сигналу завдання частоти струму статора

Керування швидкістю асинхронного двигуна з фазним ротором можна здійснити частотним методом [16]. Система керування синхронізованим електроприводом дозволяє реалізувати асинхронний пуск двигуна, у якому ротор закочений. Таким чином, актуальним завданням є розробка системи керування, що дозволяє здійснити асинхронний пуск синхронізованого електроприводу з подальшою синхронізацією.

У системах керування асинхронним електроприводом знайшли застосування векторні та скалярні системи керування. Скалярні системи дещо поступаються векторним за таким параметром, як забезпечення необхідної динаміки перехідних процесів. Але при цьому застосування скалярних систем керування більш ніж виправдане в механізмах з циклічним режимом роботи та невисокою динамікою перехідних процесів. Найчастіше скалярні системи управління потрібно поліпшити шляхом побудови різних систем корекції. Серед скалярних систем найбільш досконалими є системи з частотно-струмовим управлінням, які будуються на базі перетворювачів частоти, що мають у своєму складі випрямляч та інвертор. У цих системах форма вихідного струму найбільш близька до синусоїдальної. Загалом, система містить внутрішній контур регулювання струму статора та зовнішній контур керування швидкістю. Контур струму будується на регулюванні струму в кожній статорній фазі за допомогою релейно-гістерезисних регуляторів [14]. Принципова схема системи частотно-струмового управління приведена на рисунку 3.1.

керування надходить на вхід регулятора швидкості, сигнал з якого заведено в блок обмеження.

З блоку обмеження БО сигнал надходить у функціональний перетворювач, що формує сигнал, пропорційний величині квадрату струму статора. Далі обчислюється сигнал завдання величину амплітуди струму, що надходить у блок 7, який формує сигнали завдання миттєвих струмів кожної фази.

При досягненні двигуном номінальної швидкості сигнал неузгодженості на вході регулятора швидкості дорівнює нулю. Значення струму статора пропорційне навантаженню двигуна [18].

Контур відстеження та регулювання кута φ_0 зібраний на блоках 9-11. Сигнал завдання формується в блоці 11. Сигнал завдання спільно з сигналом зворотного зв'язку блоку 10 надходить на суматор. Сигнал неузгодженості $\zeta\varphi_0$ з виходу суматора заводиться в блок регулятора 9 і надходить у систему управління сигнал корекції частоти струму статора.

У приводах стрічкових конвеєрів виникає необхідність непрямого визначення швидкості, щоб уникнути негативного впливу сигналу виміру збурень, що вносяться коливаннями стрічки. Непряме вимірювання швидкості у системі управління здійснюється за допомогою математичної моделі, що називається спостерігачем – блок 13.

В моделі статора величина швидкості ротора відсутня, а в моделі ротора вона є вхідною величиною, значення якої у бездатчиковій системі невідомо. Цю проблему можна вирішити шляхом синтезу адаптивного спостерігача [18]. Виходячи з наведених вище розрахунків потокозчеплення ротора можна розрахувати, використовуючи і модель статора, і модель ротора. В одному випадку необхідно знати струми та напруги статора, в іншому – тільки струм статора та швидкість ротора. При однаковому струмі статора значення потокозчеплень, розрахованих за двома різними моделями, дорівнюватимуть тільки відповідно швидкості ротора на вході моделі ротора

дійсної швидкості ротора. Це головна умова створення адаптивного спостерігача швидкості ротора.

Схема адаптивного спостерігача представлена на рисунку 3.2.

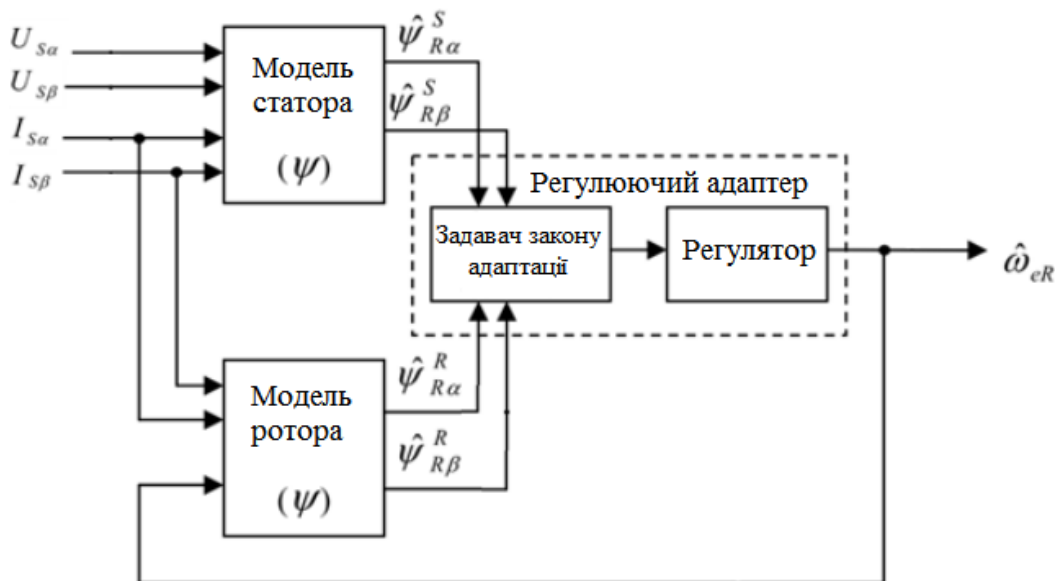


Рисунок 3.2 – Структурна схема адаптивного спостерігача

При створенні регулятора задамося умовою, що модель статора еталонна, тобто значення потокозчеплення, обчислене в ній, дорівнює реальному потоку зчеплення двигуна. Модель ротора, таким чином, вважається адаптованою.

Адаптація моделі ротора проводиться за допомогою регулюючого адаптера [16]. На його вході проводиться порівняння значень потокозчеплень, розрахованих у двох різних моделях, на виході виробляється адаптуючий сигнал швидкості ротора.

На рисунку 3.3 наведено результати моделювання системи управління з адаптивним спостерігачем швидкості.

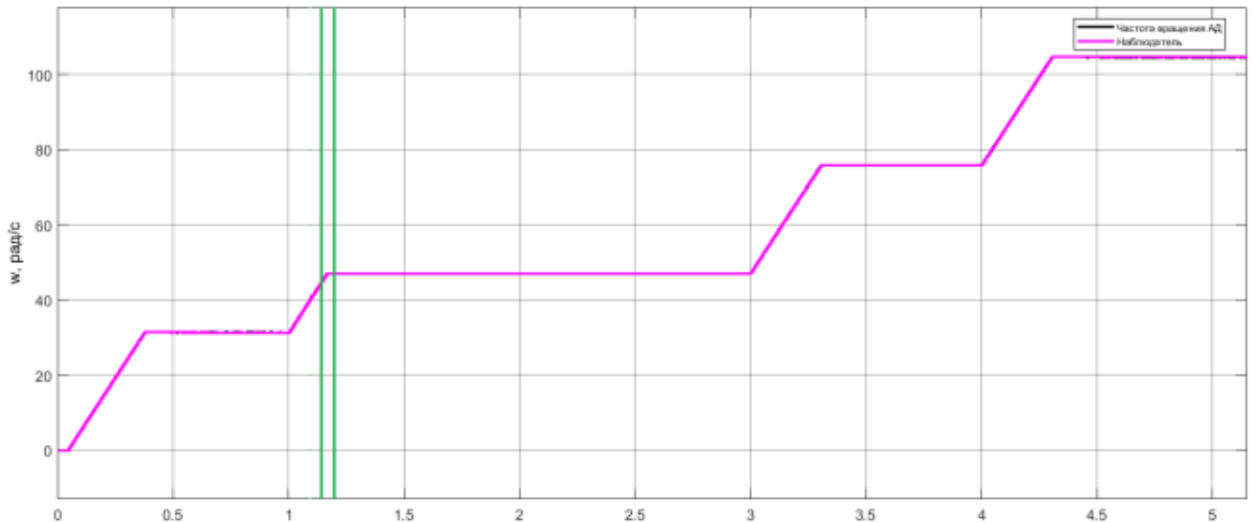


Рисунок 3.3 – Осцилограми сигналу кутової швидкості при ступінчастому регулюванні сигналу завдання

Сигнал завдання частоти обертання двигуна визначається ступінчасто. Як видно з рисунка, сигнал із виходу спостерігача швидкості майже повністю повторює сигнал із виходу блоку моделі двигуна. Для повнішого аналізу роботи спостерігача збільшимо ділянку кривої, у якому відбувається різка зміна сигналу завдання. Ця ділянка представлена на рисунку 3.4.

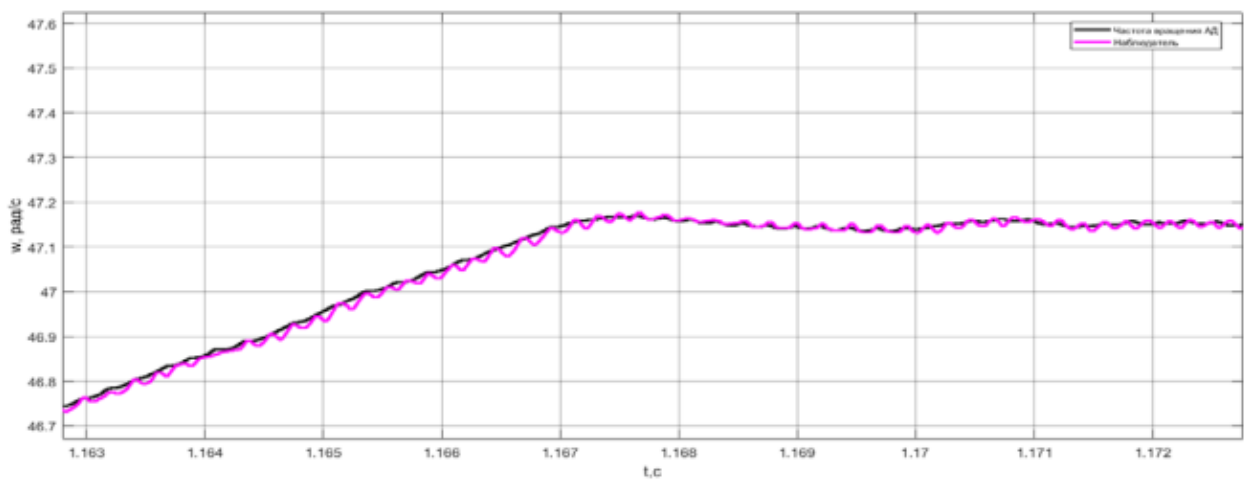


Рисунок 3.4 – Осцилограми сигналу кутової швидкості при ступінчастому регулюванні сигналу завдання

Співвідношення сигналів на представлений ділянці характеристики розгону двигуна дозволяє сформулювати висновок про досить низький рівень

похибки роботи спостерігача та достатню динаміку розрахунку кутової швидкості двигуна на основі величин сигналів струму та напруги статора.

3.2 Система керування синхронізованим асинхронним електроприводом із незалежним керуванням по колу ротора

Одним із варіантів реалізації системи синхронізованого електроприводу є система, в якій запуск двигуна здійснюється в асинхронному режимі, а синхронізація – шляхом подачі постійного струму в обмотку ротора здійснюється при досягненні двигуном підсинхронної частоти обертання [16].

Розглянемо систему управління, в якій постійна напруга в обмотку ротора асинхронного двигуна подається від стороннього джерела. Система управління, що дозволяє проводити частотний пуск асинхронного двигуна з наступною синхронізацією, приведена на рисунку 3.5.

Інвертор складається із шести IGBT-транзисторів. Для зниження імпульсних втрат, що виникають у процесі комутації силових вентилів у системі керування синхронізованим електроприводом с незалежним живленням обмотки ротора, пропонується певним чином керувати величиною струму у ланці постійного струму. Для цього у ланку постійного струму перетворювача частоти включений підвищуючий імпульсний перетворювач.

До складу електроприводу входить некерований випрямляч 1, реактор 2, транзистор VT забезпечує регулювання струм. Двигун 3, датчики 4,5 забезпечують передачу електричних параметрів роботи електроприводу блок управління 6, інвертор 7, компаратор 8 забезпечує порівняння заданого значення зі значенням струму, що надходить з датчика струму 11. З виходу блоку порівняння сигнал надходить на релейний регулятор 9. Принцип дії підвищуючого імпульсного перетворювача полягає в наступному:

- коли транзистор VT включений, в котушці 2 енергія накопичується, двигун отримує живлення із зарядженого конденсатора C_1 , діод 10 необхідний для забезпечення протікання струму в одну сторону.

- коли транзистор VT вимкнений, струм котушки 2 протікає до навантаження і одночасно заряджає конденсатор C_1 .

В якості джерела постійної напруги для обмотки ротора може використовуватися керований або некерований випрямляч. Включений у ланку постійного струму імпульсний перетворювач забезпечує можливість регулювання значень фазних струмів двигуна не комутуючи на високій частоті ключі інвертора.

При переході від асинхронного режиму роботи АД до синхронного необхідно змінити частину системи керування між виходом регулятора швидкості та входом блоку визначення миттєвих значень модуля статора.

Принципова схема керування інвертором синхронізованого електроприводу з незалежним живленням обмотки ротора приведена на рисунку 3.5.

Управління двигуном здійснюється в такий спосіб. Після розгону двигуна в асинхронному режимі з частотно-струмовим управлінням з примусовим завданням ковзання до підсинхронної встановленої швидкості, в ротор подається постійний струм. Одночасно в системі керування при визначенні сигналу завдання на частоту статора в синхронному режимі відключається блок завдання - 12.

В результаті частота струму статора стане рівною частоті обертання ротора, а сигнал завдання на вході та виході регулятора швидкості не зміниться. На виході регулятора швидкості і вході блоку формування миттєвих значень струму статора перемикаючі елементи блоку БО виводять з роботи блоки розрахунку заданого значення струму статора в асинхронному режимі і вводять блоки розрахунку значення струму в синхронному режимі.

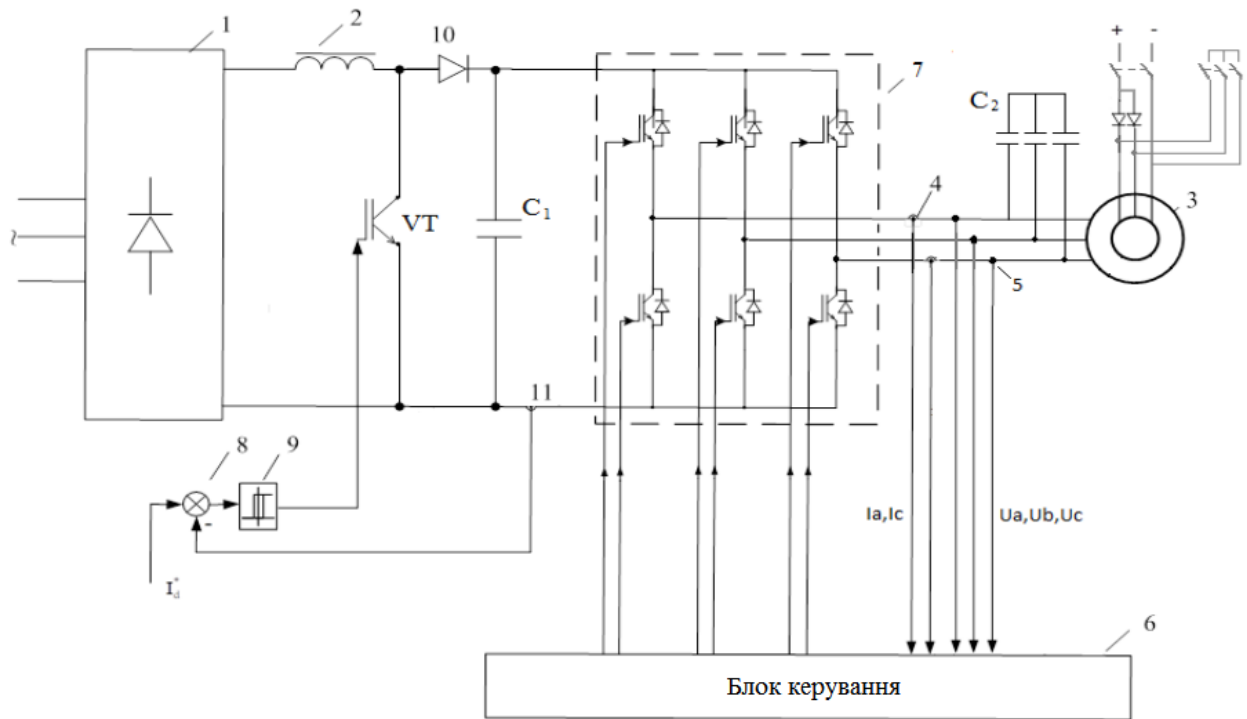


Рисунок 3.5 – Схема синхронізованого електроприводу з незалежним управлінням кола ротора

Схема керування інвертором синхронізованого електроприводу із незалежним живленням обмоток ротора наведена на рисунку 3.6.

Осцилограми перехідних процесів при асинхронному пуску синхронізованого електроприводу та синхронізації при живленні ротора від незалежного джерела приведені на рисунку 3.7. Як видно з рисунку, входження в синхронізм супроводжується коливаннями струму ротора та незначним перерегулюванням швидкості. Також після входження до синхронізму спостерігається зниження струму статора приблизно на 10%.

Помічено, що на якість перехідного процесу і тривалість коливань, впливає положення векторів фазних струмів ротора в момент подачі постійного струму збудження.

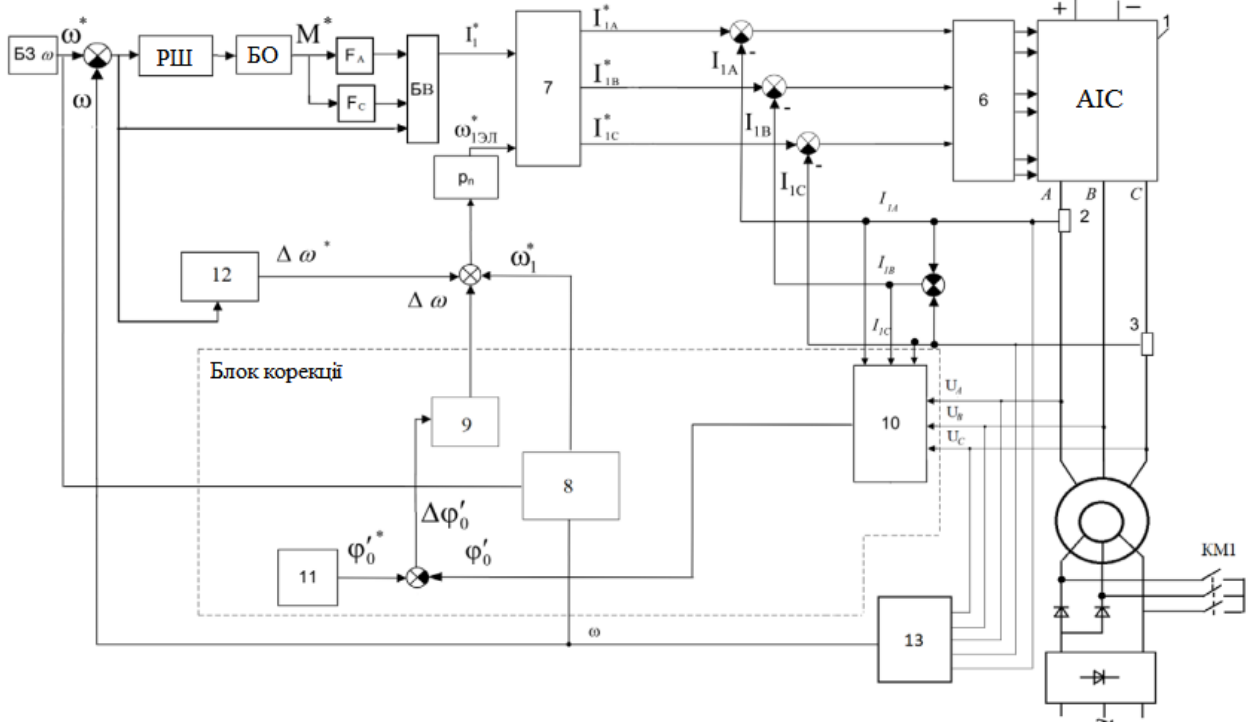


Рисунок 3.6 – Схема керування інвертором синхронізованого електроприводу з незалежним живленням обмоток ротора

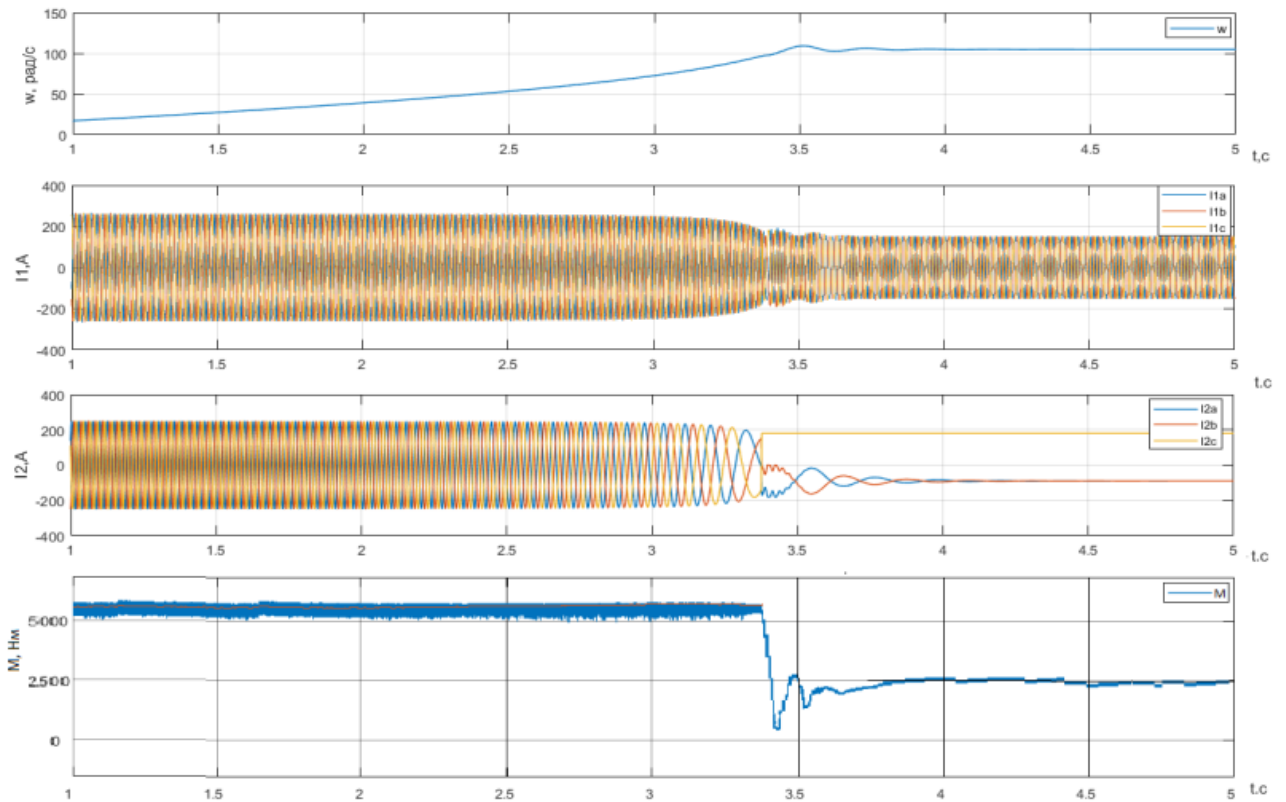


Рисунок 3.7 – Перехідні процеси в синхронізованому електроприводі при асинхронному пуску та переході в синхронний режим роботи

Для досягнення мінімальних коливань та отримання якісного перехідного процесу необхідно подавати струм збудження джерела постійного струму в момент, коли вектори досягають мінімальних амплітудних значень. Найбільш несприятливий процес спостерігається при подачі постійного струму в момент коли амплітудне значення струму відповідної фази становить максимальне негативне значення.

У запропонованій системі керування на базі автономного інвертора струму з гістерезисними регуляторами забезпечується керування та регулювання амплітуди струму статора та відхилення кутової частоти ротора, які визначають значення ковзання та частоти струму статора.

Далі проведемо аналіз впливу підвищуючого імпульсного перетворювача в колі постійного струму на гармонійний склад струму статора асинхронного двигуна. Для цього використовуємо функцію швидкого перетворення Фур'є, вбудовану в пакет Simulink [18,19].

3.3 Аналіз впливу імпульсного перетворювача у колі постійного струму на гармонійний склад струму статора та комутаційні втрати у транзисторах інвертора

Основним показником в оцінці якості мережі є коефіцієнт несинусоїдності кривої струму чи напруги (THD - total harmonic distortion). Також наочним є представлення сигналу як спектра високочастотних гармонік.

Струм фази А з імпульсним перетворювачем у колі постійного струму приведений рисунку 3.9. Форма струму фази А з імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму приведена на рисунку 3.10.

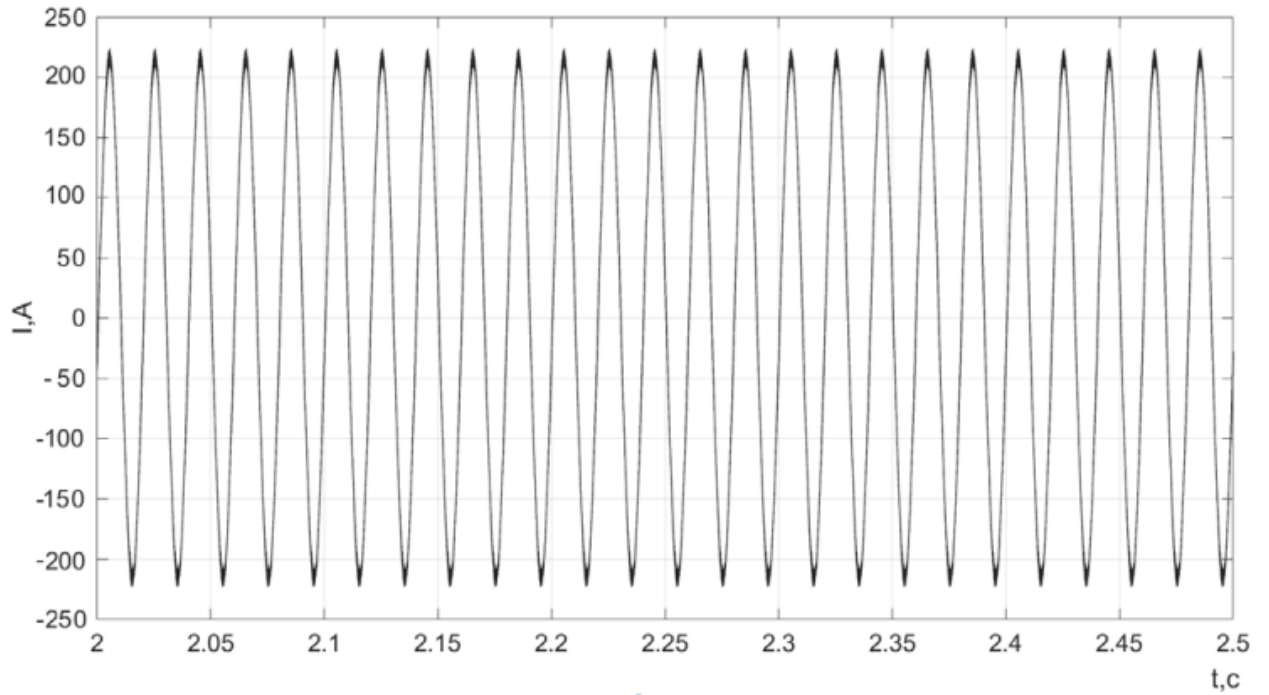


Рисунок 3.9 – Струм фази А з імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму

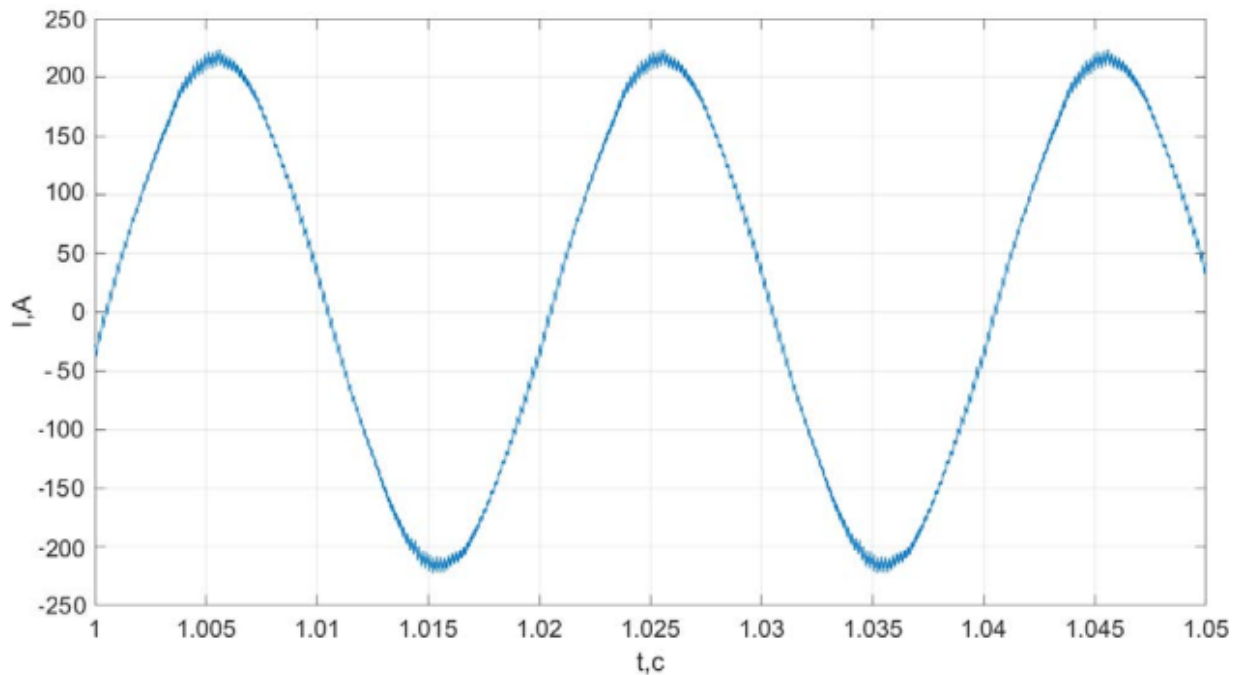


Рисунок 3.10 – Форма струму фази А з імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму

Дані гармонійного складу отриманих графіків приведені на рисунках 3.11 – 3.12.

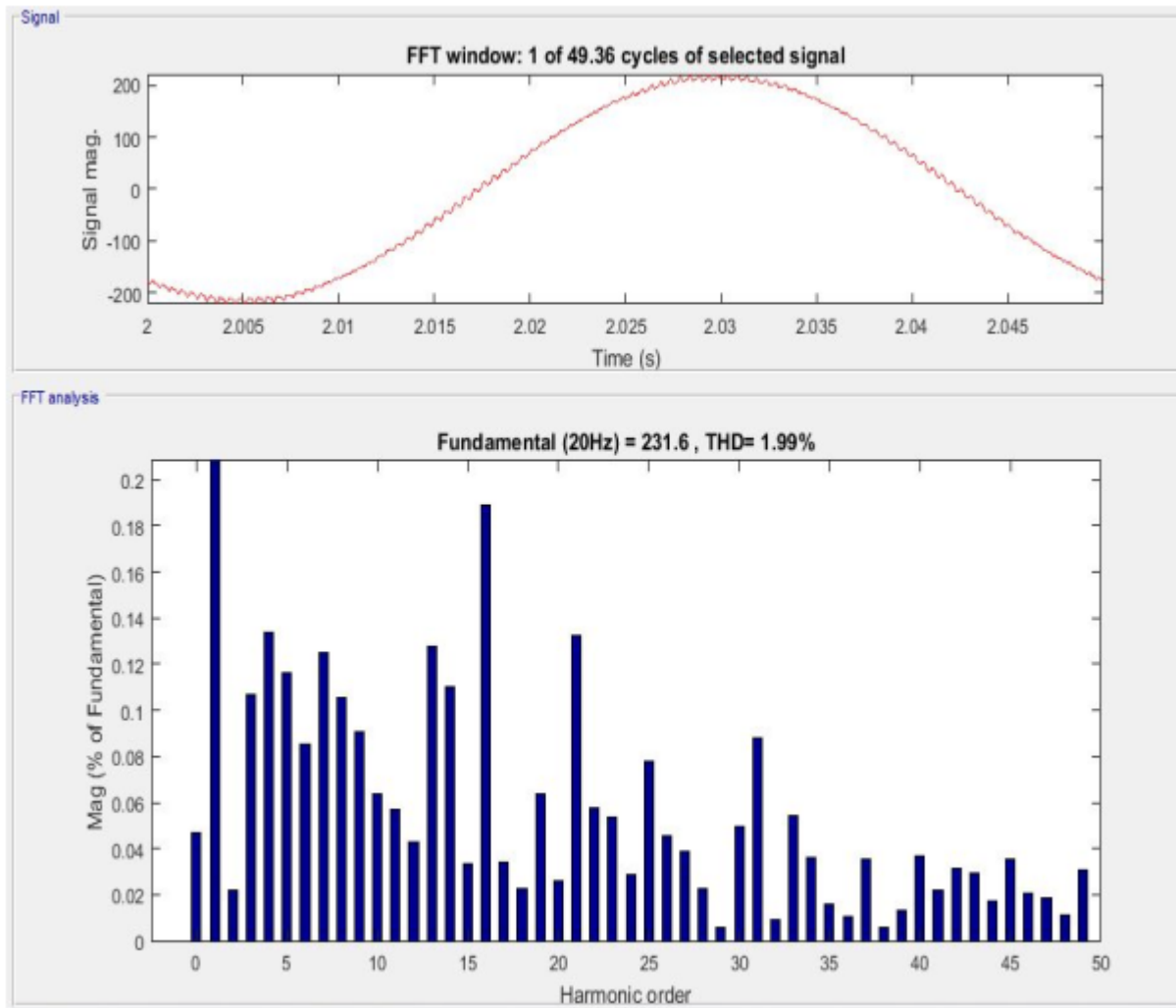


Рисунок 3.11 – Гармонічний склад кривої струму фази А з імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму

3.4 Висновок

Запропоновано бездатчикову систему скалярного частотно-струмового управління, що дозволяє виконувати асинхронний пуск синхронізованого електроприводу та забезпечує за рахунок синтезу додаткових коригувальних контурів підтримку постійного моменту в процесі пуску.

Вплив на амплітуду та частоту струму статора в системі частотно-струмового управління дозволяє значною мірою поліпшити динамічні та енергетичні показники системи управління.

Побудовано систему управління синхронізованим асинхронним електроприводом з незалежним живленням обмоток ротора та імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму, що забезпечує знижену кількість

комутацій силових транзисторів інвертора за рахунок алгоритму формування струму у ланці постійного струму, що сприяє зниженню комутаційних втрат.

Застосування системи управління з незалежним живленням обмоток ротора є актуальним у приводах стрічкових конвеєрів, що характеризуються постійним моментом опору та працюють у тривалому режимі.

Система управління синхронізованим електроприводом з включенням ротора у ланку постійного струму ПЧ забезпечує компенсацію падіння напруги, що виникає при цьому.

4 ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО ТА СИНХРОНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

4.1 Дослідження енергетичних показників розробленої системи синхронізованого електроприводу

Виконаємо порівняння енергетичних показників у синхронному та асинхронному режимі роботи двигуна, використовуючи розроблену комп'ютерну модель синхронізованого асинхронного електроприводу.

За допомогою комп'ютерного моделювання виконаємо порівняння енергетичних характеристик роботи синхронного та асинхронного режимів роботи.

Для цього побудуємо графік залежності коефіцієнта корисної дії машини від моменту навантаження на валу при пуску і у встановленому режимі роботи.

Графіки отриманих залежностей приведені на рисунках 4.1-4.2.

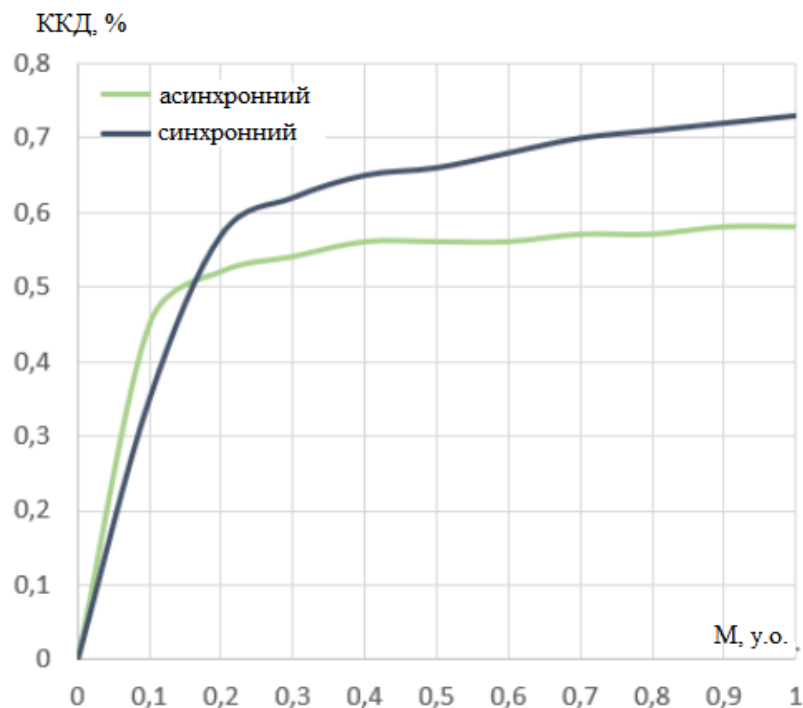


Рисунок 21 – Графік зміни ККД під час пуску в різних режимах

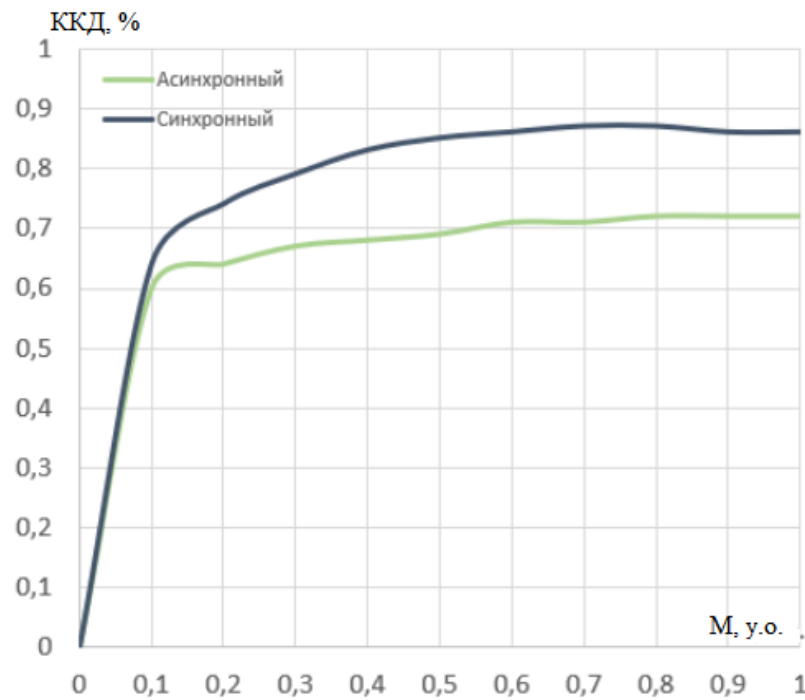


Рисунок 4.2 – Графік зміни ККД у встановленому режимі роботи у різних режимах

З представлених малюнків видно, що синхронний режим роботи краще асинхронного.

4.2 Робочі характеристики частотного асинхронного та синхронізованого електроприводів

Для порівняльної оцінки розроблених систем управління доцільно побудувати робочі характеристики асинхронного двигуна із закороченим ротором та синхронізованого асинхронного двигуна при регулюванні ступеня навантаження двигуна. В якості досліджуваного двигуна будемо використовувати асинхронну машину типу МТФ-512-8. Дані для побудови характеристик отримаємо шляхом математичного моделювання вищезгаданих систем.

На рисунках 4.3-4.8 представлені залежності струму статора від потужності на валу двигуна I_1 , ККД η , моменту M , кутової частоти обертання ротора ω , коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ та струму ротора I_2 .

На рисунках 4.3-4.8: 1 – синхронний режим із незалежним живленням

обмоток ротора; 2 – асинхронний режим; 3 – синхронний режим із послідовним з'єднанням обмоток статора та ротора.

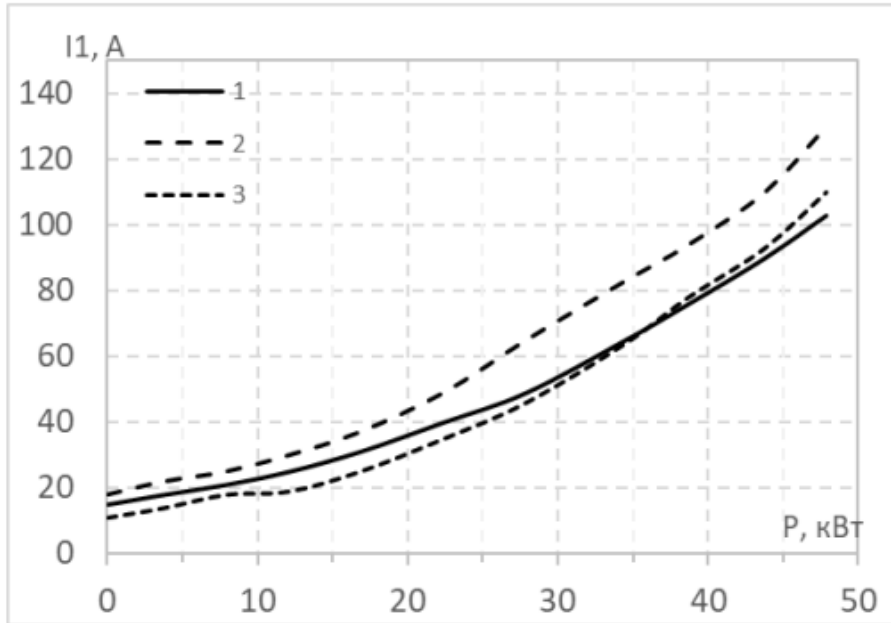


Рисунок 4.3 – Залежність струму статора від потужності на валу

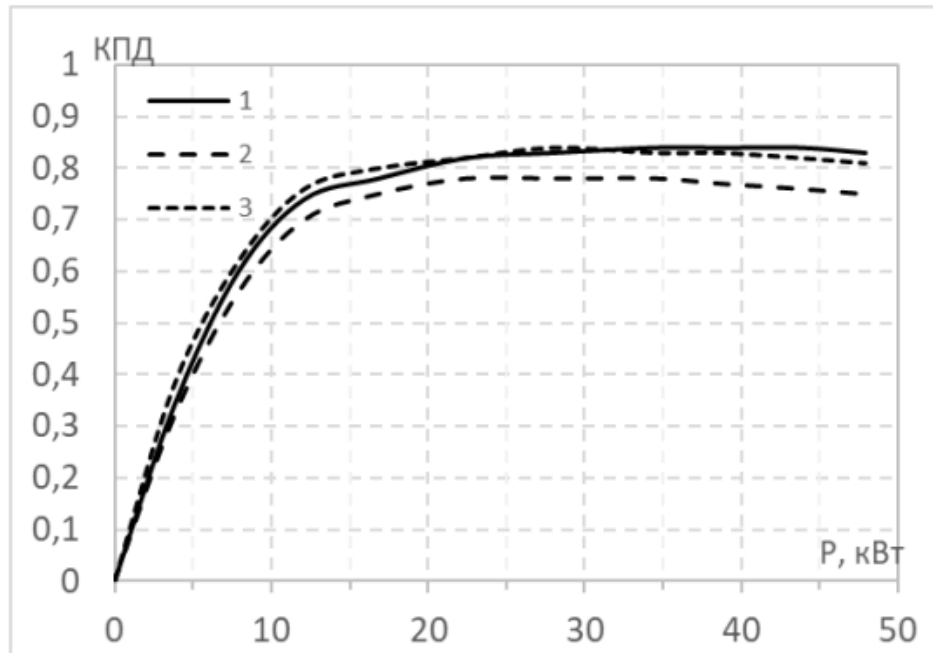


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта корисної дії від потужності

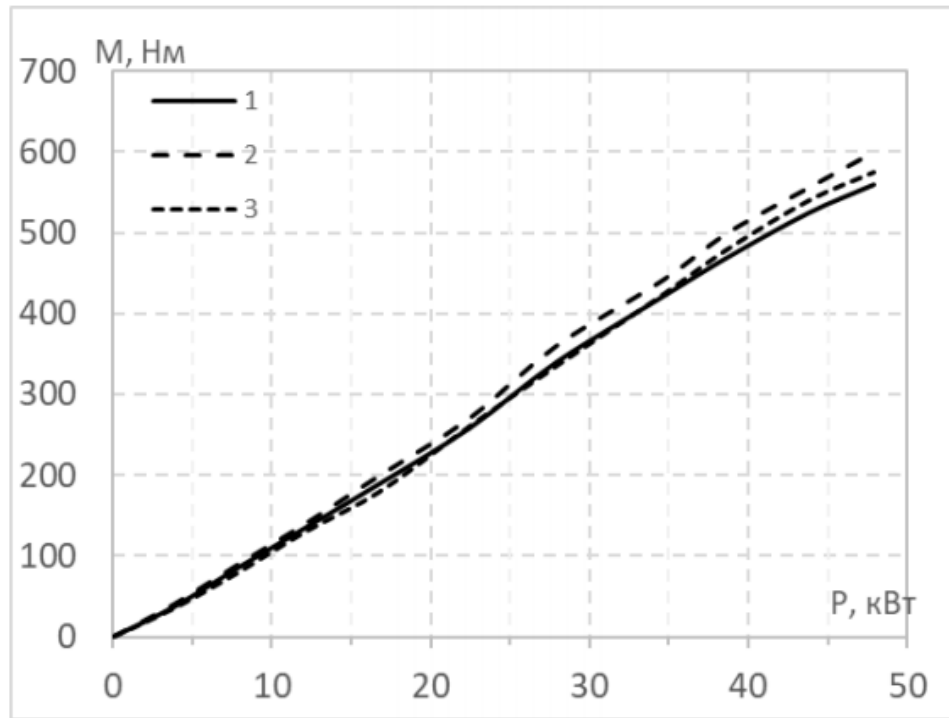


Рисунок 4.5 – Залежність моменту від потужності

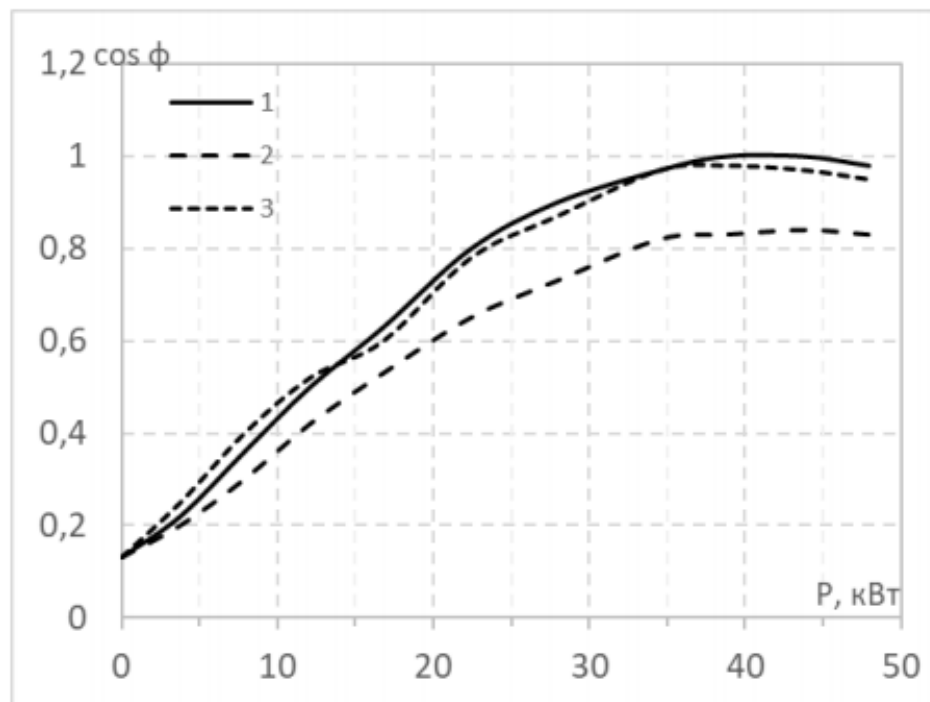


Рисунок 4.6 – Залежність $\cos \phi$ від потужності

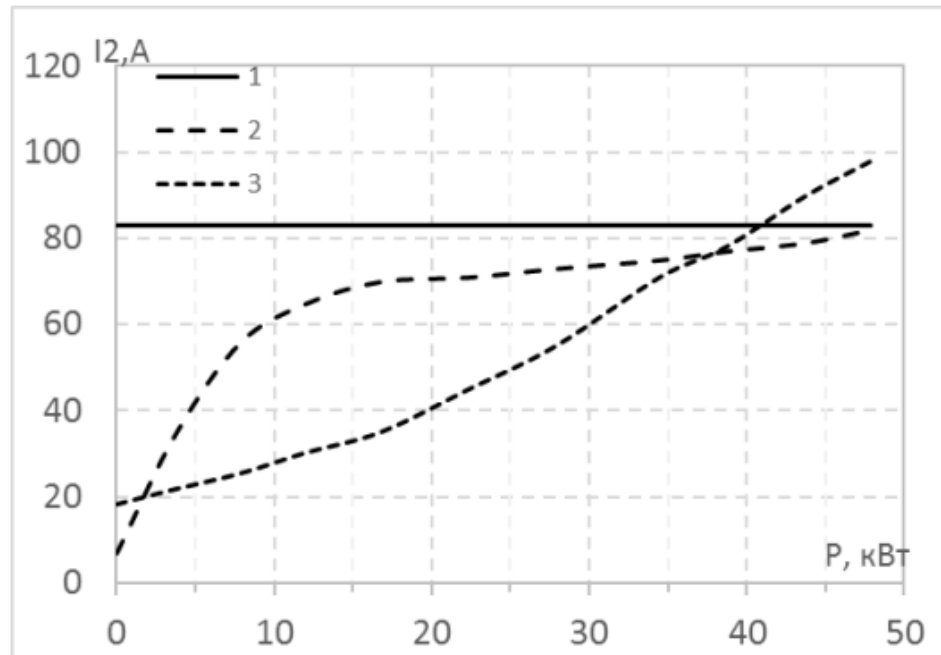


Рисунок 4.7 – Залежність струму ротора від потужності на валу

За результатами проведених досліджень можна відзначити, що коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна у синхронному режимі роботи вищий у середньому на 5%. Залежності, приведені на рисунку 4.3 підтверджують, що у синхронному режимі по обмотках статора при регулюванні потужності на валу протікає струм, значення якого в середньому на 10%, ніж в асинхронному режимі. При цьому слід зазначити, що при малих навантаженнях система з послідовним з'єднанням обмоток краще внаслідок одночасного зниження струму в статорі та роторі. При навантаженнях близьких до номіналу систему з незалежним живленням обмоток ротора можна порівняти за енергоспоживанням зі схемою з послідовним з'єднанням. В цілому, синхронний режим характеризується меншим споживанням енергії та більшою енергоефективністю.

5 ДВОДВИГУННИЙ СИНХРОНІЗОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

До промислових механізмів, які мають у своєму складі асинхронні двигуни з фазним ротором і використовують реостатний спосіб регулювання швидкості, відносяться агрегати безперервної дії. Найбільш поширеними представниками цього типу механізмів є конвеєри. Електроприводи цих механізмів модернізуються із використанням частотних перетворювачів, побудованих з урахуванням АІН, які мають ряд недоліків, описаних раніше. Нерідко доводиться міняти і сам двигун через недостатній клас ізоляції [13].

Одним з найбільш частих механізмів на виробництві є стрічкові конвеєри. Вони використовуються у багатьох галузях промисловості: від металургії до сільського господарства. Конвеєри забезпечують безперервне транспортування вантажів та матеріалів. Завдяки високій швидкості руху стрічки забезпечується висока продуктивність, а отже, і ефективність багатьох технологічних процесів.

У високопродуктивних конвеєрах застосовуються багатодвигунні приводи, що мають у своєму складі асинхронні двигуни з фазним ротором зі ступінчастим регулюванням швидкості зниження пускових струмів. В даний час використовуються як релейно-контакторні, так і тиристорні системи регулювання (ТСР), що забезпечують розгін двигуна до номінальних оборотів в функції струму або часу для зменшення динамічних навантажень. Для АДФР характерний низький ККД, близько 80-85%.

ТСР представляє собою комплектний пристрій, що складається з шаф з опорами, введеними в коло ротора двигуна, та шафи з тиристорним блоком, що забезпечує ступінчасте виведення опорів кола ротора. Після закінчення процесу пуску обмотка ротора замикається накоротко за допомогою силового контактора. Силова частина ТСР є тиристорним випрямлячем, що підключається з одного боку до контактних кільців асинхронного двигуна, а з іншого – до баластового опору. У шафі тиристорів розміщено два силові

блоки, які зібрані на теплових трубках: тиристори VS1-VS6 трифазний міст; VS7-VS9 - шунтуючі тиристори.

Схема дворухового електроприводу з індивідуальними ТСП приведена на рисунку 5.1.

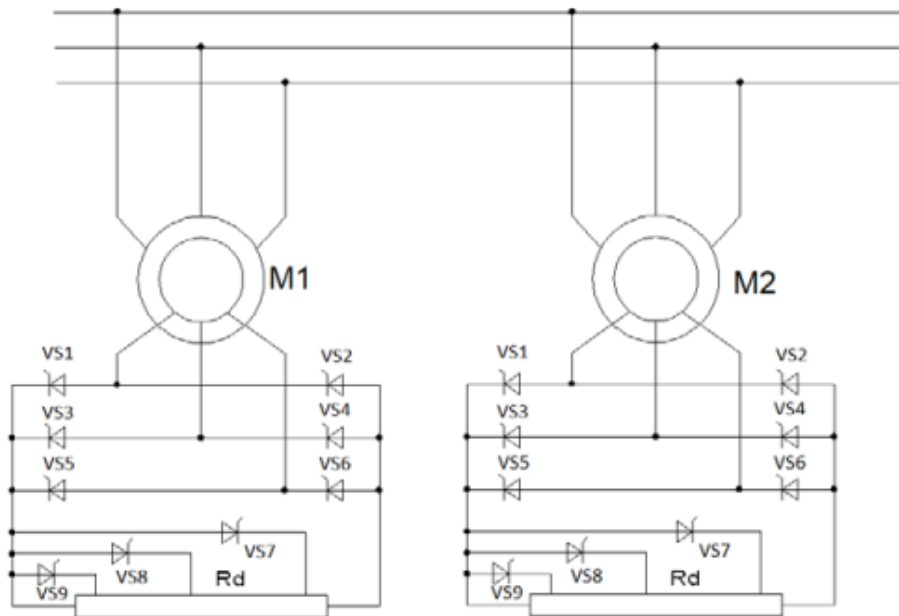


Рисунок 5.1 – Схема дворухового електроприводу з індивідуальними ТСП

У процесі роботи конвеєра виникає необхідність забезпечення регулювання швидкості збереження надійного зчеплення між барабанами і стрічкою при зміні навантаження [13]. Доцільно передбачити можливість автоматичної плавного зміни швидкості в функції кількості вантажу, що знаходиться на конвеєрі.

Ще однією важливою вимогою є забезпечення рівномірного розподілу навантаження між двигунами, що входять до складу багатодвигунного електроприводу конвеєра. Через різну жорсткість механічних характеристик двигунів різниця в навантаженнях досягає 20-40% в асинхронних двигунах з фазним ротором.

Спостерігається нерівномірне навантаження двигунів, що досягає 30-35%. Переведення асинхронного двигуна в синхронний режим, що характеризується абсолютно жорсткими механічними характеристиками,

разом із перетворювачем частоти забезпечить вирівнювання навантажень і відповідність вищевказаним вимогам.

Крім того, як встановлено в попередньому розділі, у синхронному режимі роботи дещо знижується струм статора, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню ефективності роботи стрічкового конвеєра.

При роботі двох асинхронних двигунів на загальне навантаження важливим завданням є рівномірний розподіл навантажень між окремими машинами. У електроприводах, що не мають механічного зв'язку, важливим є також забезпечення синхронного обертання валів двигунів.

У системі двохдвигунного приводу обмотки роторів асинхронних двигунів з фазним ротором можуть бути підключені:

- послідовно;
- паралельно;
- незалежно.

При послідовному з'єднанні забезпечується протікання по обмотках того самого струму. Таким чином забезпечується рівність розподілу навантажень між двигунами при різних опорах обмоток. У встановленому режимі момент двигуна дорівнює моменту опору механізму.

У двигунах також, як правило, рівні швидкості ідеального холостого ходу. Рівність ковзання забезпечується жорстким з'єднанням валів. Таким чином, послідовне з'єднання обмоток роторів забезпечує рівномірний розподіл навантажень. На відміну від схеми з паралельним з'єднанням обмоток у схемі з послідовним з'єднанням відсутня необхідність точного фазування роторів. Однак, у деяких випадках різниця ЕРС може виявитися критичною, що призведе до значного зниження струму та сумарного моменту, а внаслідок до зниження перевантажувальної здатності. Істотним недоліком схеми з послідовним включенням обмоток є також неможливість керування кожним двигуном окремо.

Застосування схеми з паралельним з'єднанням обмоток є актуальним у

двохдвигунних приводах без жорсткого механічного зв'язку між двигунами. У випадках, коли положення роторів щодо статорів однакове, ідентична і ЕРС їх обмоток, зрівнювального струму в колі немає. Якщо положення роторів не однакове, виникає різниця в ЕРС, утворюється зрівнювальний струм. Зрівнювальний струм призводить до виникнення моменту, знак якого відповідає напрямку усунення наявної неузгодженості положення одного ротора відносно іншого. Управління швидкістю у схемі з паралельним з'єднанням обмоток забезпечується одним перетворювачем.

Однак схема з паралельним з'єднанням також має свій недолік. У двоходвигунному приводі без жорсткого зв'язку зупинка агрегату призводить до того, що кожен двигун уповільнюється по-різному через відсутність загального струму в колі. Це може призвести до того, що при зупинці ротори двигунів займуть різне положення щодо відповідних статорів. При наступному пуску в колі виникне зрівнювальний струм, величину якого можна порівняти зі струмом короткого замикання. Уникнути цього можна проведенням фазування перед кожним пуском агрегату, що не завжди зручно за умов безперервного виробництва.

Недоліки схем з послідовним та паралельним з'єднанням обмоток відсутні у схемі з незалежним управлінням. Основною умовою рівного розподілу навантажень є однакова жорсткість механічних характеристик двигунів у складі дводвигунного електроприводу. Навіть для однотипних двигунів внаслідок різного активного опору обмоток ротора жорсткість характеристик різна.

Застосування синхронізованих асинхронних двигунів з незалежним живленням обмоток ротора постійним струмом дозволить забезпечити однакову жорсткість характеристик і, як наслідок, рівність навантажень двигунів.

Схема незалежного живлення обмоток роторів постійним струмом від індивідуальних перетворювачів є найбільш перспективною і дозволить забезпечити можливість незалежного керування параметрами кожного

Висновок

Застосування розробленої системи управління дозволить знизити втрати, що виникають у процесі реостатного регулювання швидкості в асинхронному двигуні з фазним ротором.

Розроблена система синхронізованого електроприводу застосовується у системах управління багатодвигунними електроприводами стрічкових конвеєрів, де пред'являються підвищені вимоги до жорсткості механічних характеристик електродвигунів.

Застосування синхронізованих асинхронних двигунів у складі дводвигунного електроприводу дозволить рівномірно навантажити двигуни за рахунок абсолютної жорсткості механічних характеристик.

6 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

6.1 Оцінка динамічних характеристик системи електропривода

Для перевірки достовірності аналітичних розрахунків та детального вивчення особливостей роботи запропонованих структур у середовищі моделювання побудовані імітаційні моделі окремих підсистем системи електроприводу. При складанні імітаційних моделей системи ЕП використовувалися прийняті у перетворювальній техніці такі припущення [19]:

- джерело живлення є ідеальним джерелом напруги;
- кола постійного та змінного струму, включаючи навантаження (АД), містять лише лінійні елементи, тому описуються лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами;
- ключові елементи є ідеальними.

Сформульовані припущення прийнято в більшості робіт з перетворювальної техніки і не призводять до помітних похибок при розрахунку основних електромагнітних процесів.

Найбільш перспективним комплексом прикладних програм, що забезпечує потреби інженерів, що працюють в галузі електроприводів, є пакет ППП MatLab Simulink. Середовище MatLab Simulink представляє досліднику та проектувальнику найширші можливості дослідження процесів у найскладніших системах за будь-яких змін параметрів, включаючи аварійні режими. Моделювання суттєво скорочує терміни розробки та налагодження систем електроприводів.

Модель блоку управління системи, що дозволяє реалізувати асинхронний запуск, приведена на рисунку 6.1. Модель силової частини електроприводу з незалежним живленням обмотки статора та ротора приведена на рисунку 6.2. Модель адаптивного спостерігача швидкості приведена на рисунку 6.3.

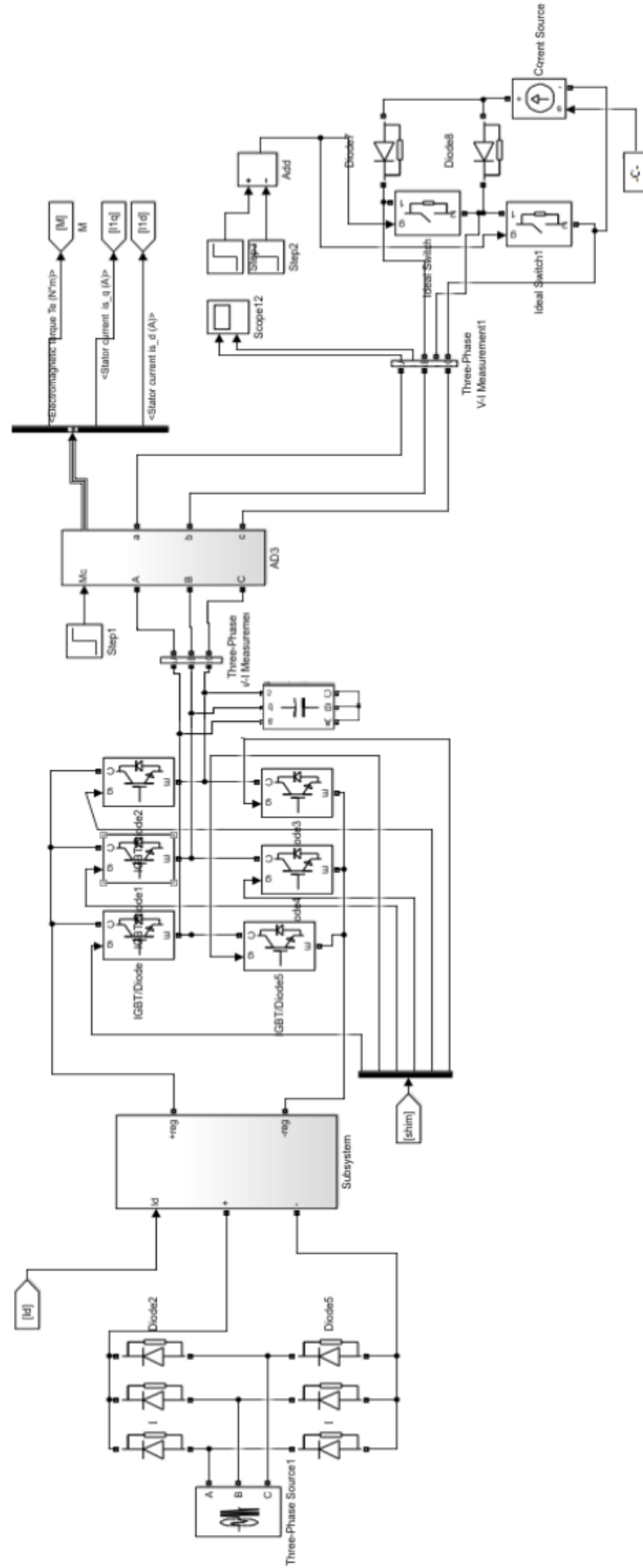


Рисунок 6.2 – Модель силової частини електропривода з незалежним живленням обмотки статора та ротора

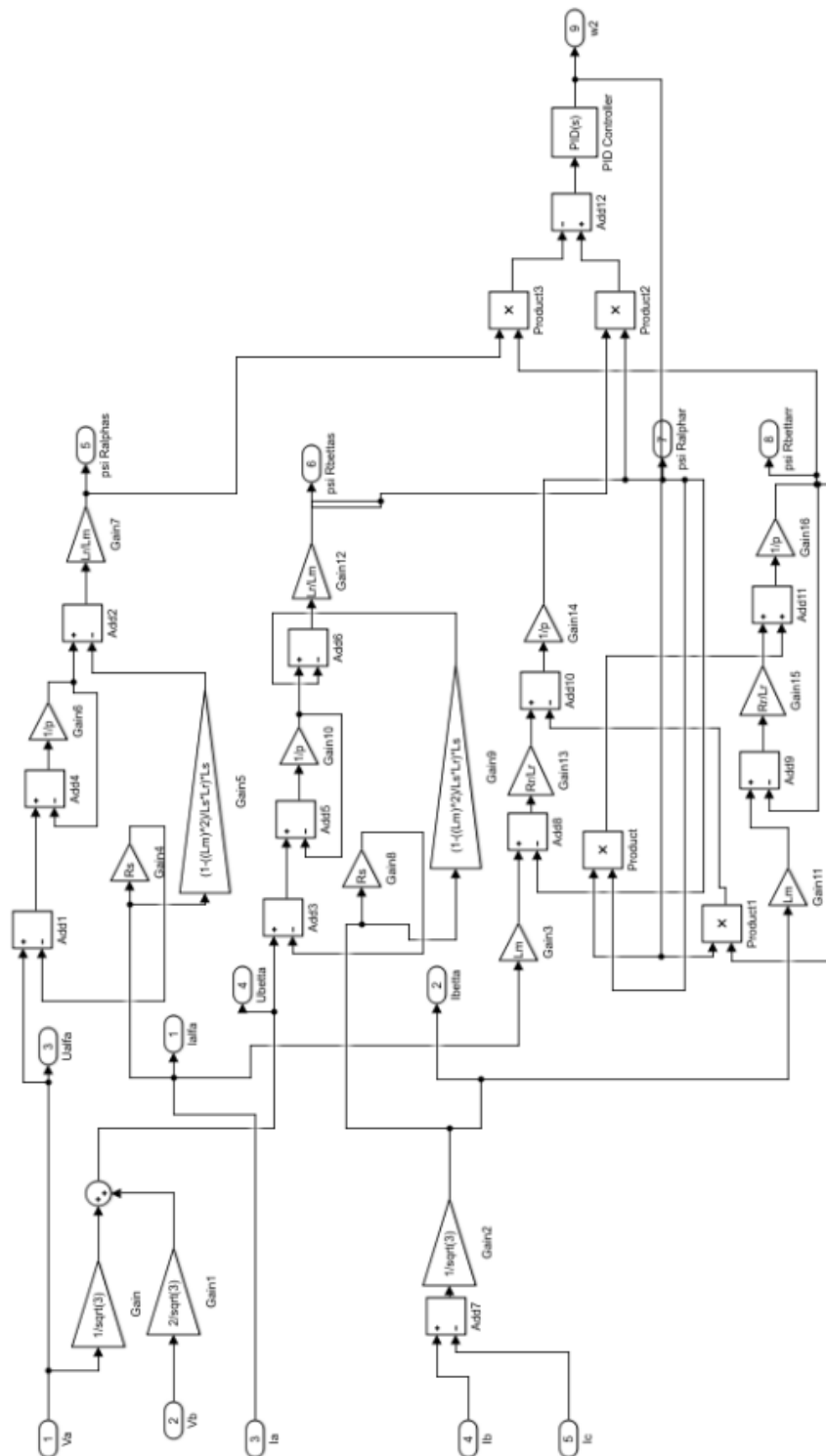


Рисунок 6.3 – Модель адаптивного спостерігача швидкості

Осцилограми перехідних процесів при асинхронному пуску синхронізованого електроприводу та синхронізації при живленні ротора від незалежного джерела приведені на рисунку 6.4. Як видно з рисунку, входження в синхронізм супроводжується коливаннями струму ротора та незначним перерегулюванням швидкості. Також після входження до

синхронізму спостерігається зниження струму статора приблизно на 10%.

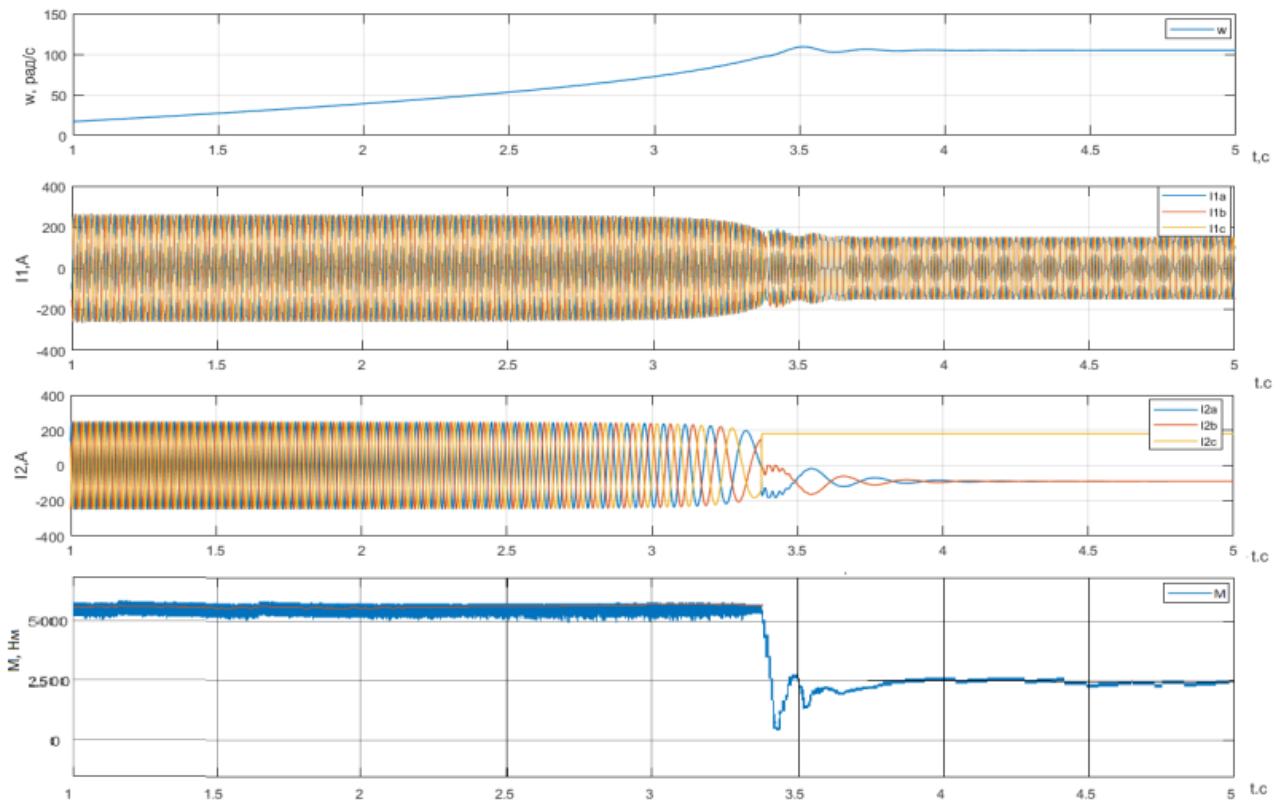


Рисунок 6.4 – Перехідні процеси в синхронізованому електроприводі при асинхронному пуску та переході в синхронний режим роботи

Для досягнення мінімальних коливань та отримання якісного перехідного процесу необхідно подавати струм збудження джерела постійного струму в момент, коли вектори досягають мінімальних амплітудних значень. Найбільш несприятливий процес спостерігається при подачі постійного струму в момент коли амплітудне значення струму відповідної фази становить максимальне негативне значення.

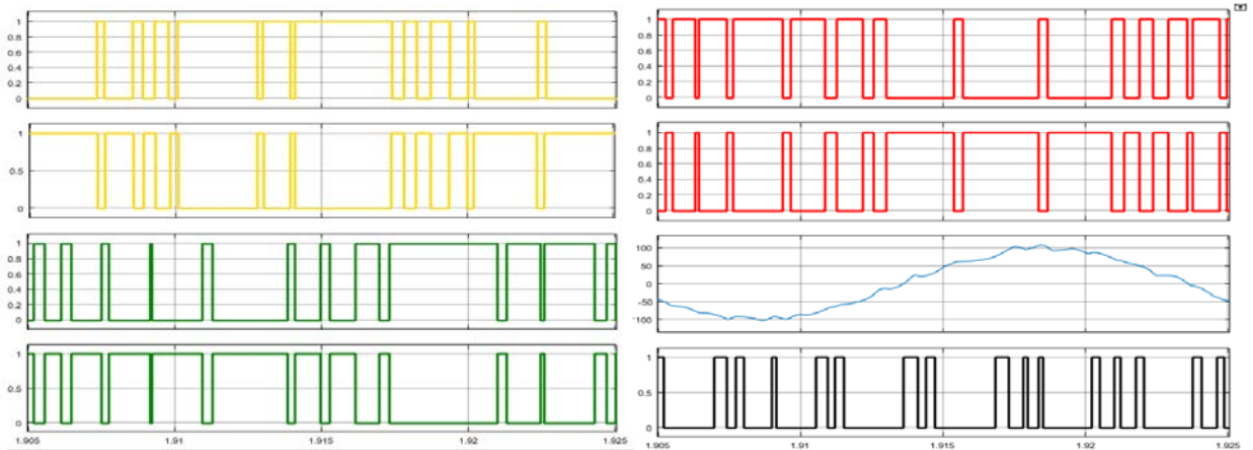


Рисунок 6.5 – Діаграми перемикання транзисторів інвертора та додаткового транзистора імпульсного перетворювача у ланці постійного струму перетворювача частоти

Висновок

Розроблено імітаційні моделі системи електропривода стрічкового конвеєра із врахуванням оптимізованих структур системи управління, а також оптимізованої структури контурів регулювання в середовищі ППП Matlab Simulink. Отримані результати підтверджують працездатність розробленої структури системи керування електроприводом стрічкового конвеєра, а також оптимізованої структури контурів регулювання.

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

7.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Електропривод стрічкового конвеєра установки має певний спектр особливостей ефективної експлуатації та вимог функціонування.

Застосування транспортних машин безперервної дії, зокрема, стрічкових транспортних ліній, з постійною швидкістю руху характеризується дуже низькою ефективністю, яка складає приблизно 50 ... 70% у вимірі продуктивності та 60 ... 70% - за часом. Низька ефективність даних механізмів пояснюється значною нерівномірністю вантажних потоків. Це провокує зниження їх техніко-економічних показників і підвищення вартості транспортування вантажів [20].

Підвищити ефективність використання транспортних машин при роботі з подібними вантажопотоками можна шляхом регулювання швидкості руху залежно від величини вантажопотоку. В даний час з'явилася можливість вирішення цих завдань сучасними методами оптимального управління за рахунок застосування сучасних засобів автоматизації.

Окремим завданням можна назвати завдання стабілізації тягової здатності для багатодвигунних стрічкових конвеєрів, у яких тяговий орган розподілений по всій довжині конвеєра, і крім рівномірного розподілу навантажень на приводу, тут необхідно підтримувати зчеплення тягових конвеєрів і основного конвеєра [20].

Алгоритми управління автоматичним натяжним пристроєм дозволять забезпечувати в статичних і динамічних режимах зниження зусиль в стрічці за рахунок стабілізації тягового фактору конвеєра, що дає можливість застосування менш міцних, отже, менш дорогих типів лени, знижує знос стрічки, усуває прослизання стрічки, пробуксовку

приводу, дозволяє збільшити довжину конвеєрної стрічки, знижує ймовірність аварійної ситуації.

Ще одним завданням автоматизації конвеєрного транспорту є автоматизація управління конвеєрних ліній і збірних конвеєрів. При об'єднанні конвеєрів в транспортні лінії системи автоматики повинні забезпечувати можливість централізованого пуску конвеєрної лінії зі зручної точки. Крім того, при узгодженні роботи окремих конвеєрів з параметрами надходять на них вантажопотоків, алгоритми управління збірним конвеєром істотно ускладнюються. Слід розробити метод попереджувального управління вантажопотоками для підвищення ефективності роботи конвеєрної лінії шляхом запобігання або скорочення простоїв окремих конвеєрів, перевантажень і завалів збірного конвеєра. Можна, наприклад, використовувати акумулюючі ємності для осереднення вантажопотоку при однаковій швидкості руху конвеєрів.

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

В таблиці 7.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на модернізацію електропривода степенів рухомості промислового робота.

Таблиця 7.1 – Капітальні витрати на електроустаткування базового та нового варіантів

Найменування електрообладнання	Кошторисна вартість варіанту	
	Базова (РКС-АД)	Нова (ПЧ-АД з КР)
Вартість двигуна МТФ-111-Н6 Р=132 кВт)	101380,0	101380,0
Вартість системи керування	179980,0	189240
Кабелі, апарати захисту, сенсори та інше обладнання	32440	32440
Вимірювальні прилади, показчики, реєстратори захищеного виконання	18200	18200
Спеціалізований інструментарій	8750	8750
ІКС (інформ.-керуюча система)	—	22500
Керовані перетворювачі струму та напруги (КПН, КПС)	—	48680
Разом капіталовкладення:	340750	421190
Транспортні витрати 13%	44297,5	54754,7
Всього ціна обладнання	385047,5	475944,7
Монтажні роботи 10%	38504,75	47594,47
Капітальні витрати	423552,25	523539,17

Отже, $K_6 = 423552,25$ грн.; $K_n = 523539,17$ грн.

Пропонована схема електропривода стрічкового конвеєра технічно реалізується на основі асинхронного двигуна, перетворювачів (струму та напруги) та системи управління перетворювачами, що працює під контролем інформаційно-керуючої системи (ІКС).

7.2 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:

$$З = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (7.1)$$

7.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

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

$$E_{аб} = 423552,25 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 42355 \text{ грн.};$$

$$E_{ан} = 523539,17 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 52354 \text{ грн.}$$

7.2.2 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 7.1 – 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:

$$E_3 = E_{30} + E_{3д}, \quad (7.2)$$

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

$E_{3д}$ – додаткова заробітна плата;

$$E_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_c \cdot \beta, \quad (7.3)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують систему керування стрічкового конвеєра ($N = 1$ чел.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду. Залежить від мінімальної заробітної платні, яка станом на 2023 рік складає 6700 грн. Тому розмір ставки робітника 1-го розряду приймаємо рівним 40 грн./год;

K – тарифний коефіцієнт ($K_б = 1,8$, $K_н = 2,03$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд робочого часу за рік (приймаємо рівним 220 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, $\beta = 0,7$ для нового варіанту).

Розрахуємо E_{30} для базового та нового варіантів.

$$E_{30 б} = 1 \cdot 40 \cdot 1,8 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 1 = 15840 \text{ (грн.)},$$

$$E_{30 н} = 1 \cdot 40 \cdot 2,03 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 0,7 = 12504,8 \text{ (грн.)}.$$

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

$$E_{3д б} = 15840 \cdot 0,10 = 1584,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{3д н} = 12504,8 \cdot 0,10 = 1250,5 \text{ (грн.)}.$$

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:

$$E_{зб} = 15840 + 1584,0 = 17424 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зн} = 12504,8 + 1250,5 = 13755,3 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 7.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Базовий варіант	Новий варіант
Основна заробітна плата, $E_{зо}$, грн.	15840	12504,8
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$, грн.	1584,0	1250,5
ВСЬОГО з нарахуванням, грн.	17424	13755,3

7.2.3 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot V \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_{\text{вм}} \cdot K_3, \quad (7.4)$$

де V – 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 5,93 грн/кВт·год.

P – встановлена потужність приводного двигуна (132 кВт);

η – ККД установки;

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

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

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Коефіцієнт корисної дії обчислено як добуток ККД двигуна і силового перетворювача. Для базового варіанту ККД складає 0,82, для нового варіанту

ККД приймаємо рівним 0,9. 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 (6.4) для базового та нового варіантів маємо:

$$E_{\text{ЕБ}} = \frac{132}{0,82} \cdot 5,93 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,78 = 1131756 \text{ (грн./рік)}.$$

$$E_{\text{ЕН}} = \frac{132}{0,9} \cdot 5,93 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 1057596 \text{ (грн./рік)}.$$

7.2.4 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 7.3 та 7.4.

Таблиця 7.3 – 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			6		7	33
АД		5			5			5			6		21
Кабельна мережа	4					4				4		6	18
Апарати ком-ії та захисту		10				10				11			31
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												115	

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, (6.3) прийме вигляд:

$$E_{30} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эф}}, \quad (7.5)$$

Таблиця 7.4 – Графік для нового 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	6			5			4			6		5	26
АД з ФР		4			5			4			5		18
Кабельна мережа	4					4						6	14
ІКС, КІН, КІС		5			6			5			4		20
Апарати ком-ії та захисту		7				6				6			20
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												110	

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

$$E_{30\text{б}} = 40 \cdot 2,7 \cdot 115 = 12420 \text{ (грн.)},$$

$$E_{30\text{н}} = 40 \cdot 2,33 \cdot 110 = 10252 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату (38 %):

$$E_{\text{зн б}} = 12420 \cdot 0,38 = 4720 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зн н}} = 10252 \cdot 0,38 = 3896 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

- для базового варіанту: $12420 + 4720 = 17140$ (грн.),
- для нового варіанту: $10252 + 3896 = 14148$ (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: $17140 \cdot 0,15 = 2571$ (грн.);
- для нового варіанту: $14148 \cdot 0,15 = 2122$ (грн.).

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр б}} = 17140 + 2571 = 19711 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{пр н}} = 14148 + 2122 = 16270 \text{ (грн.)}.$$

7.2.5 Інші витрати

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

$$E_{\text{ін б}} = (42355 + 17424 + 1131756 + 19711) \cdot 0,05 = 60562 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{ін н}} = (52354 + 13755,3 + 1057596 + 16270) \cdot 0,05 = 56998,8 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за (6.1) наведемо у вигляді таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Базовий варіант	Новий варіант
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	42355	52354
Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу, грн.	17424	13755,3
Витрати на електроенергію E_e , грн.	1131756	1057596
Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$, грн.	19711	16270
Інші витрати $E_{ін}$, грн.	60562	56998,8
Всього експлуатаційні витрати Z, грн.	1271808	1196974

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:

$$\lambda_B = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B} \cdot 100\%, \quad (7.6)$$

$$\lambda_B = \frac{1271808 - 1196974}{1271808} \cdot 100\% = 5,88\%$$

З результатів наведених розрахунків робимо висновок, що модернізація системи стрічкового конвеєра є економічно доцільною. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,88 %.

7.3 Визначення терміну окупності нового рішення

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

$$T_{ок} = (K_H - K_б) / (Z_{еб} - Z_{ен}), \quad (7.7)$$

$$T_{ок} = (523539,17 - 423552,25) / (1271808 - 1196974) = 1,34 \text{ (роки)}.$$

Отже, розраховані економічні показники свідчать про цілком виправдану економічну доцільність модернізації системи ЕП стрічкового конвеєра та дуже високу експлуатаційну надійність та ефективність, підвищенню якої присвячені дослідження в даній роботі.

Висновки: Вдосконалення системи електропривода стрічкового конвеєра за рахунок дообладнання системи електропривода є економічно доцільним та виправданим. За рахунок модернізації системи електропривода досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,88 %, що підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У цьому розділі магістерської дипломної роботи розглянуті питання з охорони праці та цивільного захисту, що були враховані під час розробки заходів з підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра. 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.

8.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

8.1.1 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 дільниці, 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 закріпленій за ними дільниці.

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 закріпленій за ним дільниці. 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.

8.1.2 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

ізолюваними ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

8.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

8.2.1 Мікроклімат

Категорія робіт, що виконується оперативним персоналом – Па – пов'язано з постійною ходою і перенесенням невеликих вантажів масою до 1 кг[23]. За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичні умови визначаємо як допустимі (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості: Па	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Па	18-27	65 при 26 °С	0,2-0,4

Необхідно, щоб в приміщеннях, що будуються, була постійна циркуляція повітря або встановлений кондиціонер[22]. Влітку при значних вологовтратах і значному часі опромінення інфрачервоною радіацією споживають охолоджену до 15-20°С підсолену (0,5 % HCl) газовану воду. Вживання підсоленої води запобігає згущенню крові, сприяє утриманню її в організмі, покращує самопочуття й підвищує працездатність. Із заходів особистої профілактики після теплових навантажень рекомендуються гідропроцедури.

8.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³[21].

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу на будь-якій ділянці вказує на необхідність у вживанні заходів з її очищення. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Таблиця 8.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4

Тому необхідно здійснювати наступні заходи: очищувати пил якнайчастіше, щодня протирати запилені поверхні обладнання з використанням продувки або пилососа. Потрібно планувати прибирання так, щоб воно приходилось на час коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

8.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018[8], роботи з обслуговування електроустановок, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

8.2.4 Виробничий шум

Шум вище гранично допустимих рівнів несприятливо діє на людину. Шум у приміщенні широкопasmовий. Нормуємо шум на робочому місці. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-85, ГР 2411-81 [9] і наведені в табл. 8.4.

Таблиця 8.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	

Устаткування, що є джерелом шуму (вентилятори, електроінструмент, технологічне обладнання), слід використовувати поза межами приміщень.

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Акустична обробка приміщень – це облицювання частини внутрішніх поверхонь огорожень звукопоглинаючими матеріалами, а також розміщення в приміщенні штучних звукопоглиначів, які представляють собою вільно підвішені об'ємні поглинаючі тіла довільної форми. Найбільший ефект при акустичній обробці можливо отримати в точках, які розташовані в зоні відбитого звуку; в зоні прямого звуку акустичний ефект від застосування облицювання набагато менший. Звукопоглинаючі облицювання розміщують на стелі і в верхніх частинах стін при висоті приміщення не більше 6-8 м таким чином, щоб акустично оброблена поверхня складала не менше 60 % від загальної площі обмежуючих приміщення поверхонь. У вузьких і дуже високих приміщеннях доцільно облицювання розміщувати на стінах, залишаючи нижні частини стін (до 2 м висотою) не облицьованими, або проектувати конструкцію звукопоглинаючої підвісної стелі.

8.2.5 Виробнича вібрація

Джерелами вібрацій є технологічне устаткування, електроінструмент і вентилятори. Норми виробничої вібрації на постійних робочих місцях в приміщеннях об'єктів будівництва, визначені за [23-24], наведено в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5– Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні полоси з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3* 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с}^* 10''$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: створення амортизаторів в яких використовують пружини, гуму та інші пружні матеріали; розміщення будівельних конструкцій на масивних фундаментах; встановлення додаткових реактивних опорів. Також серед технічних заходів уникнення шкідливого впливу вібрації – створення нових конструкцій інструментів і машин, вібрація яких не може виходити за безпечні для людини межі, а зусилля не повинні перевищувати 15- 20 кг. Усі деталі машин та агрегатів, що рухаються, повинні ретельно врівноважуватися, а для зменшення динамічних сил, які спричинюють вібрації, слід застосовувати змащування та ін.

8.2.6 Психофізіологічні фактори

а) Класи умов праці за показниками важкості праці:

Загальні енергозатрати організму (кг/м): Зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, $\text{кг}/(\text{Вт})$; При регіональному навантаженні (для чоловіків) – 12000(40); При загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – 40000(80); Маса вантажу, що постійно підіймається – до 25.

Стереотипні робочі рухи: При локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук)- до 60 000; При регіональному навантаженні(участь

рук та плечового суглоба) – до 30 000; Статичне навантаження (кг/с): Двома руками (чоловіки) – до 70 000; За участю м'язів тулуба та ніг – до 200 000.

Робоча поза: Періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба: Вимушені нахили протягом зміни – 150 разів; Переміщення у просторі(переходи задля технологічного процесу) – більше 12

б) Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; Сприймання інформації та їх оцінка - сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; Розподіл функцій за ступенем складності завдання - обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження: Зосередження (%за зміну) – до 50; Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150; Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80; Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний; Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: Тривалість робочого дня – більше 8 год; Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

8.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи управління електропривода в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Електроприводи невід'ємною частиною технологічного обладнання військових і стратегічних об'єктів. Тому вони можуть підлягати впливу іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Дія радіації на матеріали та обладнання залежить в основному від виду випромінювання, дози опромінення, умов навколишнього середовища Найбільш чутливе до дії

іонізуючого випромінювання електронне обладнання систем управління. В електроприводі таким обладнанням є: блок живлення, тиристори, діоди. Через це в двигуні можливі замикання обмотки збудження, а відповідно і загорання двигуна.

В результаті опромінення системи в регуляторах змінюється струм і коефіцієнти підсилення; в конденсаторах понижується напруга пробую і опір витоку, змінюється провідність і внутрішнє нагрівання. В ізоляційних і діелектричних матеріалах змінюються такі параметри як електрична та діелектрична провідність.

Дія електромагнітного імпульсу на електропривод може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів, зокрема транзисторів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання.

8.3.1 Дослідження стійкості роботи системи управління електропривода мережевого насосу котельнів умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій стійкості роботи системи управління, що розробляється, приймається допустима доза $D_{don}(P)$ або граничне значення рівня радіації $P_{sp}(P/god)$, при яких система буде нормально працювати [21].

Визначаємо граничні значення дози опромінення D_{spi} , для елементної бази системи управління, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 8.6.

Таблиця 8.6 – Граничні значення експозиційних доз системи управління електропривода мережевого насосу котельні

Елементи РЕА	D_{epi}, P	D_{ep}, P
Інтегральні схеми ТТЛ логіки	5×10^5	10 ⁴
Резистори типу МЛТ	10^7	
Транзистори КТ 816, КТ 316	10^4	
Напівпровідники	10^5	
Конденсатори К56	10^7	
Діоди Д226	10^4	

По мінімальному значенню допустимої дози, при якій в елементній базі виникають необоротні зміни, визначаємо границю стійкості роботи РЕА в цілому. Проаналізувавши дані таблиці 8.6, робимо висновок, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою $D_{ep}=10^4$ Рє транзистори та діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{осл}}, \quad (8.1)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації ($P_1 = 6,19$ Р/год);

t_k – час кінця опромінення ($t_k = 131400$ год (15 років));

t_n – час початку опромінення ($t_n = 1$ год);

$K_{осл}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{осл} = 2$).

$$D_m = \frac{2 \cdot 6,17 (\sqrt{131400} - \sqrt{1})}{2} = 2230,4 \text{ (Р)}.$$

Оскільки $D_{ep} > D_m$, то дана силові елементи мережі стійкі до дії радіації.

Визначимо допустимий час роботи системи управління електропривода мережевого насосу котельні в заданих умовах за формулою:

$$t_\theta = \frac{D_{ep} \cdot K_{осл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (8.2)$$

$$t_\theta = \frac{10^4 \cdot 2 + 2 \cdot 6,17 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,17} = 1621,74 \text{ (год)},$$

Можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 2230,4 \text{ Р}$, а допустима - 10^4 Р , отже, система управління ЕП є умовно стійкою в умовах короткочасного впливу іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи системи управління електропривода мережевого насосу котельні в заданих умовах становить 1621,74 год., при рівні радіації 6,19 Р/год.

8.3.3 Дослідження стійкості роботи системи управління електропривода мережевого насосу котельнів умовах дії електромагнітного імпульсу

При дослідженні впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на струмопровідні елементи необхідно врахувати, що ЕМІ має горизонтальну та вертикальну складові напруженостей електричного поля і тому повинні визначатися значення напруг на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній. Так як для живлення силового обладнання використовується мережа живлення змінної напруги 380 В, а кола управління – постійної 24 В, то проведемо розрахунок стійкості роботи для обох мереж живлення. Напряга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині:

$$U_z = E_g \cdot L_z, \quad (8.3)$$

де E_g – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля ($E_g = 9,95 \cdot 10^3 \text{ В/м}$);

L_z – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи ($L_r = 1,85 \text{ м}$).

$$U_z = 9,95 \cdot 10^3 \cdot 1,85 = 18,4 \text{ (кВ)}.$$

$$U_g = E_z \cdot L_g, \quad (8.4)$$

де E_z – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля (В/м);

L_g – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи ($L_b = 2,15 \text{ м}$).

Визначаємо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля:

$$E_z = E_g \cdot 10^{-3}, \quad (8.5)$$

$$E_z = 9,95 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 9,95 \text{ (В/м)},$$

$$U_g = 9,95 \cdot 2,15 = 21,39 \text{ (В)}.$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення для різних блоків:

$$U_{\text{дон}} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (8.6)$$

де N – відсоток допуску ($N=5\%$).

Для силового кола ($U_{\text{жс}} = 380 \text{ В}$):

$$U_{\text{дон}} = 380 + \frac{380}{100} \cdot 5 = 399 \text{ (В)}.$$

Для кола управління ($U_{\text{жс}} = 24 \text{ В}$):

$$U_{\text{дон}} = 24 + \frac{24}{100} \cdot 5 = 25,2 \text{ (В)}.$$

Коефіцієнт безпеки визначається за формулою:

$$K\sigma_{z(\theta)} = 20 \lg \frac{U_{\text{дон}}}{U_{z(\theta)}} \geq 40 \text{ [дБ]}, \quad (8.7)$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для силового кола ($U_{\text{жс}} = 380 \text{ В}$):

- вертикальної:

$$K\sigma_g = 20 \cdot \lg \frac{399}{21,39} = 60,89 \text{ (дБ)},$$

- горизонтальної:

$$K\sigma_z = 20 \cdot \lg \frac{399}{18400} = -71,51 \text{ (дБ)}.$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кола управління ($U_{\text{жс}} = 24 \text{ В}$):

- вертикальної:

$$K\sigma_g = 20 \cdot \lg \frac{25,2}{21,39} = 5,64 \text{ (дБ)},$$

- горизонтальної:

$$K\delta_z = 20 \cdot \lg \frac{25,2}{18400} = -126,75 \text{ (дБ)}.$$

Отримані дані заносимо в таблицю 8.7.

Таблиця 8.7 – Значення коефіцієнтів безпеки системи управління електропривода мережевого насосу котельні

№	Найменування	$K\delta_{\epsilon}$	$K\delta_z$	Результат дії
1	Силове коло, 380 В	60,89	-71,51	Нестійке
2	Коло управління, 24 В	5,64	-126,75	Нестійке

Отже система є нестійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу. Для підвищення стійкості роботи системи управління електропривода мережевого насосу котельні слід застосувати екранування. Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо перехідне затухання екрану:

$$A = K\delta_{ном} - K\delta_{мін}, \quad (8.8)$$

де $K\delta_{ном}$ – номінальний коефіцієнт безпеки ($K\delta_{ном} = 40$ дБ);

$K\delta_{мін}$ – мінімальний коефіцієнт безпеки отриманий під час розрахунків.

Для силового кола ($U_{жс} = 380$ В):

$$A_{380B} = 40 + 71,51 = 111,51 \text{ (дБ)}.$$

Для силового кола ($U_{жс} = 24$ В):

$$A_{24B} = 40 + 126,75 = 166,75 \text{ (дБ)}.$$

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (8.9)$$

де A – перехідне затухання екрану;

f – найбільш характерна частота (15 кГц).

Отже для обладнання силового кола товщина екрану:

$$t_{380B} = \frac{111,51}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,175(\text{см}),$$

Для обладнання система управління товщина екрану:

$$t_{24B} = \frac{166,75}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,261(\text{см}).$$

Висновок: В даному розділі було проведене дослідження стійкості роботи системи електропривода стрічкового конвеєра в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах дії іонізуючих випромінювань, час роботи якої в заданих умовах становить 13 років, для трансформаторів та 11 років для вимикачів, при рівні радіації 4,92 Р/год. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах впливу електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування електропривода та отримано такі результати досліджень:

1. Проаналізовано існуючі алгоритми та способи управління асинхронним двигуном з фазним ротором, визначено недоліки кожного способу, визначено тенденції розвитку сучасних систем управління, сформульовано принципи організації та галузі застосування синхронізованих електроприводів.

2. Запропонована математична модель асинхронного двигуна в асинхронному та синхронізованому режимах роботи із порівнянням їх механічних характеристик, виконано математичний опис принципу формування вихідного сигналу автономного інвертора, який дає можливість виконати побудову та моделювання частотно регульованого синхронізованого електроприводу.

2. Розроблено бездатчикову систему управління з адаптивним спостерігачем швидкості асинхронного двигуна, що дозволяє виключити похибку сигналу з датчика швидкості під дією механічних впливів на об'єкт управління і підвищуючим імпульсним перетворювачем в ланці постійного струму для забезпечення енергоефективних режимів функціонування синхронізованого електроприводу.

3. Побудовано систему управління синхронізованим асинхронним електроприводом з незалежним живленням обмоток ротора та імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму, що забезпечує знижену кількість комутацій силових транзисторів інвертора за рахунок алгоритму формування струму у ланці постійного струму, що сприяє зниженню комутаційних втрат.

Застосування системи управління з незалежним живленням обмоток ротора є актуальним у приводах стрічкових конвеєрів, що характеризуються постійним моментом опору та працюють у тривалому режимі.

4. Для порівняльної оцінки розроблених систем управління побудовано робочі характеристики асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором та синхронізованого асинхронного двигуна при регулюванні ступеня навантаження двигуна. За результатами проведених досліджень можна відзначити, що коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна у синхронному режимі роботи вищий у середньому на 5%.

5. Розроблена система синхронізованого електроприводу застосовується у системах управління багатодвигунними електроприводами стрічкових конвеєрів, де пред'являються підвищені вимоги до жорсткості механічних характеристик електродвигунів. Застосування синхронізованих асинхронних двигунів у складі двохдвигунного електроприводу дозволить рівномірно навантажити двигуни за рахунок абсолютної жорсткості механічних характеристик.

6. 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.

7. 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. Система автоматизованого керування конвеєром гірничовидобувного підприємства / А.П. Тарасюк – Магістерська дисертація. *Київ*: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018 – 96 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 IV. 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., Кузнецов 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. Клепиков 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. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом стрічкового конвеєру. Курсове та дипломне проектування, навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабко В. В. – Вінниця : ВНТУ. – 2010. – 89 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 дані (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* «ЛП Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету», Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL:<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feem/all-feem-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-konveiyera-KL5250-dlya-ekskavatora-ERSHR-D5250.html> [razrabotka-SAR-skorosti-lenty-konveiyera-KL5250-dlya-ekskavatoraERSHR-D- 5250.html](http://bukvar.su/promyshlennost-proizvodstvo/page,5,89079-Issledovanie-irazrabotka-SAR-skorosti-lenty-konveiyera-KL5250-dlya-ekskavatora-ERSHR-D-5250.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. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с.управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4.
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.

Додаток А

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«07» 11 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА**

08-24.МКР.009.00.000 ТЗ

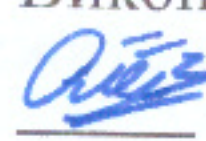
Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Володимир БОГАЧУК

«07» 11 2023 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-21м

 Олег ЗАДАНЮК

«07» 11 2023 р.

Вінниця ВНТУ 2023

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра».

Скорочене найменування розробки – «Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра».

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

Конвеєри забезпечують безперервне транспортування вантажів та матеріалів. Завдяки високій швидкості руху стрічки забезпечується висока продуктивність, а отже, і ефективність багатьох технологічних процесів. Вони використовуються у багатьох галузях промисловості: від металургії до сільського господарства.

4 Вимоги до розробки

Вибір системи електропривода і режиму його роботи в значній мірі визначаються статичним навантаженням, яке створюється механізмом на валу привідного двигуна. Значення і характер статичного навантаження двигуна механізмів переривчатої дії суттєво залежать від кінематичної схем і природи сил, що визначають опір руху. Аналізуючи механічні характеристики машини в різних режимах, функціонування машини передбачає розбиття робочої зони механічних характеристик машини на ділянки, в яких механічні характеристики машини не змінюються якісним

чином. Виділимо такі ділянки: розгін до підсинхронної швидкості та перехід в синхронізований режим роботи електропривода.

5 Комплектація розробки

Робоча машина являє собою тяговий орган конвеєрного механізму, привідний і натяжний барабани, натяжний вантаж, стрічку. Все устаткування системи подачі суміші в глинозмішувач розташовується на несучій рамі.

Транспортуючим органом є стрічка конвеєра. Електродвигун, електропроводка всіх кіл системи подачі суміші і електромеханічне устаткування з апаратурою представляють собою ту частину загального машинного пристрою, яку і називають електроприводом стрічкового конвеєра.

6 Джерела розробки

1. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.
2. Голуб А.П., Кузнецов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.
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

Система електропривода забезпечує управління машиною в діапазоні швидкостей $0,1\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0$, при регулюванні швидкості вгору від нульової та

в діапазоні швидкостей $0 \leq \omega \leq \omega_0$ вниз від номінальної. Бездатчикова система управління з адаптивним спостерігачем швидкості асинхронного двигуна дозволяє виключити похибку сигналу з датчика швидкості під дією механічних впливів на об'єкт управління і підвищуючим імпульсним перетворювачем в ланці постійного струму для забезпечення енергоефективних режимів функціонування синхронізованого електроприводу.

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

Електропривод стрічкового конвеєра – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинен відповідати правилам влаштування електроустановок.

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 ЧАСТОТНОГО
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТРІЧКОВОГО
КОНВЕЄРА**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Актуальність теми дослідження. Енергозбереження – це один із найважливіших напрямів у енергетичній політиці багатьох виробничих підприємств. Враховуючи, що більшу частину електроенергії, що виробляється, споживають електроприводи можна говорити про високу актуальність завдань пошуку шляхів енергозбереження при експлуатації, модернізації систем управління електроприводів.

Об'єктом є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода стрічкового конвеєра.

Предметом є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електропривода стрічкового конвеєра.

Метою роботи є розробка та дослідження систем управління синхронізованим асинхронним електроприводом з частотно-струмовим керуванням із забезпеченням необхідних пускових та регульовальних характеристик за рахунок застосування коригувальних контурів регулювання та енергоефективних алгоритмів управління.

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

- аналіз систем керування двигунами змінного струму, зокрема асинхронним двигуном із фазним ротором;
- дослідження математичної моделі асинхронного двигуна з фазним ротором та аналіз варіантів підвищення її стійкості у синхронному режимі роботи за рахунок побудови додаткових контурів регулювання електромагнітних параметрів машини;
- розробка безсенсорної системи частотно-струмового керування синхронізованим електроприводом;
- оцінка розробленої системи управління, дослідження енергетичних показників аналізованого електроприводу в різних режимах роботи;
- техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електроприводу та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень.

Характеристики технологічного механізму

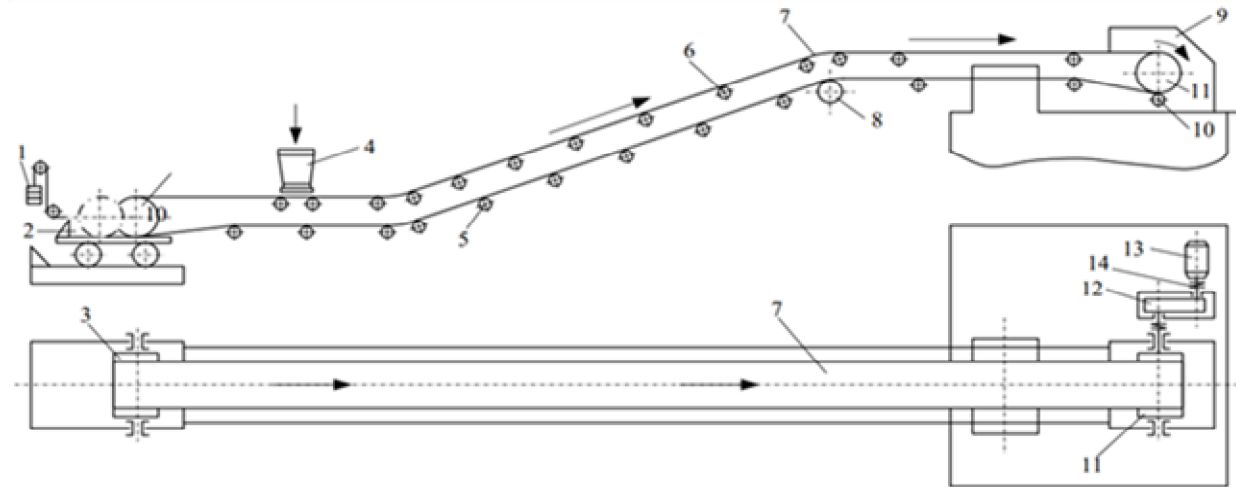
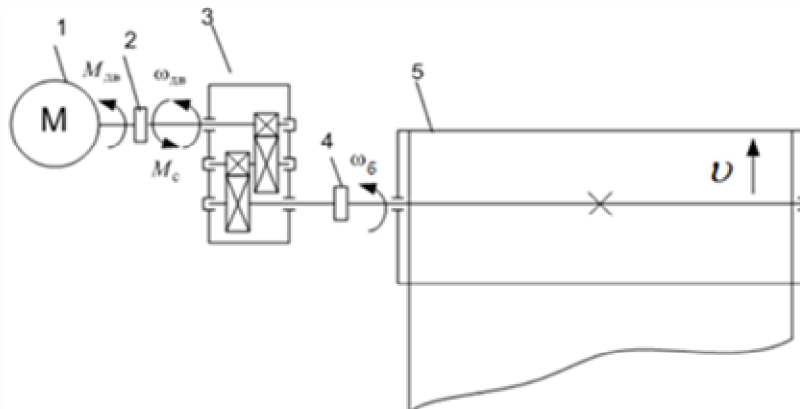


Рисунок 1 – Схема типового похило-горизонтального стрічкового конвеєра

На схемі 1.2 наведено такі позначення: 1 – пропіввага; 2 – натяжний пристрій; 3 – барабан; 4 – завантажувальний пристрій; 5,6 – роликів 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); $\omega_{дв}$ та $\omega_{б}$ – кутові швидкості барабана та двигуна; v – швидкість стрічки.

Рисунок 2 – Кінематична схема механізму

ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ



Рисунок 1 – Завдання автоматизації стрічкових конвеєрів

ОСОБЛИВОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

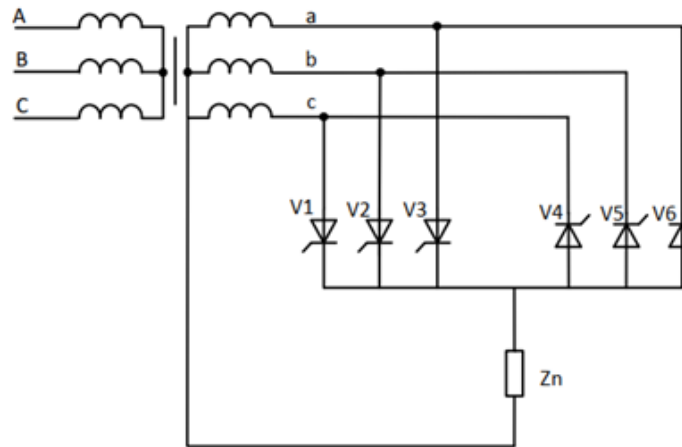


Рисунок 3 – Схема трифазно-однофазного БПЧ

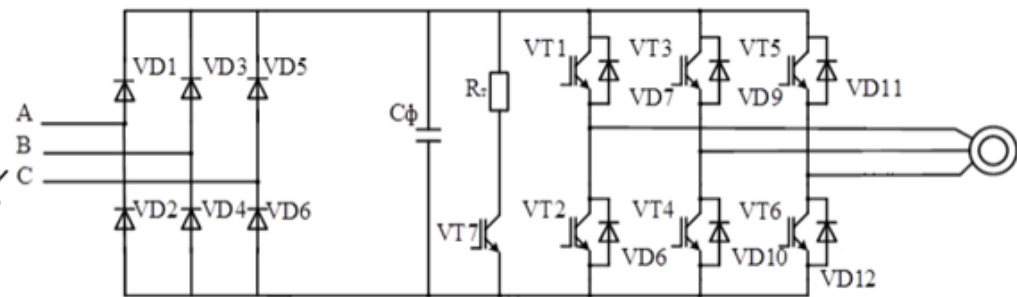


Рисунок 4 – Схема дволанкового перетворювача частоти з АІН

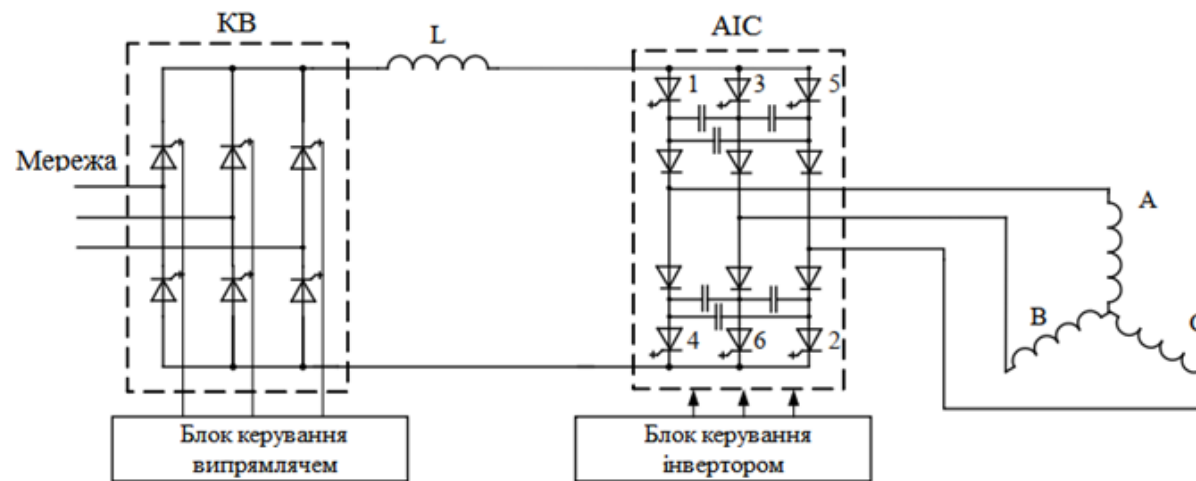


Рисунок 5 – Схема дволанкового перетворювача частоти на основі АІС

ОГЛЯД СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АД

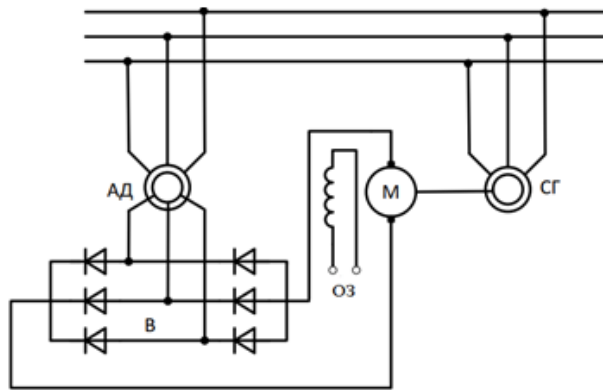


Рисунок 6 – Схема вентильно-машинного каскаду

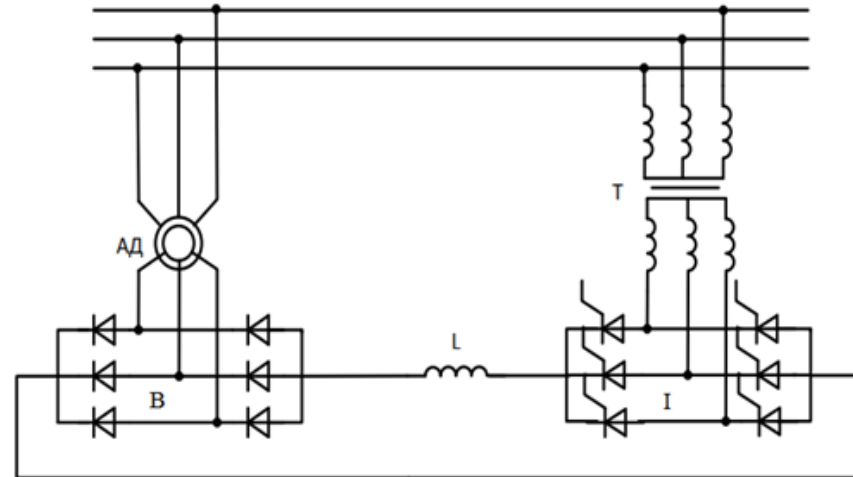


Рисунок 7 – Схема асинхронно-вентильного каскаду

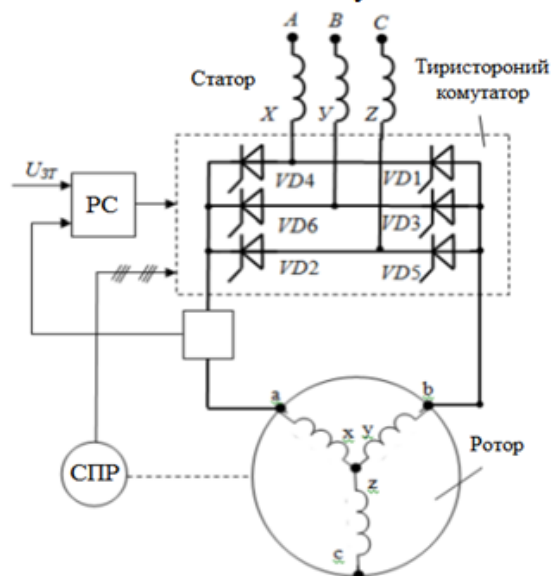


Рисунок 8 – Функціональна схема електроприводу з імпульсно-векторним керуванням

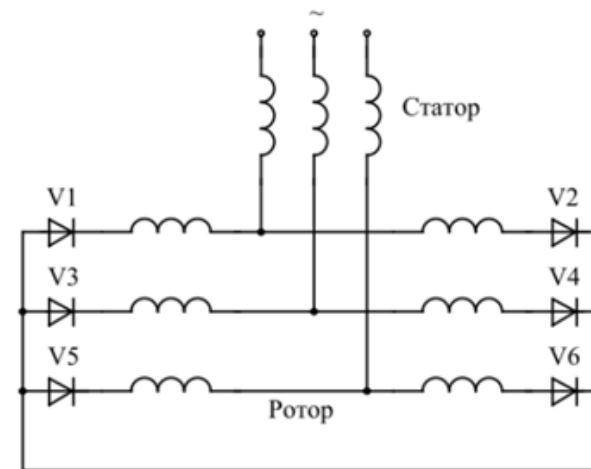


Рисунок 9 – Схема підключення двигуна в режимі синхронно-асинхронної машини

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АД В РІЗНИХ РЕЖИМАХ

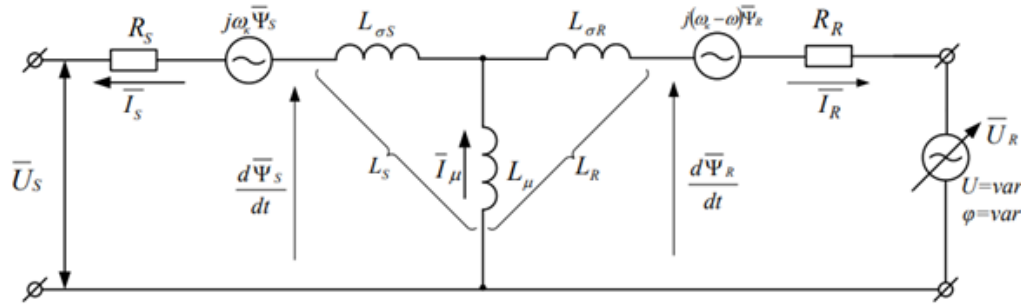


Рисунок 10 – Схема заміщення машини подвійного живлення

Система рівнянь (3.4) описує машину подвійного живлення:

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

$$\begin{cases} \bar{U}_s = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_0 \right) \cdot \bar{\Psi}_s - \frac{R_s k_r}{\sigma L_s} \cdot \bar{\Psi}_r, \\ \bar{U}_r = \frac{R_r k_s}{\sigma L_r} \cdot \bar{\Psi}_s + \left(\frac{R_r}{\sigma L_r} + j\omega_0 s \right) \cdot \bar{\Psi}_r, \\ M = -\frac{3}{2} \cdot p_{II} \cdot \frac{L_\mu}{L_s \cdot L_r - L_\mu^2} \cdot (\bar{\Psi}_s \times \bar{\Psi}_r). \end{cases} \quad (3.4)$$

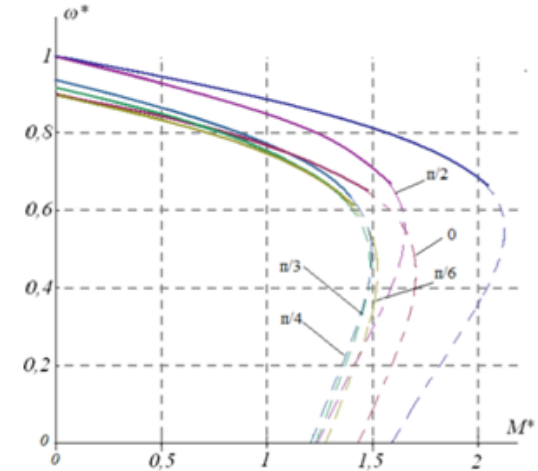


Рисунок 11 – Механічні характеристики МПЖ в асинхронному режимі

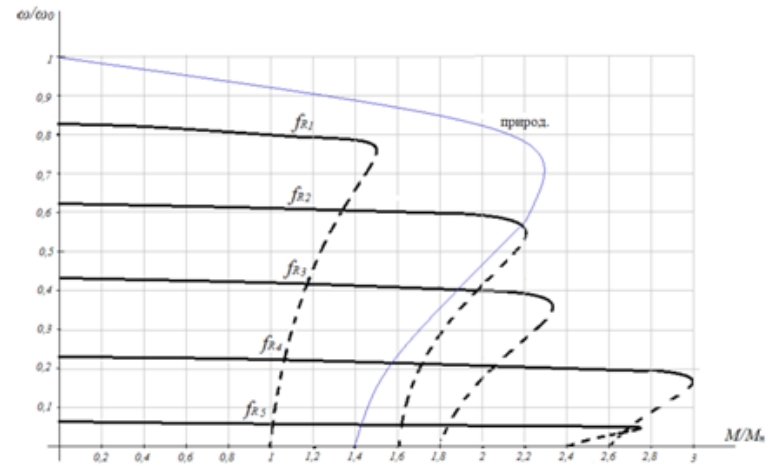
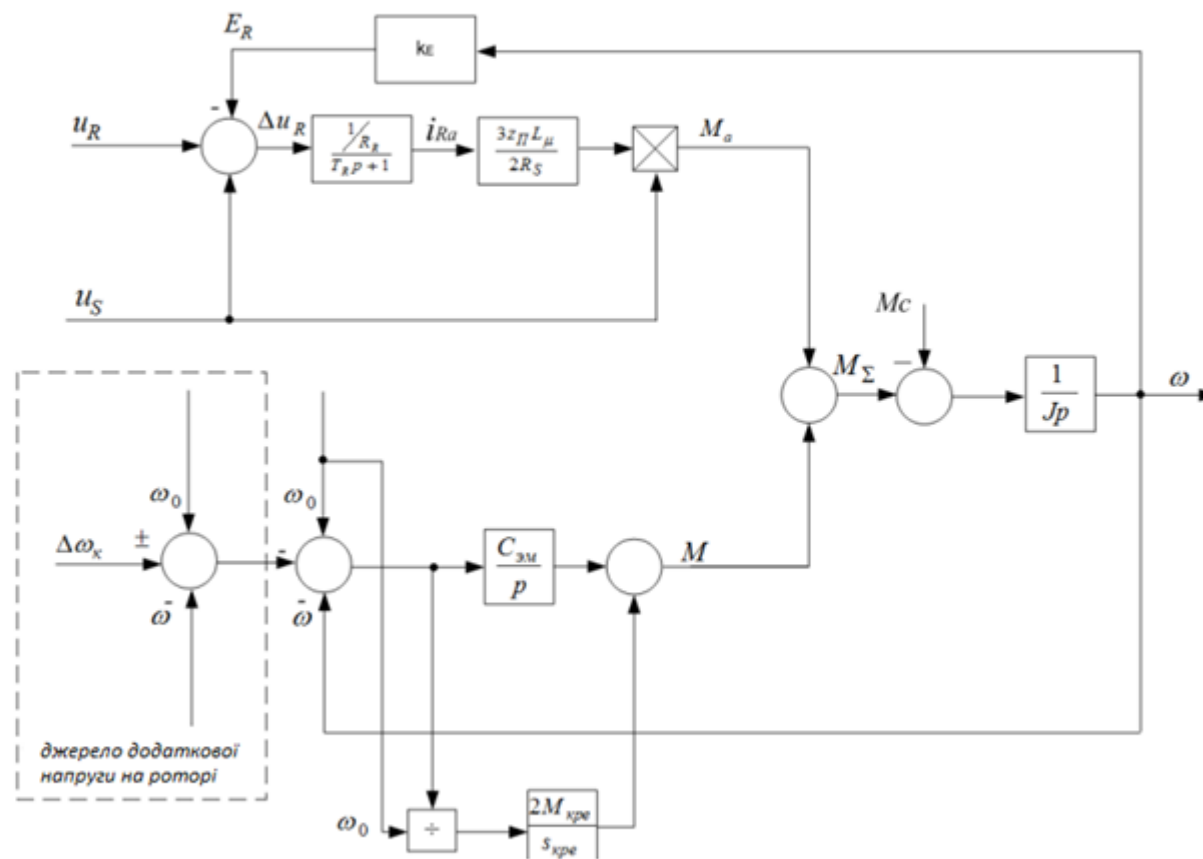


Рисунок 12 – Сімейство механічних характеристик МПЖ в синхронному режимі

ЕКВІВАЛЕНТНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АД

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



рисуюнок 13 – Еквівалентна структурна схема асинхронного двигуна (синхронізованого) з подвійним живленням

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

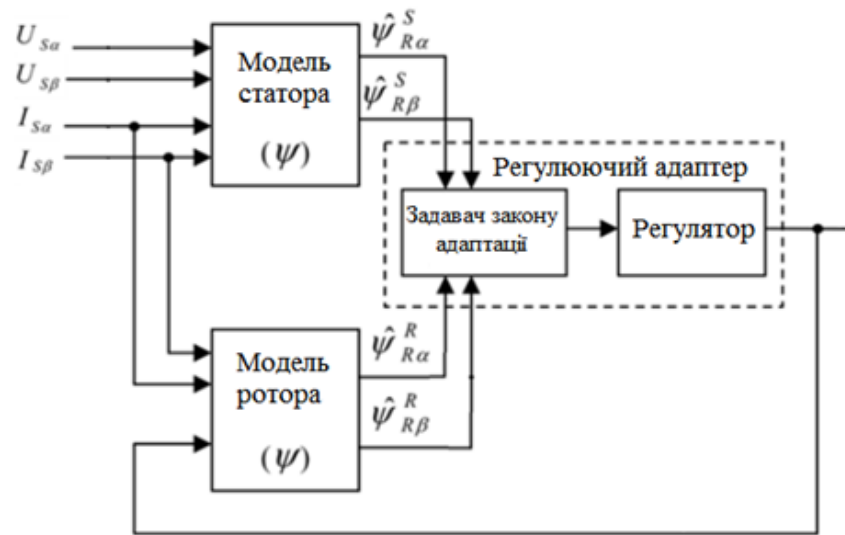


Рисунок 16 – Структурна схема адаптивного спостерігача

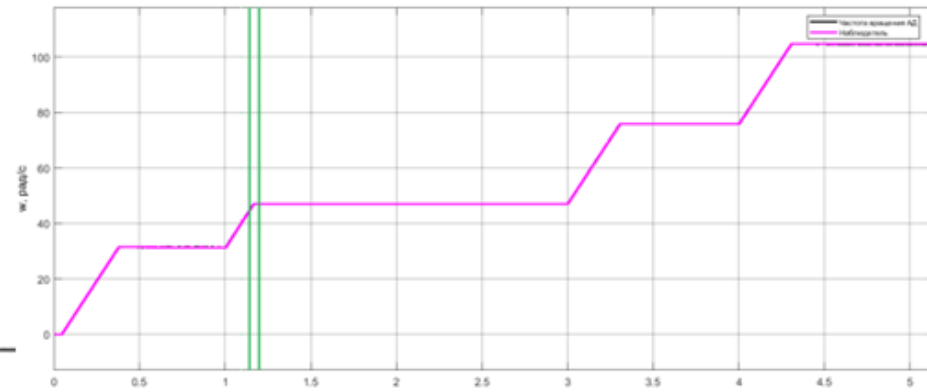


Рисунок 17 – Осцилограми сигналу кутової швидкості при ступінчастому регулюванні сигналу завдання

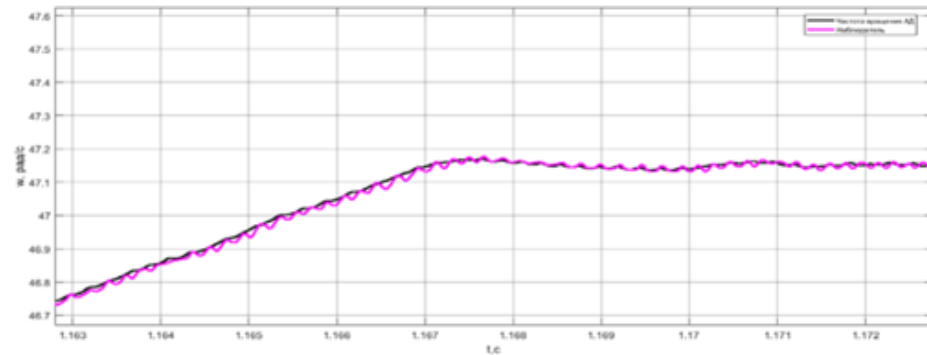


Рисунок 18 – Осцилограми сигналу кутової швидкості при ступінчастому регулюванні сигналу завдання

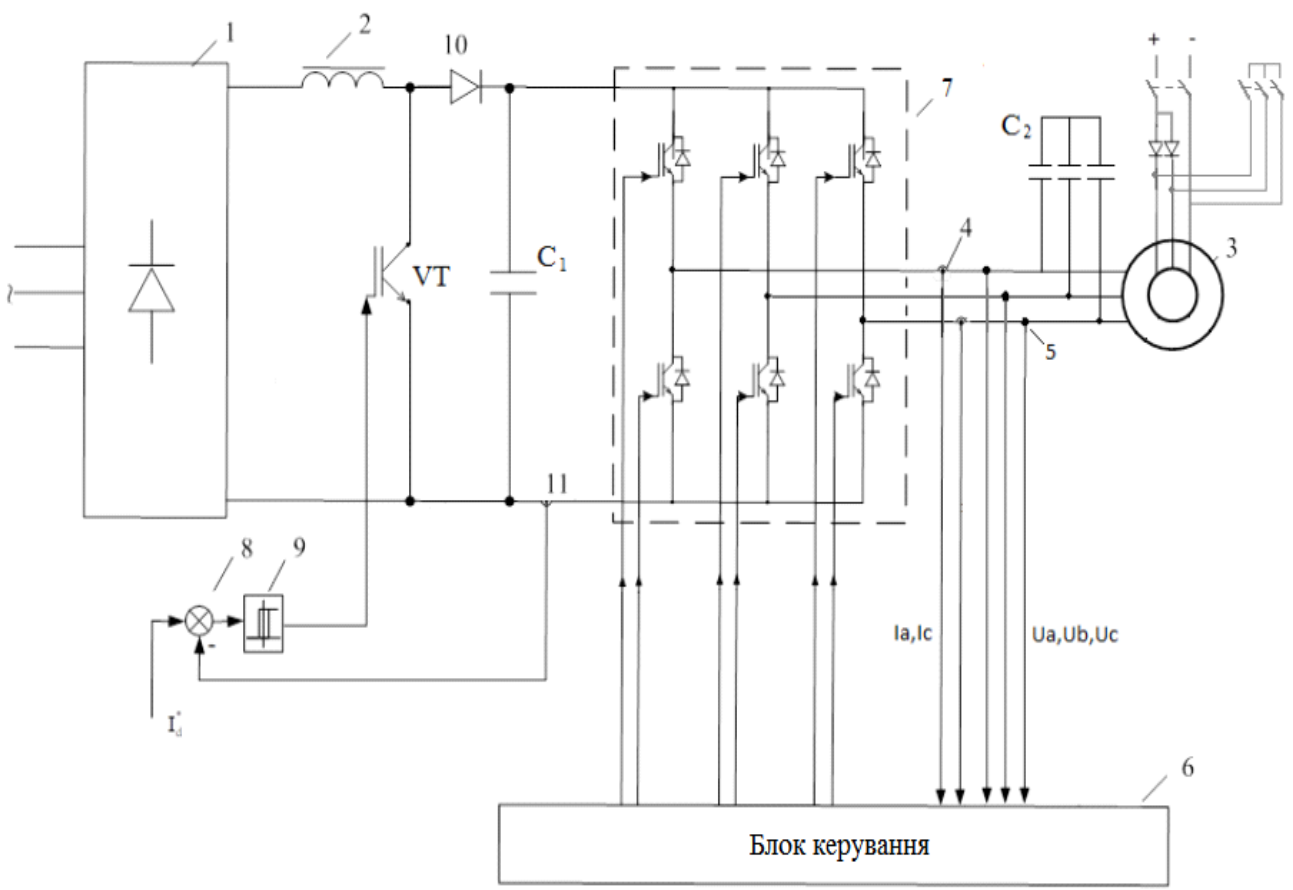
Інв. №	Підпис та дата	На зам. інв.	Інв. №	Підпис та дата

Зм. АРК.	№ ДОКУМ.	Підп.	Дата
Розробив	Заданок О.С.		
Перевірив	Богачук В.В.		
Т. КОНТР.			
Н.КОНТР.	Павлюк О.А.		
Затв.	Молнориз М.М.		

08-24.БДР.009.00.000 ЕЗ

Підвищення ефективності частотно асинхронного електропривода стрічково конвеєра. Схема синхронізованого електроприводу з незалежним управлінням кола ротора

Літера	Маса	Масштаб	Аркуш 1	Аркушів
			У	
ВНТУ, гр. ЕПА-22м				



08-24.БДР.009.00.000 ЕЗ

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗОВАНИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

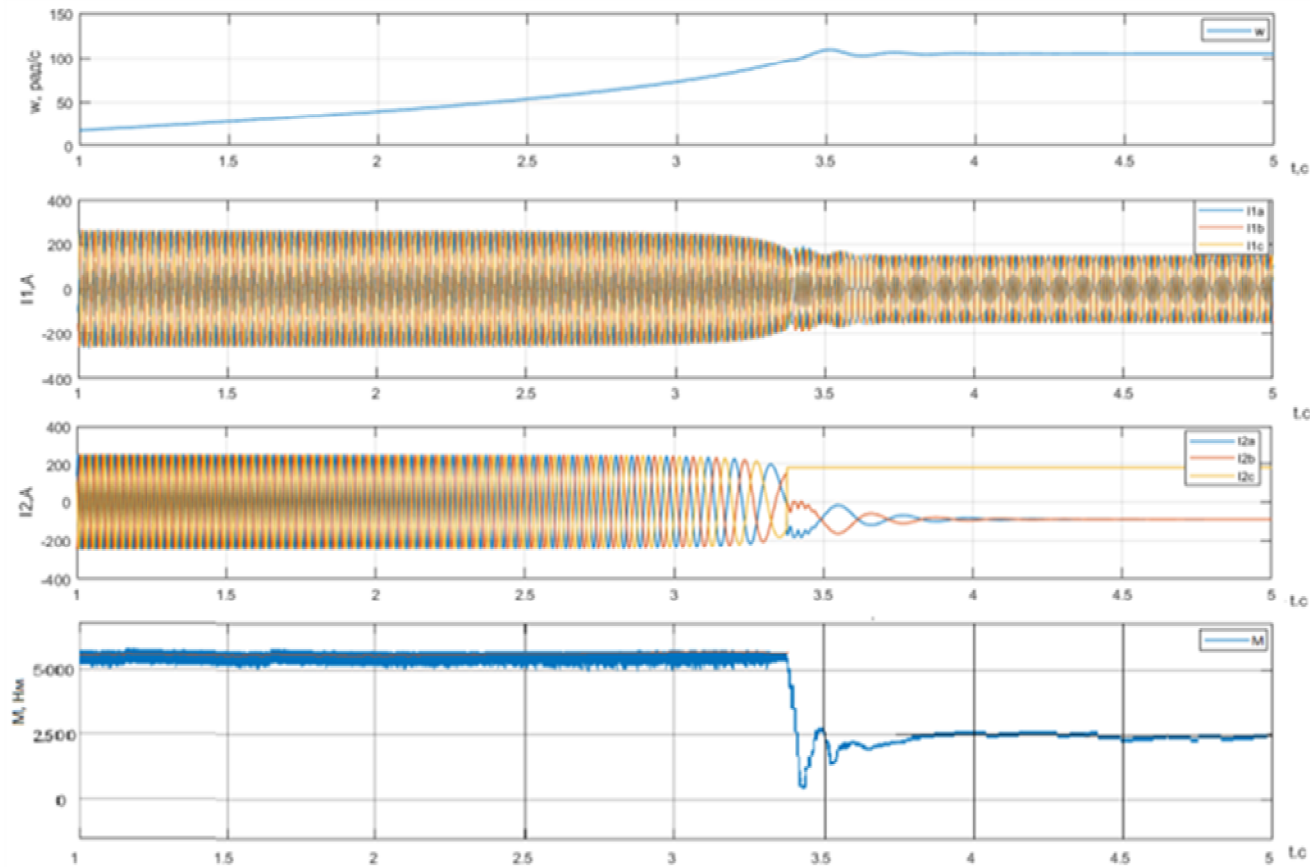


Рисунок 20 – Перехідні процеси в синхронізованому електроприводі при асинхронному пуску та переході в синхронний режим роботи

Входження в синхронізм супроводжується коливаннями струму ротора та незначним перерегулюванням швидкості. Також після входження до синхронізму спостерігається зниження струму статора приблизно на 10%.

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО ТА СИНХРОНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

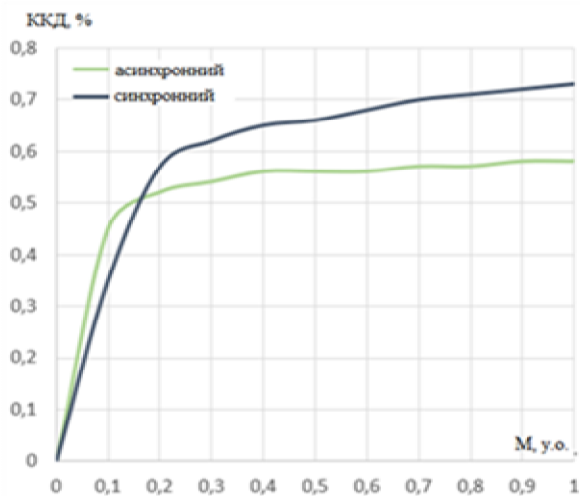


Рисунок 21 – Графік зміни ККД під час пуску в різних режимах

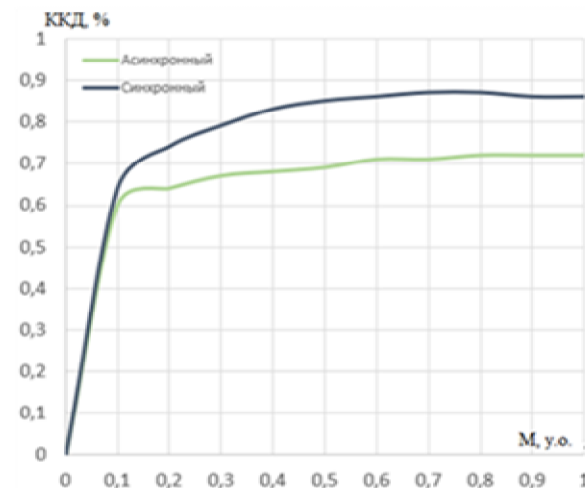


Рисунок 22 – Графік зміни ККД у встановленому режимі роботи в різних режимах

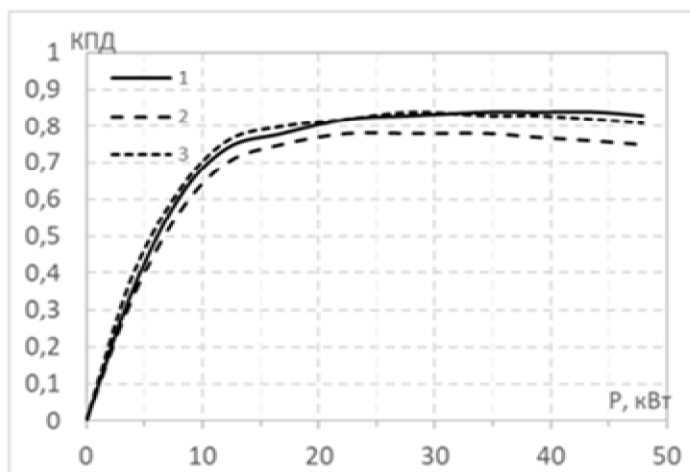


Рисунок 23 – Залежність ККД від потужності

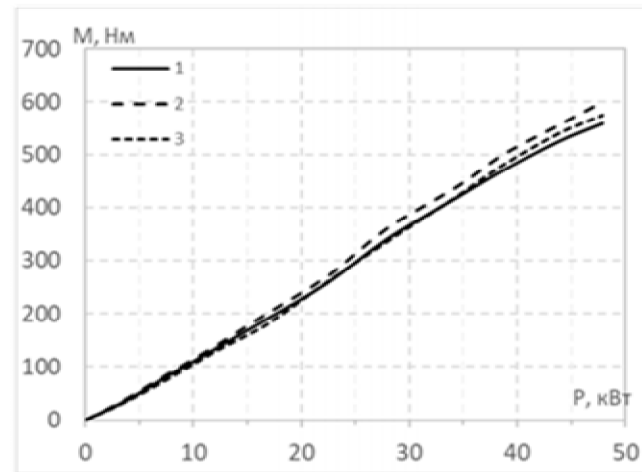


Рисунок 24 – Залежність моменту від потужності

ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

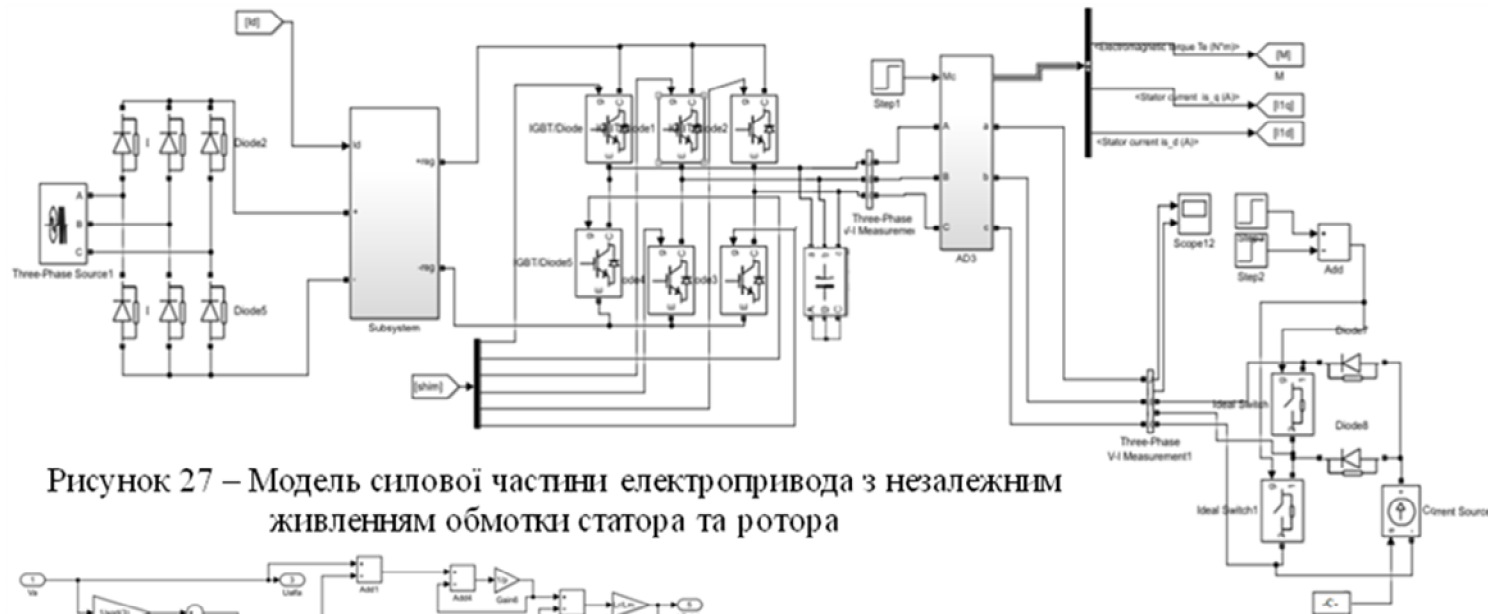


Рисунок 27 – Модель силової частини електропривода з незалежним живленням обмотки статора та ротора

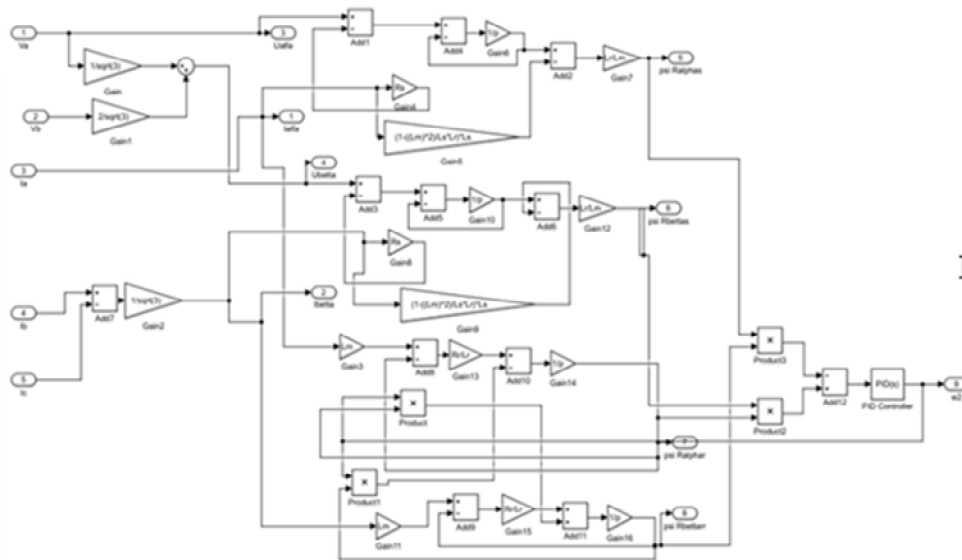
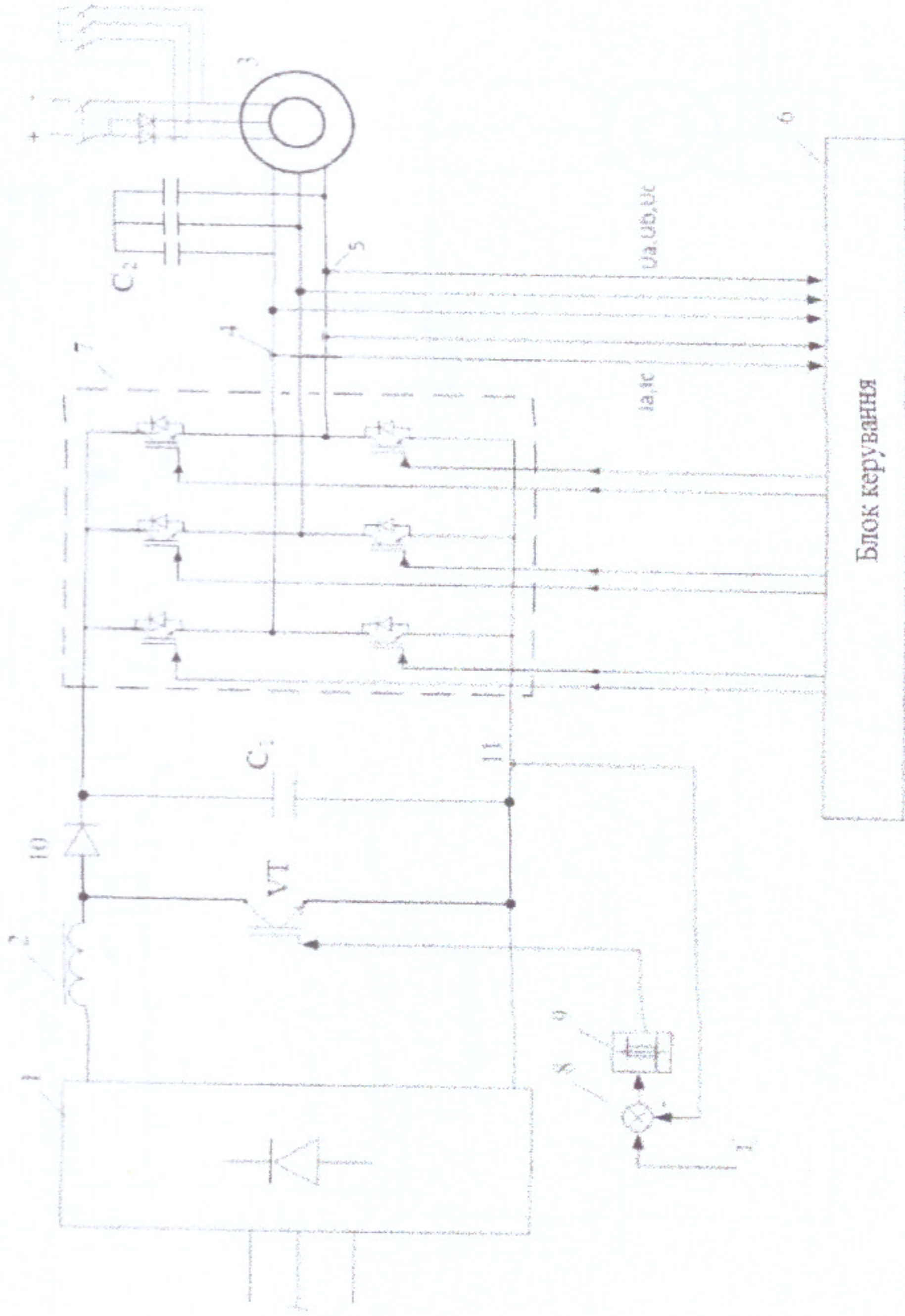


Рисунок 28 – Модель адаптивного спостерігача швидкості

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано існуючі алгоритми та способи управління асинхронним двигуном з фазним ротором, визначено недоліки кожного способу, визначено тенденції розвитку сучасних систем управління.
2. Запропонована математична модель асинхронного двигуна в асинхронному та синхронізованому режимах роботи із порівнянням їх механічних характеристик, виконано математичний опис принципу формування вихідного сигналу автономного інвертора, який дає можливість виконати побудову та моделювання частотно регульованого синхронізованого електроприводу.
3. Розроблено бездатчикову систему управління з адаптивним спостерігачем швидкості асинхронного двигуна, що дозволяє виключити похибку сигналу з датчика швидкості під дією механічних впливів на об'єкт управління і підвищуючим імпульсним перетворювачем в ланці постійного струму для забезпечення енергоефективних режимів функціонування синхронізованого електроприводу.
4. Побудовано систему управління синхронізованим асинхронним електроприводом з незалежним живленням обмоток ротора та імпульсним перетворювачем у ланці постійного струму, що забезпечує знижену кількість комутацій силових транзисторів інвертора за рахунок алгоритму формування струму у ланці постійного струму, що сприяє зменшенню комутаційних втрат.
5. Для порівняльної оцінки розроблених систем управління побудовано робочі характеристики асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором та синхронізованого асинхронного двигуна при регулюванні ступеня навантаження двигуна. За результатами проведених досліджень можна відзначити, що коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна у синхронному режимі роботи вищий у середньому на 5%.
6. 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.
7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

08-24.БДР.009.00.000 ЕЗ



Інв. №	Підпис та дата	На зам. інв.	Інв. №	Підпис та дата

08-24.БДР.009.00.000 ЕЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розробив		Заданюк О.С.	<i>[Signature]</i>	21.11.23
Перевірив		Богачук В.В.	<i>[Signature]</i>	21.11.23
Т. контр.			<i>[Signature]</i>	17.12.23
Н.контр.		Паянок О.А.	<i>[Signature]</i>	28.11.23
Затв.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	28.11.23

Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра. Схема синхронізованого електроприводу з незалежним управлінням кола ротора

Літера	Маса	Масштаб
у		
Аркуш 1	Аркушів	

ВНТУ, гр. ЕПА-22м

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода стрічкового конвеєра

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-22м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Богачук В.В.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність	83,6%
Схожість	16,4%

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.

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Заданюк О.С.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Богачук В.В.

(прізвище, ініціали)