

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА
(ім'я, прізвище)

«05» грудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
тема «Синтез електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-П23мг
(шифр групи)

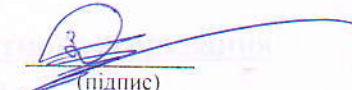
Денис ЗОЗУЛЯ
(ім'я, прізвище)

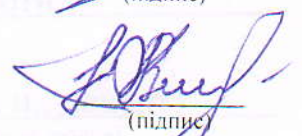
Керівник роботи

ст.н., доц. Юрій ЗАЧЕПА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

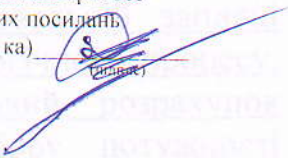
Рецензент роботи

ст.н., проф. Олексій ЧОРНИЙ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) 
(підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІНІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
 Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«08» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Зозуля Денис Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти

керівник роботи Зачепа Юрій Володимирович, к. т. н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-53236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти
5	Розробка електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

Здобувач(ка)

(підпис)

Денис ЗОЗУЛЯ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Юрій ЗАЧЕПА

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

На основі аналізу науково-технічної та патентної літератури щодо досліджень у сфері електромеханічних систем було визначено, що одним із перспективних напрямків удосконалення є підвищення їх енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності під час запуску тягового механізму.

Для більш чіткого опису характеру руху використовувалася 4-х масова схема механічної частини установки, математична модель якої дозволяє досить точно змодельовати рух електромеханічної системи під час пускових режимів. Модель електромеханічної системи, розроблена з використанням пакету програм "Matlab", дозволяє досліджувати пускові режими як у відкритих, так і в закритих системах автоматичного управління при різних значеннях технологічних параметрів механізму.

Отримані результати рекомендують застосування закритих систем управління з оптимальним регулятором напруги, а також використання ступінчатого пуску.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, АСИНХРОННИЙ
ЕЛЕКТРОПРИВІД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СИНТЕЗ

ABSTRACT

Based on the analysis of scientific, technical and patent literature on research in the field of electromechanical systems, it was determined that one of the promising areas of improvement is to increase their energy efficiency and operational reliability during the start-up of the traction mechanism.

For a clearer description of the nature of the movement, a 4-mass scheme of the mechanical part of the installation was used, the mathematical model of which allows for fairly accurate modeling of the movement of the electromechanical system during start-up modes. The model of the electromechanical system, developed using the "Matlab" program package, allows for the study of start-up modes in both open and closed automatic control systems at different values of the technological parameters of the mechanism.

The results obtained recommend the use of closed control systems with an optimal voltage regulator, as well as the use of step start-up.

ELECTROMECHANICAL SYSTEM, ASYNCHRONOUS ELECTRIC
DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, SYNTHESIS

ВСТУП

Використання регульованого електроприводу забезпечує значне енергозбереження при реалізації багатьох технологічних процесів, часто перевищуючи економію енергії, досягнуту безпосередньо в електроприводі. Енергозбереження в системах електроприводу можна досягти не лише на етапі проектування та конструювання, але й під час експлуатації.

Проектування та виготовлення електроприводу повинні відповідати сучасному рівню розвитку теорії та практики, включаючи суміжні наукові дисципліни, такі як електромеханіка, електроніка, автоматизація, механіка та обчислювальні технології. В рамках цього процесу енергозбереження може бути реалізоване через різні методи та засоби.

1. Відомо, що двигун, потужність якого завищена, характеризується низькими енергетичними показниками роботи. З іншого боку, використання двигуна з недостатньою потужністю може призвести до зниження продуктивності технологічного обладнання, перевантаження двигуна та його передчасного виходу з ладу.

2. Особливо важливим є підбір силових елементів електроприводу, які забезпечують мінімальні втрати енергії в процесі роботи. Надзвичайно важливо вибрати двигуни, які надають можливості для впровадження енергозберігаючих рішень, таких як:

- Використання енергозберігаючих двигунів, які завдяки збільшеним об'ємам активних матеріалів (мідь та сталь) знижують втрати потужності щонайменше на 15-20%.

- Використання двигунів зі зменшеним моментом інерції ротора, які демонструють знижений рівень енергетичних втрат під час перехідних процесів. Серед таких варіантів можна відзначити двигуни з подовженим ротором.

Таким чином, системний підхід до вибору та проектування електроприводів забезпечує ефективніше використання енергії та підвищення

продуктивності технологічних процесів. Зниження моменту інерції електроприводу можна досягти, використовуючи два двигуни половинної потужності замість одного при збереженні тієї ж швидкості обертання.

Також важливим є застосування напівпровідникових перетворювачів, які демонструють високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та механічних передач з мінімальними втратами потужності.

Крім того, впровадження регулюючих систем електроприводів, що базуються на парі «перетворювач - двигун», дозволяє реалізувати економічні методи регулювання змінних електроприводів як в усталених, так і в перехідних режимах роботи. Вибір раціональних способів регулювання, які не призводять до додаткових енергетичних втрат, також є важливим аспектом. Наприклад, регулювання швидкості двигунів змінного струму може виконуватися за допомогою напівпровідникових перетворювачів частоти, що сприяє збереженню енергії.

Енергозбереження також може бути досягнуто шляхом правильного технічного обслуговування електроприводів і реалізації заходів з їх модернізації. Технічне обслуговування повинно виконуватися кваліфікованим персоналом згідно з правилами експлуатації електроустановок і включати періодичні огляди, а також профілактичні заходи щодо елементів електропривода. До таких заходів належать змащення підшипників та інших рухомих механічних частин двигуна і механічної передачі, а також очищення колекторів і контактних кілець двигунів.

Особливу увагу слід приділити асинхронним двигунам, оскільки дотримання традиційних вимог до живлення та забезпечення необхідної перевантажувальної спроможності може призвести до значних конструкційних змін та суттєвого покращення їх робочих характеристик. Це відкриває нові горизонти для підвищення ефективності та надійності електроприводів у сучасних технологіях.

Варто зазначити про випуск серії асинхронних двигунів, спроектованих компанією Siemens, призначених для загальнопромислових електроприводів.

Методика проектування таких двигунів змінюється, а їх номенклатура розширюється. Очікується, що нові проекти двигунів для регульованих електроприводів призведуть до різкого зростання їх характеристик, що вимагатиме перегляду вимог до систем управління.

Прогнозується, що частота живлення двигунів у регульованих електроприводах може досягати 500-1000 Гц і більше, при цьому знижується індуктивність обмоток, що сприятиме підвищенню їх ефективності. Також спостерігається зростання випуску електроприводів на основі синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів, відомих як безконтактні вентильні двигуни (ВД) постійного струму. Ці двигуни мають відмінні масо-габаритні характеристики, що робить їх дуже привабливими для використання.

Серед інших типів двигунів слід виділити індукторний двигун (Switch Reluctance Motor), який був розроблений і активно пропонується в останні роки. Розробники стверджують, що його характеристики значно покращені, а в комбінації зі спрощеним силовим перетворювачем це відкриває перспективи для його масового використання. Таким чином, новітні технології в проектуванні та виготовленні електроприводів відкривають нові можливості для їх впровадження в різних галузях промисловості.

1. Аналітичний огляд

1.1 Загальні відомості

Стрічкові конвеєри є найпоширенішим засобом безперервного транспортування, який використовується для переміщення різних насипних і штучних вантажів. Їхні ключові переваги включають простоту обслуговування, широкий діапазон продуктивності та низьку енергоємність, що робить їх ідеальним вибором для багатьох промислових застосувань.

З метою розширення обсягів і сфери використання стрічкових конвеєрів активно вдосконалюються їх конструктивно-технологічні характеристики. У рамках цього розвитку починають впроваджуватися проміжні приводні пристрої, які дозволяють збільшити довжину конвеєрних ліній і, відповідно, зменшити кількість проміжних перевантажень, або навіть повністю їх виключити. Це також сприяє зниженню оборотності стрічки, що підвищує її експлуатаційний термін.

Удосконалення навантажувальних пристроїв, роlikоопор і опорних конструкцій конвеєрних систем, а також розробка нових спеціальних типів стрічкових конвеєрів, таких як стрічково-візкові, сприяють підвищенню ефективності переміщення уламкових вантажів. Використання стрічок з морозостійкої гуми, спеціальних сортів мастил та нових конструкційних матеріалів для зубчастих передач приводу дозволяє розширити область застосування стрічкових конвеєрів, включаючи райони Крайньої Півночі, де екстремальні погодні умови висувають специфічні вимоги до технології транспортування.

В цілому, постійні інновації та вдосконалення технологій забезпечують стрічковим конвеєрам можливість ефективно виконувати свої функції в різних промислових сферах, задовольняючи потреби сучасного виробництва.

Стрічкові конвеєри набули широкого поширення в усіх галузях

промисловості та стали основними агрегатами механізації транспорту в різноманітних секторах, таких як ливарні цехи (де використовуються для подачі та розподілу сировини, а також прибирання відходів), паливоподача на електростанціях, підземний та наземний транспорт вугілля і породи у вугільній промисловості, транспортування руди, коксу та флюсів у металургії, а також перевезення будівельних матеріалів і корисних копалин у кар'єрах, зерна у зерносховищах, піску та каменю при будівництві каналів та гідроелектростанцій.

Стрічкові конвеєри стали незамінними завдяки можливості досягнення високої продуктивності (до 30,000 т/год), значних відстаней транспортування (іноді вони можуть досягати 10-12 км в одному конвеєрі і до 100 км в системах, що складаються з кількох конвеєрів; відомі випадки, коли довжина одного конвеєра перевищувала 50 км). Крім того, вони виготовляються зі складними конструкціями, які забезпечують простоту експлуатації та високу надійність роботи.

Розглядаючи стрічковий конвеєр детальніше, можна відзначити, що його траса в горизонтальній площині є прямолінійною, тоді як у вертикальному вимірі може бути похилою або мати різні складні конфігурації. Тяговий та вантажонесучий орган – це стрічка, яка рухається по стаціонарних роликкоопорах, обхоплюючи приводний, натяжний та іноді відхиляючі барабани. Вантаж переміщається на стрічці разом з нею.

В залежності від типу роликкоопори, стрічка може мати плоску або жолобчасту форму. Плоский стрічковий конвеєр в основному використовується для транспортування штучних вантажів. Необхідне натягнення стрічки забезпечується натяжною станцією, яка зазвичай є вантажною, а в пересувних конвеєрах – гвинтовою. Привід конвеєра (привідна станція) складається з електродвигуна, редуктора, барабана та сполучних муфт.

Завантаження сипучого вантажу на стрічку здійснюється через направляючий лоток або воронку, а розвантаження – через кінцевий барабан або за допомогою плужкового або барабанного скидача. Ширина тканинних стрічок

в конвеєрах коливається від 300 до 3000 мм, а швидкість руху стрічок складає від 1,5 до 6,0 м/с. Короткі пересувні стрічкові конвеєри комплектуються на колісному ході і використовуються в навантажувально-розвантажувальних роботах та при будівництві.

Таким чином, стрічкові конвеєри є невід'ємною частиною сучасних процесів транспортування та забезпечують ефективність роботи в багатьох сферах промисловості.

Стрічковий конвеєр (рис. 1.1) має станину 6, на кінцях якої установлені два барабани: передній 7 - приводної і задній 1 - натяжний. Вертикально замкнута стрічка 5 огинає ці кінцеві барабани і по всій довжині підтримується опорними роликами, які називаються роликкоопори, - верхніми 4 і нижніми 10, укріпленими на станині 6. Іноді замість роликів застосовують настил.

Приводний барабан 7 отримує обертання від приводу 11 і приводить в рух стрічку уздовж траси конвеєра.

Стрічка завантажується через одну або кілька завантажувальних воронок 2, розміщених на конвеєрі. Вантаж, що транспортується переміщається на верхній (вантажонесущій, робочій) гілці стрічки, а нижня гілка є поворотною (зворотною). Можливо також транспортування вантажів одночасно на верхній і нижній гілках стрічки в різних напрямках.

Вантаж вивантажується на передньому барабані 7 через розвантажувальну воронку 8 або в проміжних пунктах конвеєра за допомогою розвантажувальних пристроїв: плужкових 3 або барабанних вивантажувачі. Зовнішня поверхня стрічки очищується від прилиплих до неї часток вантажу очисним пристроєм 9, встановленим у переднього барабана 7.

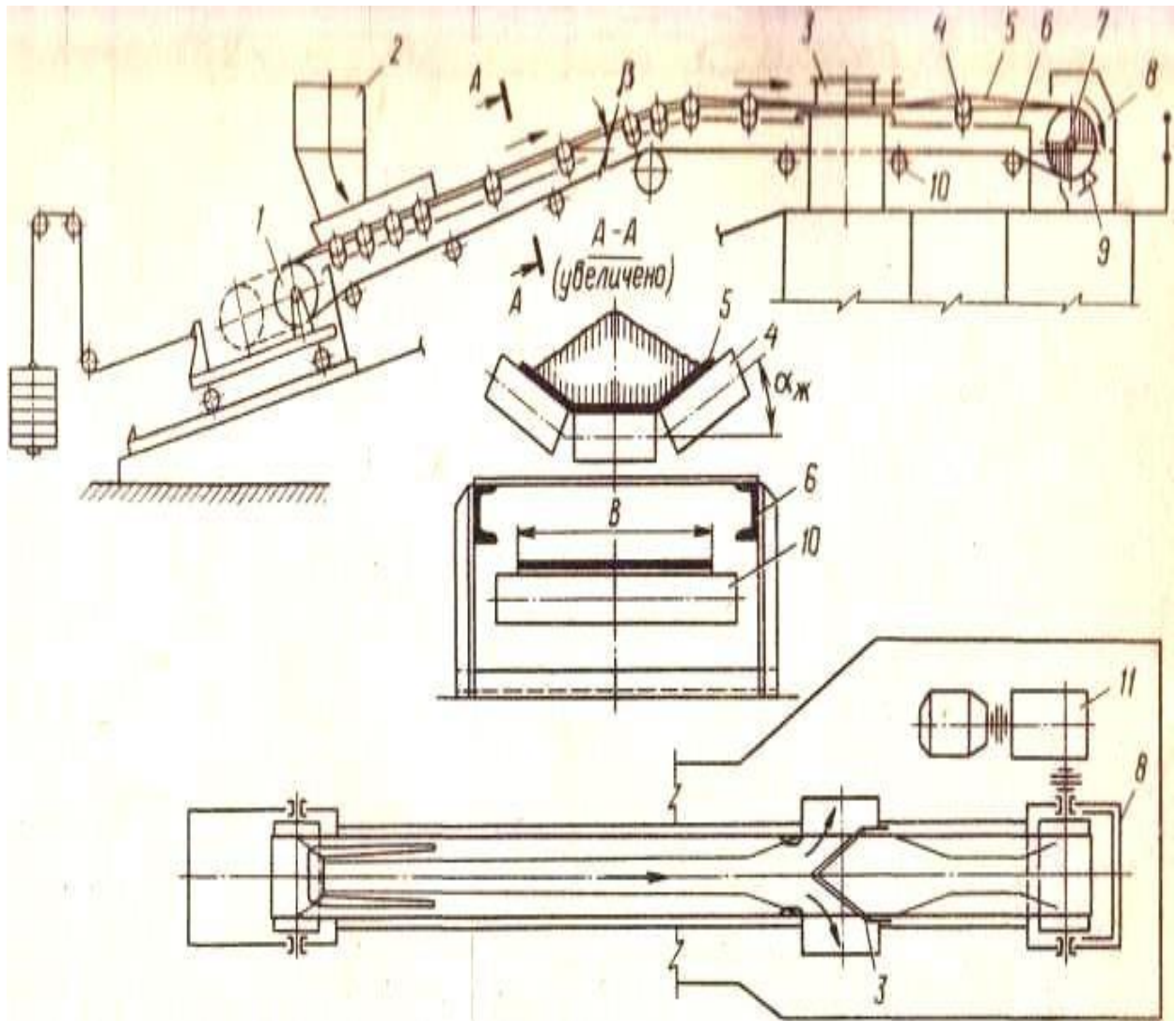


Рисунок 1.1 Схема стрічкового конвеєра

Головні елементи стрічкового конвеєра

Одним із ключових компонентів стрічкового конвеєра є його тяговий елемент, а саме – стрічка. Конвеєрна стрічка повинна мати високу міцність, легку вагу та невелике відносне видовження, а також велику еластичність як в довгих, так і в поперечних напрямках. Вона повинна витримувати зміни навантаження під час багаторазових вигинів на барабанах і роlikоопорах, а також бути стійкою до фізико-хімічних впливів вантажу та оточуючого середовища.

Загалом, стрічка конвеєра (рис. 1.2) має тяговий каркас А, який з усіх боків

покритий еластичним захисним заповнювачем Б. Тяговий каркас сприймає поздовжні натяжні зусилля в стрічці, забезпечуючи її необхідну поперечну жорсткість, а заповнювач захищає каркас від вологи та механічних пошкоджень. Обкладки призначені для захисту тягового каркасу від зносу та пошкоджень.

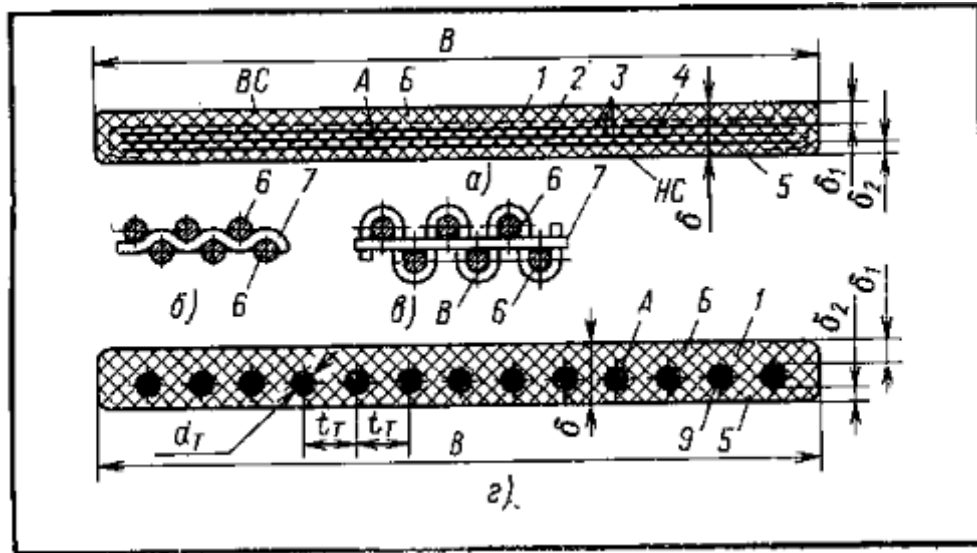


Рисунок 1.2 Стрічка конвеєра: а, б, в - резинотканева з одноосновними (б) і двохосновними (в) прокладками; г – резина тросова; ВС – верхня (вантажонесуча), НС – нижня (опорна) сторони стрічки.

Існує кілька типів тягового каркасу: резинотканеві та резинотросові стрічки. У резинотканевих стрічках тяговим каркасом слугують прокладки 3, виготовлені з різних тканин, які розміщені пошарово з резиновими шарами 4 паралельно один одному вздовж стрічки (рис. 1.2, а). Тканинна прокладка складається з поздовжніх ниток основи 6 та поперечних ниток утка 7, 8 (рис. 1.2, б, в). Сучасні тканинні прокладки виготовляються з капрону, аніду, нейлону, лавсана та інших синтетичних матеріалів. У резинотросових стрічках тяговим каркасом є сталеві троси 9 з латунізованою поверхнею, що забезпечує краще зчеплення з резиною, розташовані в один ряд паралельно один одному вздовж стрічки (рис. 1.2, г)..

Приводний барабан — це барабан приводного механізму (або просто приводу). Залежно від способу передачі тягового зусилля до грузонесучого елемента, він може бути фрикційним (такі барабани передають тягове зусилля за рахунок тертя).

Приводний барабан здійснює рух тягового елемента (стрічки), з'єднаного через передавальний механізм із двигуном. Окрім приводного барабана, існують також барабани, які обертаються від стрічки, а також барабани, що служать для зміни напрямку руху стрічки (натяжні, відхиляючі, направляючі). Барабани відіграють важливу роль у забезпеченні правильного ходу стрічки.

Схему конвеєра можна спростити, якщо кінцевий барабан у місці навантаження виконує функцію натяжного барабана, а барабан, розташований біля місця розвантаження матеріалу, є приводним. Чавун і сталь є основними матеріалами для виготовлення барабанів стрічкових конвеєрів. Чавунні барабани можуть складатися з кількох частин або бути суцільноливними. Краї обода барабана можуть бути стягнуті на конус або мати овальну форму. Обід приводного барабана слід виготовляти циліндричним для кращого зчеплення зі стрічкою. Для відбору металічних предметів з транспортованого вантажу, барабан може бути з'єднано з електромагнітом. Щоб запобігти зісковзуванню стрічки з барабана, його ширина повинна бути на 100-200 мм більшою за ширину стрічки.

1.2 Режими роботи конвеєрних систем

Режими роботи стрічкового конвеєра відображають реалізацію управлінських завдань на основі основних схем управління (групи стрічкових конвеєрів). Аналіз міжнародного досвіду дозволяє виділити дві категорії схем, які мають схожі цілі, але різні методи їх досягнення:

1. Схеми управління стрічковим конвеєром, спрямовані на забезпечення надійності виробничих показників через моніторинг стану основних елементів

конвеєра, при цьому ґрунтується на всебічній інформаційній базі по цих елементах.

2. Стратегічна схема управління стрічковим конвеєром, у якій цілі та завдання формуються відповідно до стратегії підприємства. Важливо, щоб ці цілі мали кількісне вираження. Зазвичай для цього використовуються основні групи показників: надійність, виробничі показники (продуктивність, швидкість транспортування тощо) та рівень витрат.

Аналіз зарубіжного досвіду [4] дозволяє виділити дві основні концепції оцінки та управління надійністю, які базуються на:

- Статистичних даних і нормативних показників;
- Системі ризиків, а також інструментах для їх оцінки та управління.

Перша концепція є традиційною. Багато компаній використовують різні показники надійності, які підлягають нормуванню або стандартизації, як інструменти для оцінки та управління. Програмне забезпечення в даному випадку реалізує механізм збору та моніторингу статистичних даних, що дозволяє виконувати розрахунки та обирати концепцію технічного обслуговування стрічкового конвеєра.

Моніторинг також може включати економічні показники, які відображають ефективність експлуатації конвеєра. Багато компаній обирають саме цей шлях. Значна частина з них протягом тривалого часу займалася оптимізацією системи технічного обслуговування стрічкових конвеєрів і вже мала в своєму розпорядженні значну статистичну базу стану основних вузлів.

Необхідність наявності бази даних є критично важливою, оскільки її відсутність може призвести до серйозних труднощів при формуванні такої інформації для стрічкового конвеєра, що вимагає значних часових та фінансових ресурсів. Під впливом зміни умов експлуатації багато компаній почали оцінювати надійність через систему ризиків, що базується на фізичних ризиках. Концепція ризику в цих підходах тісно пов'язана з поняттям надійності обладнання і його функціональної стійкості. Категорії «ризик» і «надійність»

практично взаємодоповнюють одна одну (висока надійність свідчить про низький ризик і навпаки). Деякі компанії пропонують використовувати інтегральні показники, побудовані на певних співвідношеннях ризику і надійності.

При реалізації даної концепції важливу роль відіграють методи оцінки ризиків та управління ними, серед яких найзначніші — математико-статистичні та суб'єктивні (експертні) методи. Завдяки схемам управління стрічковим конвеєром вирішується ряд важливих управлінських завдань [4]:

- Моніторинг стану основних елементів стрічкового конвеєра;
- Оптимізація технічного обслуговування активів протягом їхнього життєвого циклу;
- Оптимізація рішень для досягнення заданого рівня функціональної стійкості;
- Оптимізація розподілу витрат на технічне обслуговування;
- Аналіз і спостереження за станом основних вузлів конвеєра та фактичними показниками їх роботи з метою удосконалення системи, заміни та реконструкції обладнання, а також розробки планів ремонту та технічного обслуговування;
- Аналіз причин аварій і зупинок (виявлення справжніх причин, а не симптомів);
- Оцінка поточних показників діяльності для забезпечення надійності.

Орієнтація на надійність визначає її як ключовий показник роботи стрічкового конвеєра, при цьому рівень надійності загалом встановлює вимоги до надійності кожного елемента конвеєра.

У разі протяжних стрічкових конвеєрів програма управління кожним вузлом розробляється на основі його надійності та внеску в досягнення основних ключових показників діяльності, зокрема функціональної стійкості [5]. Таким чином, формується програма управління стрічковим конвеєром, здатна забезпечити найефективнішу роботу системи в цілому. Однак програма

управління окремим вузлом може бути далекою від ідеалу, оскільки в цих схемах системи рішень враховують як короткострокові, так і довгострокові цілі.

Вничі компанії, які упроваджують такі схеми, відзначають ряд позитивних тенденцій у своїй діяльності:

- Управління вузлами конвеєра протягом усього життєвого циклу, а не лише на окремих етапах або під час виконання певних операцій;
- Підвищення надійності та зменшення ймовірності збоїв;
- Збільшення ефективності роботи постачальників послуг;
- Комплексний підхід до планування;
- Зниження вартості власного капіталу і продовження терміну служби основних вузлів конвеєра;
- Скорочення запасів;
- Підвищення загальної ефективності;
- Розробка довгострокових планів управління вузлами конвеєра та прогнозування грошових потоків;
- Поява нових можливостей у сфері вимірювання;
- Впровадження процесів і структур, які забезпечують дотримання нормативно-технічних вимог.

Для розрахунку експлуатаційної продуктивності конвеєра, крім хвилинного вантажопотоку, важливо мати дані про максимальний годинний вантажопотік. Відомо, що коефіцієнти нерівномірності коливаються від 1,5 до 3. На основі цих коефіцієнтів можна визначити максимальну годинну продуктивність конвеєра.

Значення коефіцієнта нерівномірності залежить від продуктивності лави і може варіювати в межах від 2,2 до 3,1. Наприклад, при середньогодинному вантажопотоці 200 т/год максимальний видобуток у певні моменти часу може досягати 500-600 т/год. Коефіцієнт нерівномірності змінних вантажопотоків становить від 2 до 2,5. Це означає, що для ефективної роботи необхідно обрати

найбільш потужні транспортні засоби, що може призвести до зростання собівартості транспортування.

Наукове видання Л.Д. Шахмейстера та В.Г. Дмитрієва є детальним посібником для розрахунку стрічкових конвеєрів. У ньому розглядаються такі аспекти, як теорія передачі тягового зусилля фрикційним приводом, нестационарні процеси, розрахунок продуктивності стрічкових конвеєрів, аналіз теоретичних та експериментальних даних різних видів опору, а також аналіз існуючих методик міцного розрахунку стрічок.

Оільки максимальна продуктивність сучасних комбайнів та інших машин, які використовуються в очисних вибоях, може перевищувати середню розрахункову (паспортну) продуктивність в 1,5-2 рази і більше, в окремі часи можливі збільшені темпи видобутку й надходження вугілля з лави. Це призводить до значних «пікових» навантажень на транспортні засоби, спричинених великою продуктивністю вугледобувних машин та агрегатів. Тому транспортні засоби повинні мати достатні резерви пропускної здатності, які, у поєднанні з акумулюючими ємностями, забезпечать безперервну роботу всіх вибоїв під час змін, включаючи періоди «піку», а також рівномірну видачу вугілля на поверхню для ритмічної роботи шахти.

Продуктивність видобувних комбайнів залежить від багатьох факторів, включаючи технічні, технологічні, організаційні та геологічні аспекти. Наприклад, у залежності від роботи підземного транспорту, нерівномірність вантажопотоку може посилюватись або, навпаки, згладжуватись. Водночас конвеєри, проєктовані на максимум продуктивності виїмкових машин, в багатьох випадках працюють з неповним завантаженням або взагалі в холосту. Це підтверджено численними хронометражними спостереженнями, проведеними МІРГЕМом, ДонУГІ, ІГД ім. О.О. Скочинського, Карагандагіпрошахтом та КНІУІ [17].

Недостатнє завантаження конвеєрів призводить до того, що значна частина енергії витрачається на холостий хід, тобто на знос деталей. Частка енергії,

споживаної на транспортування вантажу, залежить від повноти завантаження вантажонесучого полотна, що визначається співвідношенням ваги вантажу до вантажонесучого полотна. Не враховуючи опір на кінцевих поворотних пристроях і різницю між коефіцієнтами опору руху завантаженої та порожньої гілок для горизонтального конвеєра, можна визначити частку енергії, необхідної для транспортування вантажу [17].

Постачання конвеєрів з приводом, що дозволяє регулювати швидкість руху вантажонесучого полотна в залежності від фактичного надходження вантажу, забезпечує повне завантаження конвеєрів навіть при нерівномірних вантажопотоках. Це дозволяє досягти найнижчого коефіцієнта витрат енергії на холостий хід, завдяки безступінчастому регулюванню швидкості, яке може бути практично рівним проектному значенню. Отже, ключовим параметром для автоматичного регулювання продуктивності конвеєрів на транспортних лініях з нерівномірними вантажопотоками є швидкість руху вантажонесучого полотна при постійному рівномірному завантаженні.

Засоби автоматизації та конструкція конвеєрів повинні бути надійними в експлуатації та відповідати на кілька порядків більшій надійності автоматизованого конвеєрного комплексу, а також мати добру ремонтну здатність.

Усі конвеєри в лінії повинні бути оснащені датчиками швидкості руху вантажонесучого полотна і датчиками наявності вантажу для автоматичного керування роботою розгалуженої конвеєрної лінії.

Оскільки ступінь надійності різко знижується при ускладненні схем, а вартість транспортування вантажу зростає, є необхідність значно спростити існуючі схеми конвеєрного транспорту й зосередити вантажопотоки на гірничовидобувних підприємствах. Складні транспортні схеми, що не підлягають спрощенню, повинні бути розділені на окремі транспортні (конвеєрні) комплекси.

Сигнал та команда про включення конвеєрів повинні подаватися

проміжним датчиком, який активується при досягненні певної кількості вантажу в ємності. У місцях з'єднання транспортних (конвеєрних) комплексів слід передбачити компенсуючі ємності, які забезпечать роботу з номінальною продуктивністю конвеєрів, що транспортують вантаж від бункерів.

Після вимушеної зупинки одного з конвеєрів, конвеєри, що подавали вантаж на нього, повинні включатися в зворотному порядку з певною затримкою. Необхідно забезпечити автоматичний вибір маршруту і послідовність включення конвеєрів, оскільки вантаж просувається по лінії, із попередженням про підготовку наступного конвеєра до запуску.

Усі конвеєри, що подають вантаж на лінію, повинні негайно зупинятися у разі вимушеної зупинки одного з конвеєрів лінії.

Дотримання цих технічних і технологічних вимог дозволить перейти до автоматичного регулювання та управління окремими конвеєрними комплексами. З підвищенням надійності механізації та засобів автоматизації можна досягти інтеграції в єдиний автоматичний транспортний комплекс для гірничодобувного підприємства, що забезпечить значний техніко-економічний ефект.

Висновки

Транспортні машини безперервної дії, зокрема стрічкові конвеєри з постійною швидкістю руху вантажонесучого полотна, мають відносно низьку енергетичну ефективність. Підвищення ефективності використання відповідних режимів роботи таких машин є актуальною проблемою в галузі конвеєробудування.

Проведений огляд досліджень щодо енергозбереження в електромеханічних системах автоматизації виявив, що більшість робіт зосереджуються на втраті електричної енергії в електродвигунах (електромеханічних перетворювачах). Проте, не береться до уваги вплив режиму роботи технологічного об'єкта та електродвигуна на енергетичні параметри електромеханічної системи в цілому. Для повної оцінки енергетичної

ефективності робочих режимів важливо розглядати систему електропривода і технологічний об'єкт як єдину електромеханічну систему.

Отже, однією з основних задач цієї роботи є розробка оптимального закону управління асинхронним електроприводом транспортної системи безперервної дії з точки зору енергозбереження.

2. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Вимоги, пред'явлені до електроприводу

Основним призначенням привода стрічкового конвеєра є передача необхідного тягового зусилля та забезпечення нормального руху конвеєрної стрічки при всіх режимах роботи. Зазвичай розрізняють три режими: пуск, усталений рух і гальмування конвеєра.

Ці вимоги обумовлені наявністю значних інерційних мас. При раптовому прикладенні моменту виникають додаткові динамічні навантаження, які викликають механічні коливання в тяговому органі. Під час пуску довгих конвеєрів можливий режим, при якому вантажна гілка досягає номінальної швидкості, тоді як холоста гілка лише починає рух. Електропривод повинен гасити ці коливання й забезпечувати узгоджену роботу механічної та електричної частини.

Керування пуском і гальмуванням з метою зменшення енергозатрат, витрат на транспортування вантажів та матеріалів є головним завданням автоматизації конвеєрних ліній. Необхідна така система автоматичного керування, яка стабілізуватиме погонне навантаження конвеєра, регулюючи швидкість робочого органу.

Досвід конвеєробудування як вітчизняній, так і закордонній практиці показує, що одним з найбільш перспективних напрямків є використання частотного керування на основі асинхронних електродвигунів, що забезпечує плавне регулювання швидкості конвеєрної стрічки. На великою кількістю довгих конвеєрів використовується нерегульований асинхронний електропривід, який має недоліки, такі як складний пуск, проковзування конвеєрної стрічки та ударні навантаження в приводі. Це призводить до підвищеного зношування обладнання і значних витрат електроенергії при неповному завантаженні та роботі конвеєра на холостому ході. Щоб підвищити економічну та експлуатаційну ефективність,

необхідно узгодити режими роботи і параметри стрічкового конвеєра з реальним вантажопотоком.

Регулювання швидкості конвеєра в залежності від вантажопотоку дозволяє досягти оптимальних енергетичних показників електропривода, а також збільшити термін служби вантажонесучого органу, редуктора і роликів. Отже, використання частотно-регульованого електропривода конвеєра забезпечує максимальну економію електроенергії при транспортуванні вантажу із змінним вантажопотоком. Плавний пуск конвеєра є також важливою складовою. Додатковою особливістю частотно-регульованих електроприводів є необхідність використання асинхронних двигунів (АД) з примусовим охолодженням, які повинні зберігати умови охолодження під час керування кутовою швидкістю нижче номінальної.

При реалізації запропонованої системи керування можна досягти підвищення ефективності роботи конвеєра за рахунок покращення надійності, збільшення ресурсу та терміну служби технологічного обладнання, а також суттєвого зниження витрат електроенергії на транспортування вантажу завдяки оптимізації навантажень.

Виходячи з проведеного аналізу (розділ 1.2), одним з найбільш відповідальних режимів роботи магістрального стрічкового конвеєра є пуск його тягового органу. Цей режим характеризується підвищеним зносом дорогої конвеєрної стрічки та високим рівнем споживання електроенергії.

Отже, важливим напрямком дослідження систем неперервного транспорту є зменшення енергетичних коливань та підвищення експлуатаційної надійності як механічних, так і електричних вузлів механізму. Таким чином, метою даної роботи є визначення рівня підвищення енергетичної ефективності електромеханічної системи стрічкових конвеєрів за рахунок зниження втрат енергії в пускових режимах.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно виконати наступні кроки:

1. Створення та дослідження комплексної моделі руху системи

взаємопов'язаних електромеханічних елементів стрічкового конвеєра. Модель повинна дозволити досліджувати режими роботи при різних варіаціях навантаження та тривалості пуску тягового органа для випадків замкнутих і розімкнутого автоматичного керування.

2. Розробка моделі електромеханічної системи з використанням оптимального регулятора напруги. Це дозволить забезпечити більш ефективне управління в процесі роботи конвеєра.

3. Проведення дослідження режимів роботи стрічкового конвеєра та визначення рівнів підвищення енергетичних параметрів електромеханічної системи конвеєра як для прямого, так і для ступінчатого пуску тягового органа.

4. Визначення найбільш раціональних режимів пуску магістральних стрічкових конвеєрів з точки зору підвищення енергетичної ефективності. Це допоможе зменшити енергетичні витрати та покращити загальну продуктивність системи.

Ці кроки сприятимуть досягненню основної мети — підвищенню енергетичної ефективності електромеханічної системи стрічкових конвеєрів.

Висновки

Конвеєри, які використовуються в промисловості, можуть бути експлуатовані в різних кліматичних умовах, що включає як екстремально низькі, так і високі температури, а також в умовах підвищеної вологості або сухості повітря. Додатково, вони можуть працювати в забрудненій атмосфері, де на них впливають різноманітні агресивні речовини. В особливих випадках, конвеєри можуть бути експлуатовані в середовищах, де існує ризик виникнення іскор або вибухів, що вимагає особливої уваги до безпеки.

З метою забезпечення надійної і ефективної роботи конвеєрних систем, електродвигуни та інше електрообладнання повинні бути сконструйовані з урахуванням специфічних вимог робочого середовища, в яких вони будуть використовуватись. Це включає в себе використання матеріалів і компонентів,

які стійкі до дії зовнішніх факторів та забруднень, а також відповідність певним стандартам безпеки.

У даному розділі були визначені конкретні вимоги до продуктивної роботи конвеєра, що дозволяє оптимізувати його функціональність, а також забезпечити економію електроенергії під час роботи в різних режимах. Чітко сформульовано задачі, які потребують дослідження, і запропоновані методи для їх ефективного вирішення, що дозволяє досягти поставлених цілей щодо підвищення ефективності та зменшення витрат на електроенергію.

3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Синтез замкнутої системи керування

Для ефективного вирішення поставлених задач критично важливо розробити синтез замкнутої системи автоматичного керування. Ця система повинна бути спроектована таким чином, щоб мати можливість комплексно управляти електромеханічною системою в різних режимах її роботи, включаючи як динамічні, так і статичні.

У динамічному режимі система керування повинна адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, реагуючи на миттєві зміни навантаження, швидкості і інших параметрів, що можуть вплинути на продуктивність конвеєра. Це потребує використання сучасних алгоритмів контролю, які надають змогу реалізувати швидку і точну реакцію на зміни.

У статичному режимі, коли система працює стабільно і без значних коливань, автоматичне керування повинно забезпечити підтримання оптимальних робочих умов, що включає контроль над витратами електроенергії та температурними параметрами. Це допоможе знизити енергетичні витрати і підвищити ефективність роботи системи.

Системи автоматичного керування також повинні бути інтегровані з сучасними технологіями моніторингу та діагностики, що дозволить виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях та здійснювати профілактичне обслуговування. В результаті, синтезоване рішення забезпечить стабільну, безпечну та економічну експлуатацію електромеханічної системи.

Типовий електромеханічний перетворювач описується аперіодичною ланкою першого порядку [35]. Рівняння механічної характеристики електромеханічного перетворювача має вигляд:

$$(1 + T_c p)M = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (3.1)$$

де $\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_{0n} \cdot S_k}$ – модуль жорсткості механічної характеристики;

$T_e = \frac{1}{\omega_{0n} \cdot S_k}$ – електромагнітна постійна двигуна.

На рисунку 3.1 представлено структурну схему асинхронного електромеханічного перетворювача, яка була лінеаризована в межах робочого відрізка статичної механічної характеристики. Така лінеаризація дозволяє спростити аналіз та проектування системи автоматичного керування, оскільки вона перетворює нелінійні відносини в прості лінійні моделі, які легше піддаються математичному опису.

Структурна схема демонструє ключові елементи перетворювача, включаючи електродвигун, механічні компоненти та систему керування. Завдяки лінеаризації стає можливим більш точне прогнозування поведінки системи у заданих робочих умовах, що в свою чергу сприяє оптимізації її продуктивності.

Дослідження статичної механічної характеристики дозволяє зрозуміти, як зміна навантаження впливає на роботу електромеханічного перетворювача. Важливо відзначити, що така структурна схема є основою для подальшого розроблення автоматизованих систем, які здатні ефективно управляти електромеханічними системами в реальному часі, а також адаптуватися до змін навантаження і інших зовнішніх факторів.

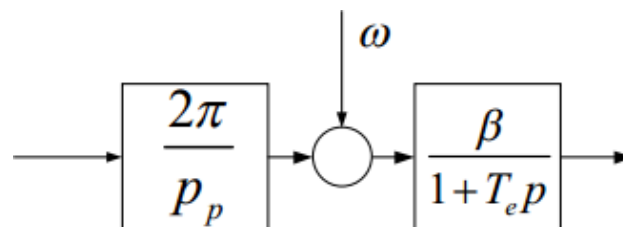


Рисунок 3.1 – Структурна схема електромеханічного перетворювача

Чим більшу потужність має двигун, тим значення S_k менше.

Електромагнітна постійна двигуна T_e при живленні від джерела напруги буде дорівнювати:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0n} \cdot S_k} = \frac{1}{314 \cdot 0,059} = 0,054 \text{ с.}$$

Знехтувавши електромагнітною інерцією та виходячи з умов, що механічний час затримки (T_m) значно перевищує електричний час затримки (T_e) (тобто ($T_m \gg T_e$)), ми можемо перейти до спрощеного аналізу системи. Виходячи з цього, ми отримаємо структурну схему двигуна, в якій механічна частина описується через відповідні рівняння.

На рисунку 3.2 представлено цю структурну схему двигуна, яка враховує механічні характеристики, при цьому електромагнітні явища можна ігнорувати для спрощення моделювання. Це дозволяє зосередитися на механічних аспектах роботи електродвигуна, таких як момент, швидкість обертання та навантаження.

Схема на рисунку 3.2 відображає ключові елементи механічної частини двигуна, що дозволяє більш детально аналізувати його динаміку в умовах, коли електричні ефекти є непомітними на фоні механічних. Завдяки такому підходу можна забезпечити більш точне управління та оптимізацію роботи системи в різноманітних робочих режимах, що є важливим для досягнення високої ефективності та стабільності роботи електромеханічного перетворювача.

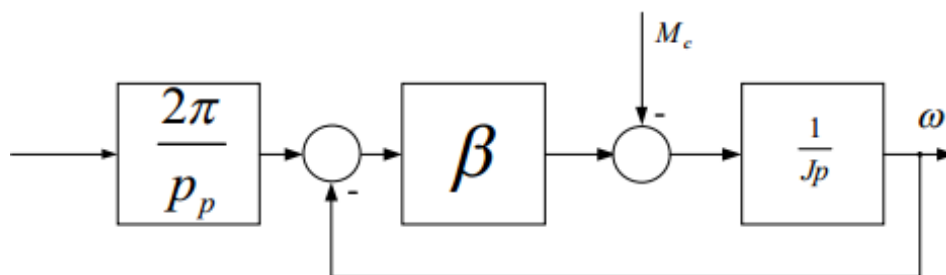


Рисунок 3.2 – Структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Тоді замкнена система керування швидкістю асинхронного

електродвигуна з короткозамкненим ротором без врахування статичного моменту буде мати вигляд:

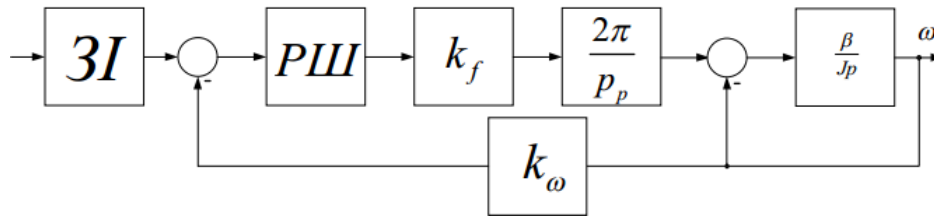


Рисунок 3.3 – Структурна схема замкненої системи керування за швидкістю асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Для синтезу регулятора швидкості схему (рис. 3.2) слід привести до одно контурного вигляду, зробивши певні перетворення:

$$\omega = \frac{\frac{\beta}{J \cdot p}}{1 + \frac{\beta}{J \cdot p}} = \frac{1}{\frac{J}{\beta} \cdot p + 1}. \quad (3.2)$$

Перетворимо схему щоб зв'язок по швидкості набув одиничного вигляду. Передатна функція розімкненої системи матиме вигляд:

$$\omega_p = \frac{2\pi \cdot k_f}{p_p} \cdot \frac{1}{\frac{J}{\beta} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_\mu \cdot p + 1}. \quad (3.3)$$

Враховувавши інерційність каналу регулювання частотою, вводимо ланку $\frac{1}{T_\mu \cdot p + 1}$, де $T_\mu = T_e$ – мала постійна часу.

Отримаємо перетворену структурну схему, яка наведена на рисунку 3.4.

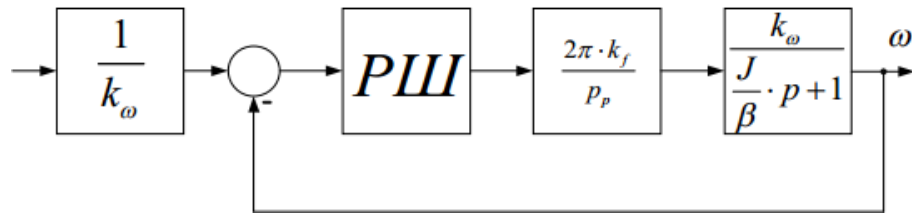


Рисунок 3.4 – Перетворена структурна схема

Систему налаштуємо на технічний оптимум тому приймаємо перехідну функцію:

$$W_{\delta} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{\mu} \cdot p + 1} \quad (3.4)$$

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W_{pш} = \frac{W_{\delta}}{W_p} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{\mu} \cdot p + 1} \cdot \frac{p_p}{2\pi \cdot k_f} \cdot \frac{\left(\frac{J}{\beta} \cdot p + 1\right) \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}{k_{\omega}}, \quad (3.5)$$

$$W_{pш} = \frac{T_1 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p}, \quad (3.6)$$

$$T_1 = \frac{J}{\beta}; \quad (3.7)$$

$$T_2 = \frac{W_{\delta}}{W_p} = \frac{4\pi \cdot T_{\mu} \cdot k_f \cdot k_{\omega}}{p_p}. \quad (3.8)$$

3.2 Розробка функціональної схеми замкненої системи стрічкового конвеєра

Враховуючи обрану систему електропривода та специфіку роботи стрічкових магістральних конвеєрів, як у пускових, так і в усталених режимах, була розроблена функціональна схема замкнутої електромеханічної системи, представлена на рисунку 3.1 [14].

Ця схема надає можливість детально оцінити характер зміни енергетичних втрат під час запуску конвеєра, що критично важливо для оптимізації роботи системи в умовах змінних технологічних параметрів. Дослідження енергетичних втрат дозволить виявити можливі шляхи для їх зменшення, а також підвищення загальної ефективності електропривода.

Додатково, запропонована схема може бути використана для аналізу двох різних варіантів роботи системи: перший — у випадку присутності зворотного зв'язку по швидкості, що формує замкнуту систему автоматичного керування (САК), і другий — у разі відсутності такого зворотного зв'язку, що призводить до розімкнутої системи автоматичного керування.

Цей підхід дає змогу дослідити, як зміни в швидкості впливають на енергетичні втрати, і встановити ефективність роботи системи в обох сценаріях, що є важливим для подальшої оптимізації роботи стрічкових конвеєрів у промисловості.

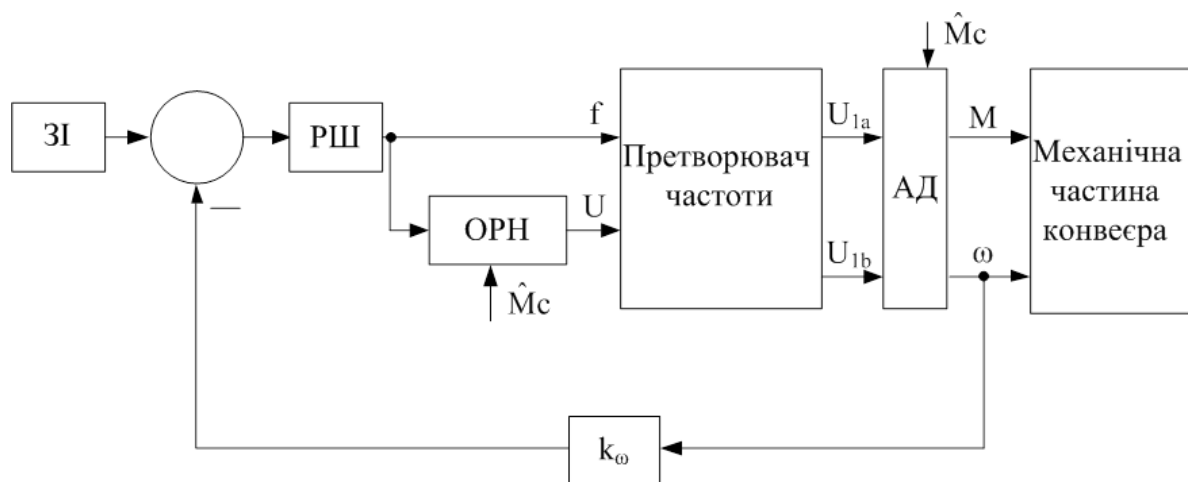


Рисунок 3.1 – Функціональна схема електромеханічної системи

В схемі прийняті наступні позначення:

3I — задатчик інтенсивності; РШ — регулятор швидкості; ОРН — оптимальний регулятор напруги.

Асинхронні двигуни (АД) описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь в нерухомій системі координат статора a-b [23].

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \quad (3.9)$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega p_n \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \quad (3.10)$$

$$\frac{d\psi_{2a}}{dt} = -\alpha \psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \quad (3.11)$$

$$\frac{d\psi_{2b}}{dt} = -\alpha \psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \quad (3.12)$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \quad (3.13)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{AB}), \quad (3.14)$$

де $(i_{1a}, i_{1b})^T, (u_{1a}, u_{1b})^T, (\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора; M – електромагнітний момент; M_{AB} – момент навантаження; ω – кутова швидкість; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру; p_n – кількість пар полюсів, J – повний момент інерції.

Додані константи з виразів, визначаються наступним чином:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \sigma = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}{L_2}; \quad (3.15), (3.16)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}; \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta, \quad (3.17), (3.18)$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора та ротора.

Перетворювач частоти працює за законом керування $u/f = \text{const}$.

Розрахунок ПІ-регулятор швидкості та коефіцієнт зворотного зв'язку:

$$T_1 = \frac{J_\Sigma}{\beta}. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт β розраховується наступним чином:

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot S_k} = \frac{2 \cdot 986,1}{314,159 \cdot 0,059} = 106,4. \\ T_2 &= \frac{4 \cdot \pi \cdot T_\mu \cdot k_f \cdot k_\omega}{P}, \\ T_\mu &= T_e = \frac{1}{\omega_n \cdot S_k} = \frac{1}{314,159 \cdot 0,059} = 0,0539 \\ k_f &= \frac{f_{ном}}{U_3} = \frac{50}{10} = 5. \\ k_\omega &= \frac{U_3}{\omega_{ном}} = \frac{10}{314,156} = 0,032. \\ T_2 &= \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,0539 \cdot 5 \cdot 0,032}{1} = 0,108.\end{aligned}\tag{3.20}$$

Висновки

На аналізі режимів роботи об'єкта, враховуючи поставлені задачі, була розроблена функціональна схема, яка може бути ефективно використана для керування конвеєром під час пуску тягового органу. Ця схема демонструє, як здійснювати контроль і управління процесом запуску, що є критично важливим для забезпечення плавного та безпечного пуску конвеєрної системи.

Для проведення порівняльного аналізу енергетичних характеристик, ця функціональна схема має можливість працювати як у замкнутому, так і в розімкнутому стані. У замкнутому стані система забезпечує зворотний зв'язок, що дозволяє точно контролювати швидкість та інші параметри роботи конвеєра, а також знижувати енергетичні втрати в процесі пуску. Це сприяє загальному підвищенню ефективності роботи електропривода.

У розімкнутому стані система, хоч і не має зворотного зв'язку, також може бути корисна для аналізу основних енергетичних характеристик, які можуть

вказати на потенційні недоліки в системі або області для вдосконалення. Порівнюючи результати роботи в обох режимах, можна оптимізувати процеси управління та визначити найбільш ефективні стратегії для роботи конвеєра в різних умовах експлуатації.

Загалом, розроблена функціональна схема є потужним інструментом для аналізу і керування роботою конвеєрів, сприяючи підвищенню їх ефективності та надійності.

4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Розробка моделі електропривода на основі трьохфазного двигуна

Специфічними умовами експлуатації електрообладнання на гірничих підприємствах, електроприводи постійного струму практично не використовуються в якості приводів для стрічкових конвеєрів. Згідно з світовим досвідом, більшість експлуатованих конвеєрних установок забезпечені електроприводами, що використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим та фазним ротором.

Однією з важливих переваг частотно-регульованого електропривода є можливість плавного регулювання швидкості руху стрічки конвеєра та моменту, який передається на приводний барабан. Це забезпечує більш точний контроль за технологічними процесами, підвищуючи загальну ефективність роботи конвеєрної системи. Крім того, дані системи характеризуються такими перевагами, як простота експлуатації та висока надійність, що робить їх особливо привабливими для умов гірничодобувної промисловості.

Зважаючи на те, що асинхронні двигуни є багатofазними електричними машинами, і в процесі їх аналізу кількість рівнянь електричної рівноваги зростає зі збільшенням числа фаз, для спрощення математичного моделювання ми будемо використовувати еквівалентну двохфазну модель машини [36, 37]. Цей підхід дозволить зменшити складність аналізу, зберігаючи при цьому адекватність моделі для практичних застосувань в умовах гірничих підприємств. Таким чином, еквівалентна двохфазна модель стане корисним інструментом для подальшого дослідження та оптимізації роботи асинхронних електродвигунів.

На рисунку 4.1 показано узагальнену схему дво полюсної машини.

На рисунку 4.1 використані наступні позначення:

U_{1a} , U_{1b} – напруги прикладені до обмотки статора;

U_{2d}, U_{2q} – напруги прикладені до обмотки ротора;

$\vartheta = p \cdot \varphi$ – електричний кут повороту ротора;

φ – геометричний кут повороту ротора;

p – число пар полюсів.

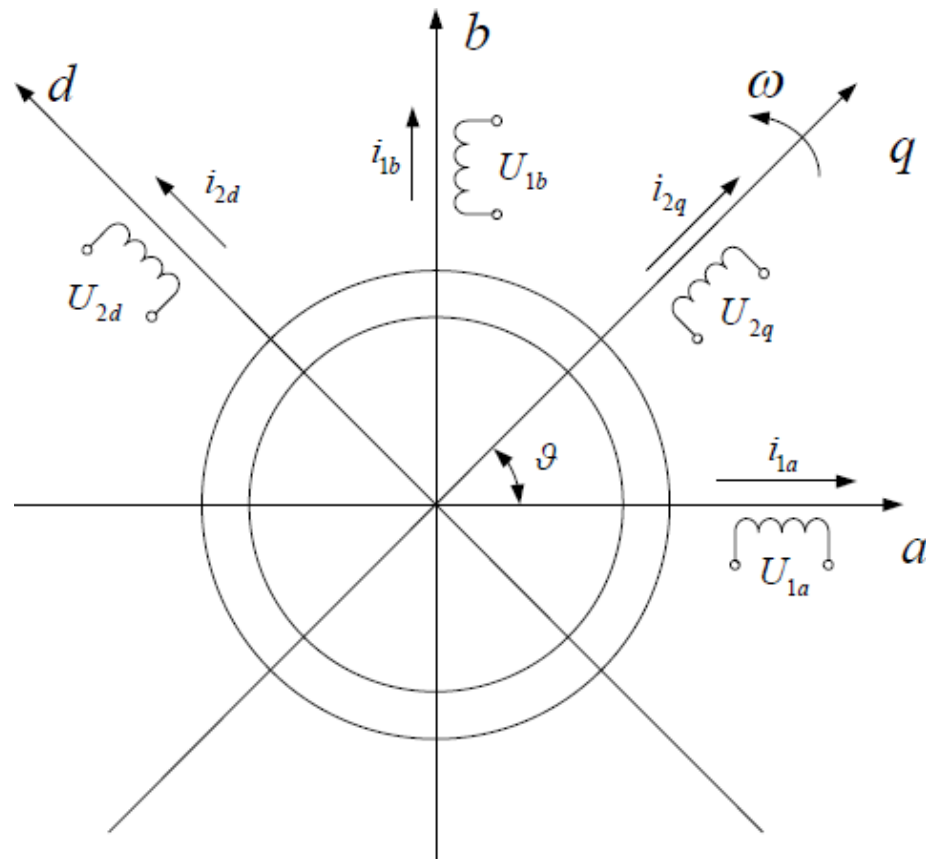


Рисунок 4.1. Узагальнена схема двополюсної машини

У процесі вирішення завдання перетворення, кожна реальна змінна електродвигуна — напруга, струм, потокозчеплення — моделюється у вигляді вектора [34]. Напрямок цього вектора визначається віссю координат, що відповідає конкретній обмотці, будь то статор або ротор. Для статора встановлено жорстко прив'язану ортогональну систему координат з осями (a – b), тоді як для ротора використовується система координат (d – q), що відображає його вектори координат.

Уся розрахункова інформація представляється у системі координат (u – v),

яка обертається відносно нерухомого статора з певною кутовою швидкістю. Це дозволяє врахувати динаміку роботи машини та зручніше реалізувати аналіз зміни параметрів двигуна.

Перетворення реальних змінних з систем координат $(a - b)$ або $(d - q)$ у розрахункові $(u - v)$ і навпаки здійснюється через проекцію векторів змінних на відповідні осі, що ґрунтується на відомих геометричних закономірностях. Використання цього методу дозволяє зберігати точність розрахунків і полегшує моделювання динаміки електродвигунів.

Таким чином, формалізація опису векторних змінних у різних системах координат дає змогу реалізувати більш складні аналітичні та чисельні методи, що підвищує ефективність дослідження і проектування електромеханічних систем.

Перехід до системи координат $(a - b)$ здійснюється за умови $u = a, v = b, \omega_c = 0$.

Перетворені рівняння для струмів, потокозчеплень і похідних потокозчеплень мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left(U_{1\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\alpha} \right) \\ i_{1\beta} &= \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left(U_{1\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\beta} \right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \psi_{2\alpha} &= \frac{1}{p + \alpha} (L_{12} \alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ст}} \psi_{2\beta}) \\ \psi_{2\beta} &= \frac{1}{p + \alpha} (L_{12} \alpha i_{1\beta} - \omega_{\text{ст}} \psi_{2\alpha}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} p \psi_{2\alpha} &= L_{12} \alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ст}} \psi_{2\beta} - \alpha \psi_{2\alpha} \\ p \psi_{2\beta} &= L_{12} \alpha i_{1\beta} + \omega_{\text{ст}} \psi_{2\alpha} - \alpha \psi_{2\beta} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Момент двигуна в координатах статора $(a - b)$ дорівнює:

$$M = \frac{3}{2} P_n \frac{L_{12}}{L_2} (i_{1\beta} \psi_{2\alpha} - i_{1\alpha} \psi_{2\beta}) \quad (4.4)$$

Структурна схема моделі АД в координатах статора (a – b) представлена на рисунку 4.2.

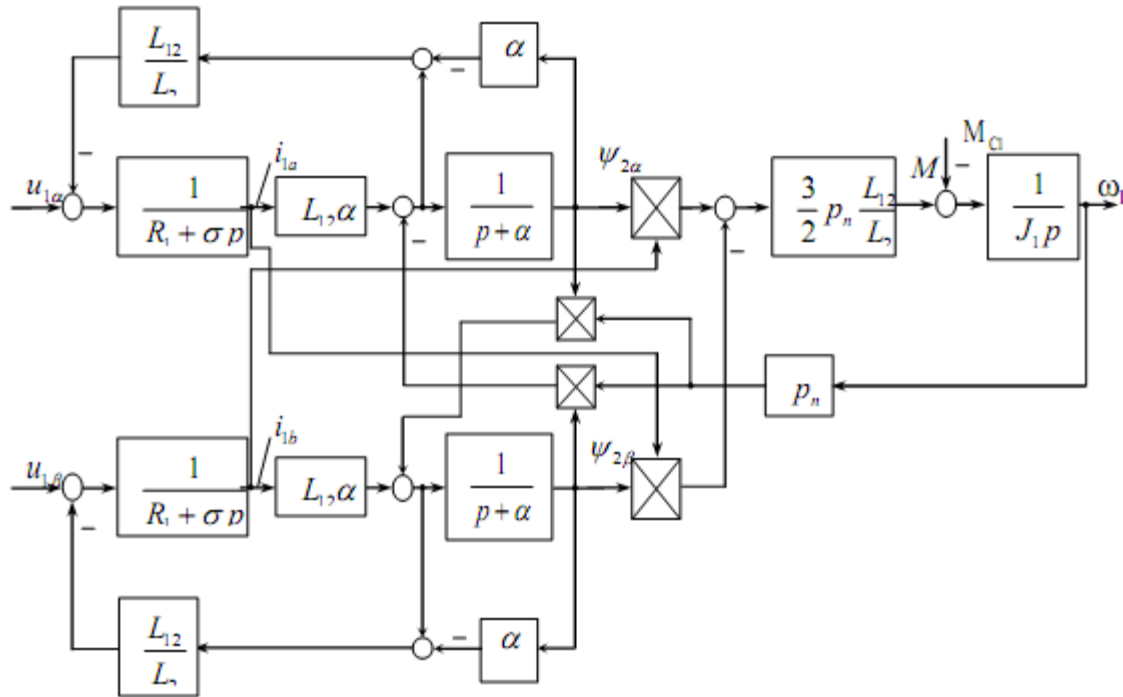


Рисунок 4.2 – Структурна схема двофазової моделі асинхронного двигуна в системі координат статора (a-b)

На схемі прийнято наступні позначення:

u_{1a}, u_{1b} - проекції вектора напруги статора на осі a і b;

i_{1a}, i_{1b} - проекція вектора струму статора на осі a і b;

Ψ_{2a}, Ψ_{2b} - проекція вектора потокозчеплення ротора на осі a і b;

R_1 - активний опір статорної обмотки;

$\alpha = \frac{R'_{2\Sigma}}{L_2}$ - відношення сумарного опору роторного кола, приведенного до статора, і індуктивності роторної обмотки;

L_{12} - взаємна індуктивність обмоток статора і ротора;

p_n - кількість пар полюсів;

$\mathfrak{J}_\Sigma$ - сумарний приведений до валу двигуна момент інерції установки;

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2}; \quad (4.5)$$

L_1 - індуктивність статорної обмотки, L_2 - індуктивність роторної обмотки.

σ - параметр динамічної моделі.

$$R_{2\Sigma}^{\cdot} = R_2^{\cdot} + R_q^{\cdot}, \quad (4.6)$$

де $R_2^{\cdot}$ - опір ротора, приведений до статора, $R_q^{\cdot}$ - додатковий опір, приведений до статора.

$$L_{12} = \frac{x_{12}}{2\pi f}, \quad (4.7)$$

де x_{12} - індуктивний опір кола намагнічування; f - частота мережі живлення.

$$L_1 = \frac{x_1 + x_{12}}{2\pi f}, \quad (4.8)$$

де x_1 - індуктивний опір обмотки статора.

$$L_2 = \frac{x_2^{\cdot} + x_{12}}{2\pi f}, \quad (4.9)$$

де $x_2^{\cdot}$ - індуктивний опір обмотки ротора.

4.2 Розробка моделі перетворювача частоти

Перетворювачі частоти, використовувані в частотно-регульованих електроприводах, виконують важливу функцію перетворення електроенергії, яка надходить з мережі змінного струму, в електроенергію зі змінною частотою та напругою, що відповідає заданим умовам роботи. Це дозволяє точно контролювати швидкість і момент обертання електродвигуна, покращуючи ефективність його роботи.

У дволанковому перетворювачі частоти перша ланка є випрямлячем, що перетворює змінний струм у постійний, після чого на виході встановлено фільтр для згладжування пульсацій випрямленого струму. Друга ланка представлена автономним інвертором, який перетворює постійний струм знову в змінний, з можливістю регулювання частоти і напруги відповідно до вимог конкретного навантаження.

Принципове побудування перетворювача частоти на основі автономного інвертора напруги (АІН) ілюструється на рисунку 4.3. Дана схема демонструє, як взаємодіють обидві ланки, а також як здійснюється процес управління та регулювання в широкому діапазоні частот. Завдяки такій конструкції, перетворювачі частоти можуть забезпечити високу ефективність, надійність та енергоефективність у роботі з асинхронними і синхронними електродвигунами в різних промислових застосуваннях.

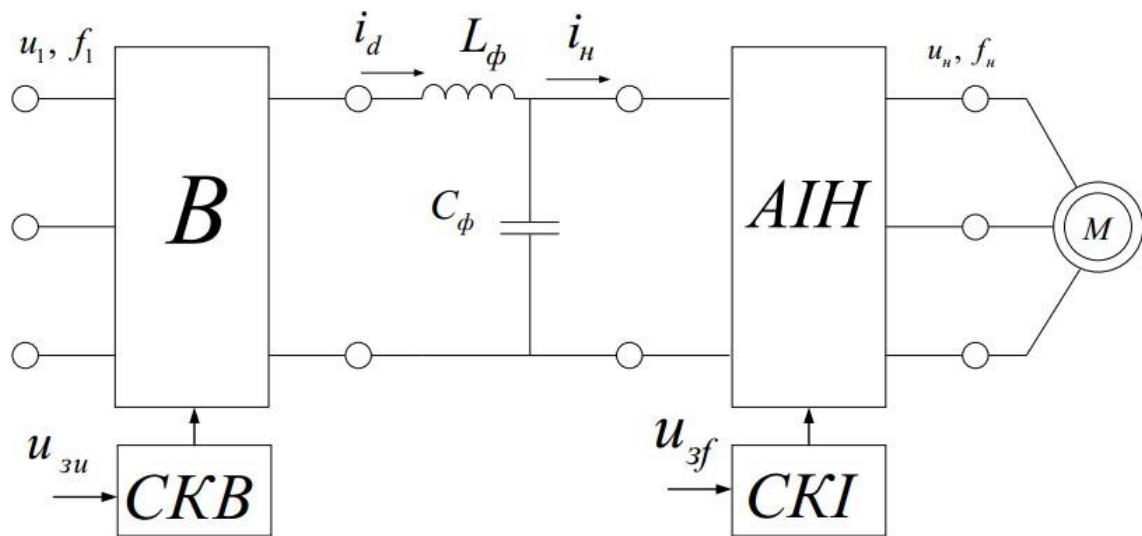


Рис. 4.3 Функціональна схема перетворювача частоти на основі АІН, який працює на двигун змінного струму

На схемі прийняті наступні позначення:

В – випрямляч; АІН – автономний інвертор напруги; М – електрична машина; СКВ, СКІ – системи керування випрямлячем та автономним інвертором. Зазвичай згладжувальним фільтром є Г-подібний LC – фільтр.

В каналі керування частотою будемо використовувати без інерційну ланку. В каналі керування напругою використаємо аперіодичну ланку. При цьому $\alpha = R_2' / L_2$ [31].

Структурна схема частотного перетворювача [10] представлена на рис. 4.4.

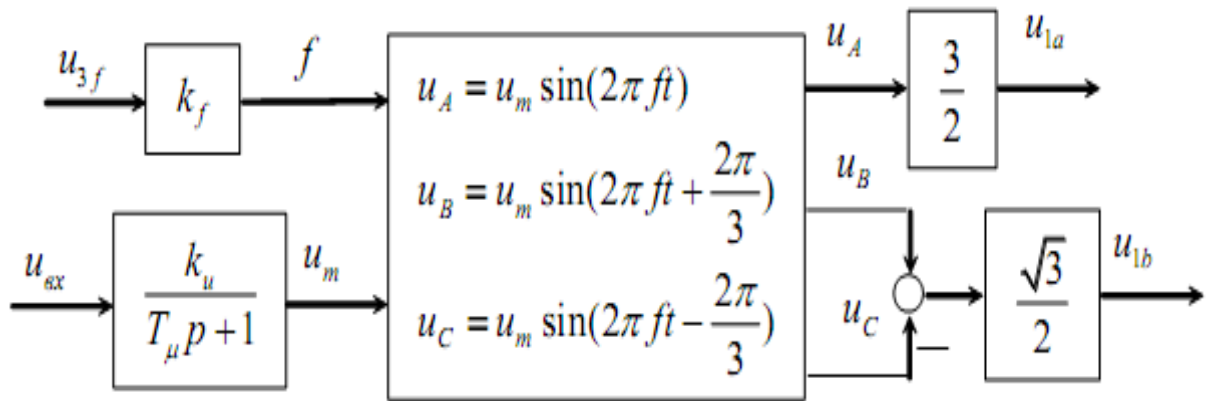


Рисунок 4.4 – Структурна схема частотного перетворювача

На рисунку прийняті наступні позначення:

u_m - амплітуда напруги;

t - час;

u_A, u_B, u_C - фазні напруги статора;

u_{1a}, u_{1b} - проекції вектора напруги статора на осі а-в системи координат статора;

k_f - коефіцієнт передачі по частоті; k_u - коефіцієнт передачі по амплітуді;

T_μ - мала стала часу.

$$k_f = \frac{f_H}{u_{3f \max}} = \frac{f_H}{10}, \quad k_u = \frac{u_{m \max}}{u_{3u \max}} = \frac{\sqrt{2}u_H}{10} \quad (4.10), (4.11)$$

Структурна схема асинхронного електропривода з частотним керуванням представлена на рисунку 4.5.

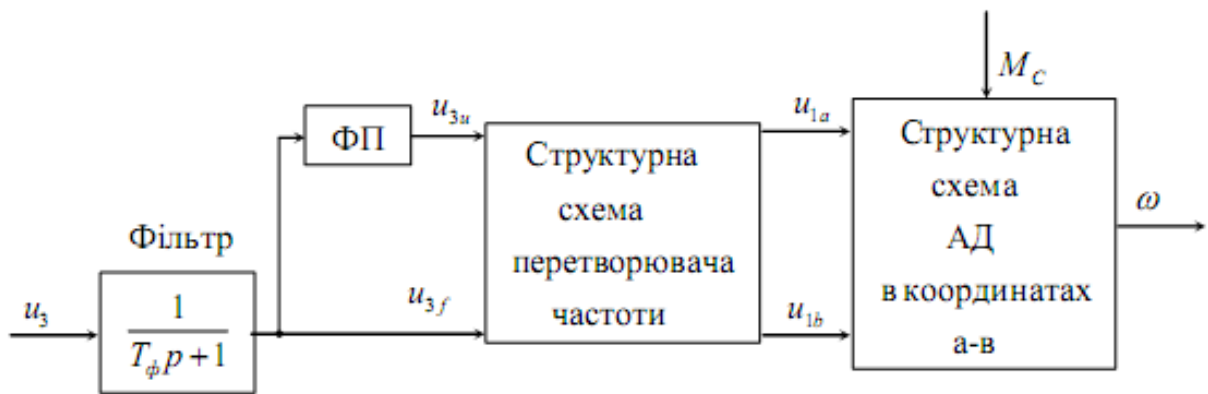


Рисунок 4.5 – Структурна схема асинхронного електропривода з частотним керуванням

Для забезпечення плавності пуску використовують аперіодичний фільтр (T_ϕ - стала часу фільтра). Функціональний перетворювач реалізує котрусь з

залежностей $\frac{u_1}{f} = const$, $\frac{u_1^2}{f} = const$ або $\frac{u_1}{f^2} = const$. При моделюванні необхідно обмежувати величини u_{3u} і u_{3f} за допомогою ланок типу Saturation. В даній роботі перетворювач частоти працює за законом керування $\frac{u}{f} = const$.

4.3 Розробка моделі механічної частини конвеєра

В основі побудови математичної моделі покладено метод Лагранжа другого роду [24]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} T \right) - \left(\frac{\partial}{\partial q_i} T \right) + \frac{\partial}{\partial q_i} \Pi + \frac{\partial}{\partial q_i} A = 0, \quad (4.12)$$

де $i=1,2,\dots,6$.

Виділимо з ділянки стрічки $X_1..X_2$ елементарну ділянку dz на відстані z від початку підрахунку. Швидкість переміщення елементарної ділянки v , $\dot{X}_1 > v > \dot{X}_2$.

$$\frac{\dot{X}_1 - v}{z} = \frac{\dot{X}_i - \dot{X}_j}{l} \quad (4.13)$$

Виразимо v :

$$v = \dot{X}_1 - \frac{\dot{X}_i - \dot{X}_j}{l} z \quad (4.14)$$

Кінетична енергія елементарної ділянки dz , довжиною l :

$$dT = \frac{G_{ij} \cdot v^2}{g \cdot 2} dz \quad (4.15)$$

Підставивши v у (2.40) отримаємо:

$$dT = \frac{G_{ij}}{2g} \left(\dot{X}_1 - \frac{\dot{X}_i - \dot{X}_j}{l} z \right)^2 dz \quad (4.16)$$

Проінтегрувавши вираз від 0 до l отримаємо значення кінетичної енергії для розподілених мас кожної ділянки:

$$T_{ij} = \int_0^l \left(\dot{X}_1 - \frac{\dot{X}_i - \dot{X}_j}{l} z \right)^2 dz = \frac{G_{ij} l}{6g} (\dot{X}_i^2 + \dot{X}_i \cdot \dot{X}_j + \dot{X}_j^2), \quad (4.17)$$

де G_{ij} – вага стрічки, обертових частин роlikоопор та вантажу на ділянці ij ; g – прискорення вільного падіння.

Часткові похідні кінетичної енергії по швидкості узагальнених координат:

$$\frac{d}{dt} T = \frac{\partial}{\partial \dot{X}_i} (\dot{X}_i^2 + \dot{X}_i \cdot \dot{X}_j + \dot{X}_j^2) = \frac{G_{ij} l}{6g} (2\dot{X}_i + \dot{X}_j) \quad (4.18)$$

Знайдемо похідні за часом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{X}_i} T \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{G_{ij} l}{6g} (2\dot{X}_i + \dot{X}_j) \right) = \frac{G_{ij} l}{6g} \frac{d}{dt} (2\dot{X}_i + \dot{X}_j) = \frac{G_{ij} l}{6g} (2\ddot{X}_i + \ddot{X}_j). \quad (4.19)$$

Потенціальна енергія ділянки ij довжиною l_{ij} включає в себе енергію пружних деформацій, а також потенційну енергію замкнутого контуру стрічки з розподіленою масою.

$$P_{ij} = C_{ij} \frac{(X_i + X_j)^2}{2} + G_{ij} l_{ij} \frac{X_i + X_j}{2} \sin \beta, \quad (4.20)$$

де C_{ij} – жорсткість ділянки, β – кут нахилу конвеєра до горизонту.

Робота зовнішніх сил на ділянці ij визначається з виразу:

$$A_{ij} = G_{ij} l_{ij} w \frac{X_i + X_j}{2} \cos \beta, \quad (4.21)$$

де w – коефіцієнт опору руху.

Робота сил внутрішнього тертя на ділянці ij визначається припущенням, що сили внутрішнього тертя пропорційні швидкостям деформації:

$$A_{ij} = \frac{\eta}{2} \left[(\dot{X}_i - \dot{X}_{i+1})(X_i - X_{i+1}) + (\dot{X}_i - \dot{X}_{i-1})(X_i - X_{i-1}) \right], \quad (4.22)$$

де η – коефіцієнт в'язкості стрічки.

В основу моделі механічної частини покладена 4-х масова розрахункова схема[10], в якій:

m_1 - маса приводного барабану

m_2 - маса вантажної гілки

m_3 - маса натяжного барабану

m_4 - маса холостої гілки

X_1 - положення 1 маси

X_2 - положення 2 маси

X_3 - положення 3 маси

X_4 - положення 4 маси

$\dot{X}_1$ - швидкість 1 маси

$\dot{X}_2$ - швидкість 2 маси

$\dot{X}_3$ - швидкість 3 маси

$\dot{X}_4$ - швидкість 4 маси

δ - положення натяжного вантажу

$\dot{\delta}$ - швидкість натяжного вантажу

Рух конвеєра описується наступними десятима координатами стану:

$$X = (X_1, X_2, X_3, X_4, \dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3, \dot{X}_4, \delta, \dot{\delta})^T \quad (4.23)$$

Кінетична енергія системи для цієї розрахункової схеми включає в себе кінетичну енергію (ТК) замкненого контуру стрічки з рівномірно розподіленим вантажем на верхній частині, а також кінетичну енергію (ТП) привідного механізму та (ТН) натяжного пристрою.

Кінетична енергія контуру стрічки:

$$T_K = \frac{G_{сан} l}{6g} (\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_2 + \dot{X}_2^2) + \frac{G_{сан} l}{6g} (\dot{X}_2^2 + \dot{X}_2 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2) + \frac{G_{нор} l}{6g} (\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_4 + \dot{X}_4^2) + \frac{G_{нор} l}{6g} (\dot{X}_4^2 + \dot{X}_4 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2). \quad (4.24)$$

Кінетична енергія привідного пристрою:

$$T_{\Pi} = \frac{m_{np}}{2} \dot{X}_1^2, \quad (4.25)$$

де m_{np} – маси обертаючих частин електродвигуна, редуктора, муфт та привідного барабану.

Кінетична енергія натяжного пристрою:

$$T_H = \frac{G_{нн} \dot{\delta}^2}{2g}, \quad (4.26)$$

де $G_{нн} \dot{\delta}$ – вага та швидкість переміщення натяжного пристрою.

Сумуючи отримані вирази отримаємо вираз для повної ТΣ кінетичної енергії системи:

$$T_{\Sigma} = \frac{G_{сан} l}{6g} (\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_2 + \dot{X}_2^2) + \frac{G_{сан} l}{6g} (\dot{X}_2^2 + \dot{X}_2 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2) + \frac{G_{нор} l}{6g} (\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_4 + \dot{X}_4^2) + \frac{G_{нор} l}{6g} (\dot{X}_4^2 + \dot{X}_4 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2) + \frac{m_{н1}}{2} \dot{X}_1^2 + \frac{G_{нн} \dot{\delta}^2}{2g}. \quad (4.27)$$

Похідні за часом від часткових похідних кінетичної енергії для кожної узагальненої координати:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{X}_1} T_{\Sigma} \right) &= \frac{G_{\text{ван}} l}{6g} (2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_2) + \frac{G_{\text{нор}} l}{6g} (2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_4) + m_{\text{нр}} \ddot{X}_1 \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{X}_2} T_{\Sigma} \right) &= \frac{G_{\text{ван}} l}{6g} (2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_3) + \frac{G_{\text{ван}} l}{6g} (2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_1) \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{X}_3} T_{\Sigma} \right) &= \frac{G_{\text{ван}} l}{6g} (2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_2) + \frac{G_{\text{нор}} l}{6g} (2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_4) \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{X}_4} T_{\Sigma} \right) &= \frac{G_{\text{нор}} l}{6g} (2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_3) + \frac{G_{\text{нор}} l}{6g} (2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_1) \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\delta}} T_{\Sigma} \right) &= \frac{G_{\text{нн}}}{g} \dot{\delta}
\end{aligned} \tag{4.28}$$

Потенціальна енергія пружної деформації системи складається з енергії конвеєрної стрічки (Π_K) та канатів натяжного пристрою (Π_H):

$$\Pi_K = \frac{(X_1 - X_2)^2 C_1}{2} + \frac{(X_2 - X_3)^2 C_2}{2} + \frac{(X_4 - X_1)^2 C_1'}{2} + \frac{(X_3 - X_4)^2 C_2'}{2}, \tag{4.29}$$

де C_1, C_2, C_1', C_2' – коефіцієнти жорсткості ділянок конвеєра.

Припустимо, що $C_1 = C_2 = C_1' = C_2' = C$, отримаємо

$$\Pi_K = \frac{(X_1 - X_2)^2 C}{2} + \frac{(X_2 - X_3)^2 C}{2} + \frac{(X_4 - X_1)^2 C}{2} + \frac{(X_3 - X_4)^2 C}{2}, \tag{4.30}$$

де C – коефіцієнти жорсткості кожної ділянки конвеєра.

Отже, потенціальна енергія канатів натяжного пристрою матиме вигляд:

$$\Pi_H = 0.5 \left(\frac{(X_3 - X_4)}{2 - \delta} \right)^2 C_{\kappa}, \tag{4.31}$$

де C_{κ} – коефіцієнт жорсткості канату.

Потенціальна енергія положення натяжного вантажу:

$$\Pi_B = G_{\text{вт}} \delta. \tag{4.32}$$

Часкові похідні по узагальненим координатам від потенціальної енергії:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial X_1} \Pi &= \frac{(2X_1 - 2X_2)C}{2} + \frac{(2X_1 - 2X_4)C}{2} = (X_1 - X_2)C + (X_1 - X_4)C \\
\frac{\partial}{\partial X_2} \Pi &= \frac{(2X_1 - 2X_2)C}{2} + \frac{(2X_1 - 2X_4)C}{2} = (X_1 - X_2)C + (X_1 - X_4)C \\
\frac{\partial}{\partial X_3} \Pi &= \frac{(2X_3 - 2X_2)C}{2} + \frac{(2X_3 - 2X_4)C}{2} + \frac{X_3 - X_4}{4} C_k - \frac{\delta}{2} C_k = \\
&= (X_3 - X_2)C + (X_3 - X_4)C + 0.25X_3C_k - 0.25X_4C_k - 0.5\delta C_k \\
\frac{\partial}{\partial X_4} \Pi &= \frac{(2X_4 - 2X_3)C}{2} + \frac{(2X_3 - 2X_1)C}{2} + \frac{X_3 - X_4}{4} C_k + \frac{\delta}{2} C_k = \\
&= (X_4 - X_3)C + (X_4 - X_1)C + 0.25X_4C_k - 0.25X_3C_k + 0.5\delta C_k \\
\frac{\partial}{\partial \delta} \Pi &= -0.5X_3C_k + 0.5X_4C_k + \delta C_k - G_{nn}
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Робота зовнішніх сил складається з роботи рушійної сили приводу, сил опору руху віток стрічки та натяжних вантажів, а також сили гальмування.

Робота рушійної сили приводу:

$$A_{np} = -\frac{M_{np}}{R_b} X_1, \tag{4.34}$$

де M_{np} – момент двигуна, який приведений до валу приводного барабану; R_b – радіус приводного барабану.

Робота сил опору руху віток стрічки:

$$A_K = G_{san} l w' \frac{(X_1 + X_2)}{2} + G_{san} l w' \frac{(X_2 + X_3)}{2} + G_{nop} l w'' \frac{(X_1 + X_4)}{2} + G_{san} l w' \frac{(X_4 + X_3)}{2}, \tag{4.35}$$

де w', w'' – коефіцієнти опору руху завантаженої та порожньої віток. Надалі w', w'' приймаємо рівними.

Сили опору руху ділянок W_i завжди направлені протилежно швидкості X_i цих ділянок, тобто $W_i = G_i l_i w \cdot \text{sgn } \dot{X}_i$,

$$\text{sgn } x = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \tag{4.36}$$

Робота сили опору руху натяжних вантажів представлена наступною формулою:

$$A_n = \pm G_{нп} f \delta, \quad (4.37)$$

де f – приведений коефіцієнт опору руху натяжних вантажів.

Часткові похідні за узагальненими координатами роботи сил опору руху:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X_1} A &= -\frac{M_{нп1}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1) + \frac{1}{2} G_{ван} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_1 + \frac{1}{2} G_{нор} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_1 \\ \frac{\partial}{\partial X_2} A &= \frac{1}{2} G_{ван} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_2 + \frac{1}{2} G_{ван} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_2 = G_{ван} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_2 \\ \frac{\partial}{\partial X_3} A &= \frac{1}{2} G_{ван} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_3 + \frac{1}{2} G_{нор} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_3 \\ \frac{\partial}{\partial X_4} A &= \frac{1}{2} G_{нор} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_4 + \frac{1}{2} G_{нор} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_4 = G_{нор} l w \operatorname{sgn} \dot{X}_4 \\ \frac{\partial}{\partial \delta} A &= G_{нор} f \operatorname{sgn} \dot{\delta} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Робота сил внутрішнього тертя у замкнутому контурі:

$$\begin{aligned} A_B &= (\dot{X}_1 - \dot{X}_2)(X_1 - X_2)\eta + (\dot{X}_2 - \dot{X}_3)(X_2 - X_3)\eta + \\ &+ (\dot{X}_3 - \dot{X}_4)(X_3 - X_4)\eta + (\dot{X}_4 - \dot{X}_1)(X_4 - X_1)\eta, \end{aligned} \quad (4.39)$$

де η – приведений коефіцієнт в'язкості.

Часткові похідні по координатам роботи сил внутрішнього тертя:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial X_1} A_B &= (\dot{X}_1 - \dot{X}_2)\eta + (\dot{X}_1 - \dot{X}_4)\eta \\
\frac{\partial}{\partial X_2} A_B &= (\dot{X}_2 - \dot{X}_3)\eta + (\dot{X}_2 - \dot{X}_3)\eta \\
\frac{\partial}{\partial X_3} A_B &= (\dot{X}_3 - \dot{X}_4)\eta + (\dot{X}_3 - \dot{X}_2)\eta \\
\frac{\partial}{\partial X_4} A_B &= (\dot{X}_4 - \dot{X}_1)\eta + (\dot{X}_4 - \dot{X}_3)\eta \\
\frac{\partial}{\partial \delta} A_B &= 0
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Склавши похідні за часом від часткових похідних кінетичної енергії, потенціальної енергії деформації стрічки, роботи сил опору руху, сил внутрішнього тертя та роботи рушійної сили привода, було отримано систему диференціальних рівнянь.

Введемо позначення $\frac{G_{ван} l}{6g} = m_{ван}$, $\frac{G_{нор} l}{6g} = m_{нор}$ – маси вантажної та порожньої ділянки стрічки конвеєра.

Отримаємо математичну модель конвеєра, яка являє собою систему з чотирьох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{aligned}
&m_s(2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_2) + m_n(2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_4) + m_{np}\ddot{X}_1 + (2X_1 - X_2 - X_4)C + \\
&0,5(G_{ван} + G_{нор})lws\text{gn}\dot{X}_1 + (2\dot{X}_1 - \dot{X}_2 - \dot{X}_4)\eta = \frac{M_{np}}{R_\delta}\text{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1)
\end{aligned} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
&m_s(2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_3) + m_s(2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_1) + (2X_2 - X_1 - X_3)C + \\
&+ G_{ван}lws\text{gn}\dot{X}_2 + (2\dot{X}_2 - \dot{X}_1 - \dot{X}_3)\eta = 0
\end{aligned} \tag{4.42}$$

$$\begin{aligned}
&m_s(2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_2) + m_n(2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_4) + (2X_3 - X_2 - X_4)C + \\
&+ 0,25(X_3 - X_4 - 2\delta)C_K + 0,5(G_{ван} + G_{нор})lws\text{gn}\dot{X}_3 + (2\dot{X}_3 - \dot{X}_2 - \dot{X}_4)\eta = 0
\end{aligned} \tag{4.43}$$

$$\begin{aligned}
&m_n(2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_3) + m_n(2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_1) + (2X_4 - X_1 - X_3)C + \\
&+ 0,25(X_4 - X_1 - X_3)C_K + G_{нор}lws\text{gn}\dot{X}_4 + (2\dot{X}_4 - \dot{X}_1 - \dot{X}_3)\eta = 0
\end{aligned} \tag{4.44}$$

$$\frac{G_{nn}}{g} \ddot{\delta} - 0,5(X_4 - X_3 + \delta)C_K + G_{nn} + G_{nn} f \operatorname{sgn} \dot{\delta} = 0 \quad (4.45)$$

Провівши перетворення з врахуванням сил внутрішнього тертя замкнутого контуру і сил тертя при переміщенні натяжних вантажів отримаємо модель руху завантаженого конвеєра:

$$(2m_{\text{ван.}} + 2m_{\text{пор.}} + 2m_{\text{пр.}}) \ddot{X}_1 + m_{\text{ван.}} \ddot{X}_2 + m_{\text{пор.}} \ddot{X}_4 + 2CX_1 - CX_2 - CX_4 + (0.5G_{\text{ван.}}lw + 0.5G_{\text{пор.}}lw) \operatorname{sgn} \dot{X}_1 + 2\eta \dot{X}_1 - \eta \dot{X}_2 - \eta \dot{X}_4 = \frac{M_{\text{пр}} \operatorname{sgn}(\dot{X}_c - \dot{X}_1)}{R_6}, \quad (4.46)$$

$$m_{\text{ван.}} \ddot{X}_1 + 4m_{\text{ван.}} \ddot{X}_2 + m_{\text{ван.}} \ddot{X}_3 - CX_1 + 2CX_2 - CX_3 + G_{\text{ван.}}lw \operatorname{sgn} \dot{X}_2 - \eta \dot{X}_1 + 2\eta \dot{X}_2 - \eta \dot{X}_3 = 0 \quad (4.47)$$

$$m_{\text{ван.}} \ddot{X}_2 + (2m_{\text{ван.}} + 2m_{\text{пор.}}) \ddot{X}_3 + m_{\text{пор.}} \ddot{X}_4 - CX_2 + (2C + 0.25C_K)X_3 - (C + 0.25C_K)X_4 - 0.5C_K\delta + (0.5G_{\text{ван.}}lw + 0.5G_{\text{пор.}}lw) \operatorname{sgn} \dot{X}_3 + 2\eta \dot{X}_3 - \eta \dot{X}_2 - \eta \dot{X}_4 = 0 \quad (4.48)$$

$$m_{\text{пор.}} \ddot{X}_1 + 4m_{\text{пор.}} \ddot{X}_4 + m_{\text{пор.}} \ddot{X}_3 - CX_1 + (C + 0.25C_K)X_4 - (2C + 0.25C_K)X_3 + 0.5C_K\delta + G_{\text{пор.}}lw \operatorname{sgn} \dot{X}_4 - \eta \dot{X}_1 + 2\eta \dot{X}_4 - \eta \dot{X}_3 = 0 \quad (4.49)$$

$$\frac{G_{nn}}{g} \ddot{\delta} - 0.5(X_4 - X_3 + \delta)C_K + G_{nn} + G_{nn} f \operatorname{sgn} \dot{\delta} = 0, \quad (4.50)$$

де w – коефіцієнт опору руху стрічки конвеєра; $m_{\text{ван.}} = G_{\text{ван.}}l/6g$, $m_n = G_{\text{пор.}}l/6g$ – маси вантажної та порожньої віток конвеєра; $M_{\text{пр}}$ – момент двигуна, що приведений до валу барабану.

4.4 Синтез оптимального з точки зору енергетичної ефективності регулятора напруги

В електричних машинах втрати можна візуалізувати за допомогою енергетичних діаграм. На рисунку 4.6 представлена енергетична діаграма асинхронного двигуна.

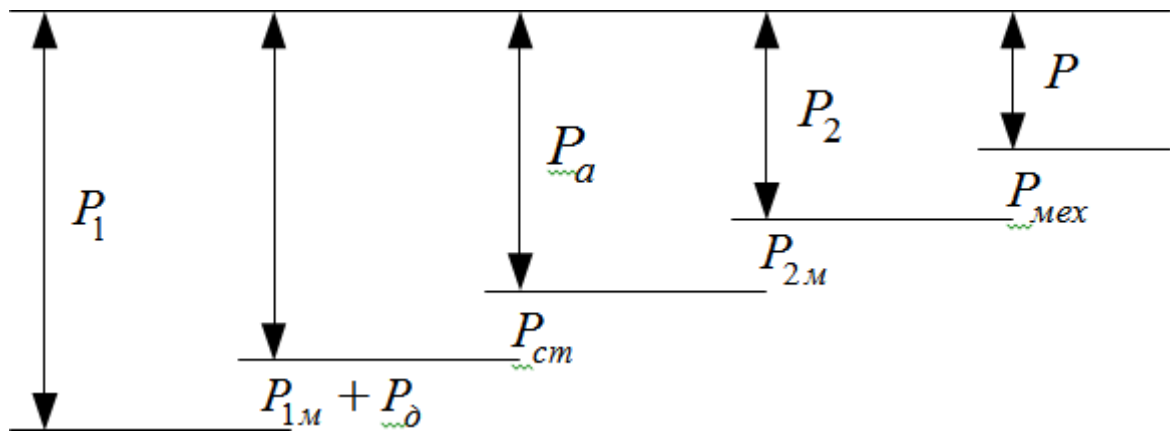


Рисунок 4.6 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

З енергетичної діаграми випливає висновок про втрати потужності:

де $P_{1м} + P_{\delta}$ - втрати в міді статора та додаткові втрати, $P_{ст}$ - втрати в сталі статора, $P_{2м}$ - втрати в міді ротора, $P_{мех}$ - механічні втрати.

Оптимізацію споживання електроенергії зручно представити, виразивши ККД через втрати в електродвигуні.

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P_{ст} + P_{1м} + P_{2м} + P}, \quad (3.1)$$

де η – коефіцієнт корисної дії; P – корисна потужність на валу двигуна; Потужності P та P_1 пов'язані між собою через ККД η :

$$P_1 = 3 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi = \frac{P}{\eta}, \quad (4.51)$$

де U_1 – напруга на статорі двигуна; I_1 – струм на статорі двигуна.

Втрати у міді (електричні втрати) викликані нагріванням обмоток статора і ротора струмами, величини яких залежать від навантаження:

$$P_{м} = P_{м.н} M_c^* k_f^2 / k_u^2; \quad (4.52)$$

де $P_{м.н}$ – втрати у міді в номінальному режимі; M_c^* – коефіцієнт завантаженості; k_f – коефіцієнт регулювання частоти; k_u – коефіцієнт регулювання напруги;

Механічні втрати – це втрати на тертя у підшипниках і вентиляцію, величина яких наближено пропорційна квадрату частоти обертання ротора:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{мех.н}} k_f (1 - S) / (1 - S_n); \quad (4.53)$$

де $P_{\text{мех.н}}$ – механічні втрати в номінальному режимі; S – ковзання ротора двигуна; S_n – номінальне ковзання;

Втрати у сталі, пов'язані з гістерезисом та вихровими струмами в сталі статора і ротора, залежать від величини магнітної індукції та частоти перемагнічування.

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.н}} (a + b \cdot k_f) k_u^2 / k_f, \quad (4.54)$$

де $P_{\text{ст.н}}$ – втрати в сталі в номінальному режимі; a – коефіцієнт, що залежить від втрат на гістерезис; b – коефіцієнт, що враховує втрати на вихрові струми.

Отже, сумарні втрати у асинхронному двигуні матимуть вигляд:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{ст.н}} \cdot k_u^2 \cdot (a + b \cdot k_f)}{k_f} + \frac{P_{\text{м.н}} \cdot M_c^* \cdot k_f^2}{k_u^2} + \frac{P_{\text{мех.н}} \cdot k_f (1 - S)}{(1 - S_n)} \quad (4.55)$$

Підставивши значення $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{м}}$, $P_{\text{мех}}$ у попереднє рівняння та прийнявши ковзання

рівним $S = S_n \cdot M_c^* \cdot \frac{k_f}{k_u^2}$ виразимо ККД.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{\Sigma}}{P_1}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - S_n}{P_n \cdot M_c^*} \left(\frac{P_{\text{мех.н}} \cdot k_f}{1 - S_n} \cdot (k_u^2 - S_n \cdot M_c^* \cdot k_f) + P_{\text{ст.н}} \cdot (a + b \cdot k_f) \cdot \frac{k_u^4}{k_f} + P_{\text{м.н}} \cdot M_c^{*2} \cdot k_f^2 \right) / (k_f \cdot (k_u^2 - S_n \cdot M_c^* \cdot k_f))}, \quad (4.56)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна;

$M_c^* = \frac{M_c}{M_n}$ – коефіцієнт залежності;

$k_u = \frac{U}{U_n}$ – коефіцієнт регулювання напруги;

$k_f = \frac{f}{f_n}$ – коефіцієнт регулювання частоти

Оптимізація енергетики передбачає вирішення задачі екстремального керування за критерієм мінімізації однієї з енергетичних характеристик асинхронного електродвигуна, таких як струм статора, повна потужність, коефіцієнт корисної дії, реактивна потужність або коефіцієнт потужності. Незалежно від вибраного критерію, керуючим сигналом є регулювання величини напруги живлення асинхронного електродвигуна за допомогою перетворювача частоти.

Для оптимізації однієї з цих енергетичних характеристик необхідно визначити закони керування напругою. Ці закони мають забезпечувати оптимальний рівень таких показників, як коефіцієнт регулювання напруги (k_u) , частоти (k_f) і завантаженості (M_c) , при змінах навантаження та частоти живлення.

Досягти максимального значення ККД можна шляхом прирівнювання до нуля першої похідної виразу для ККД по k_u .

Виконавши певні математичні перетворення можна отримати наступний вираз:

$$P_{ст.н} \cdot (a + b \cdot k_f) \cdot k_u^4 - 2 \cdot P_{ст.н} \cdot (a + b \cdot k_f) \cdot S_n \cdot M_c^* \cdot k_f \cdot k_u^2 - P_{м.н} \cdot M_c^{*2} \cdot k_f^3 = 0$$

Отже, щоб підтримати ККД на максимальному рівні при зміні навантаження слід змінювати напругу, яка буде пропорційною до $\sqrt{M_c^*}$. Отож, друга похідна по k_u матиме додатній знак, а значення знаменника даного виразу буде мінімальним, то отримаємо максимальне значення ККД.

Після перетворення, описаного в джерелі [12], ми отримуємо структурну схему оптимального за енергетичною ефективністю регулятора напруги, який забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) при коливаннях завантаженості конвеєра. Ця схема представлена на рисунку 4.7.

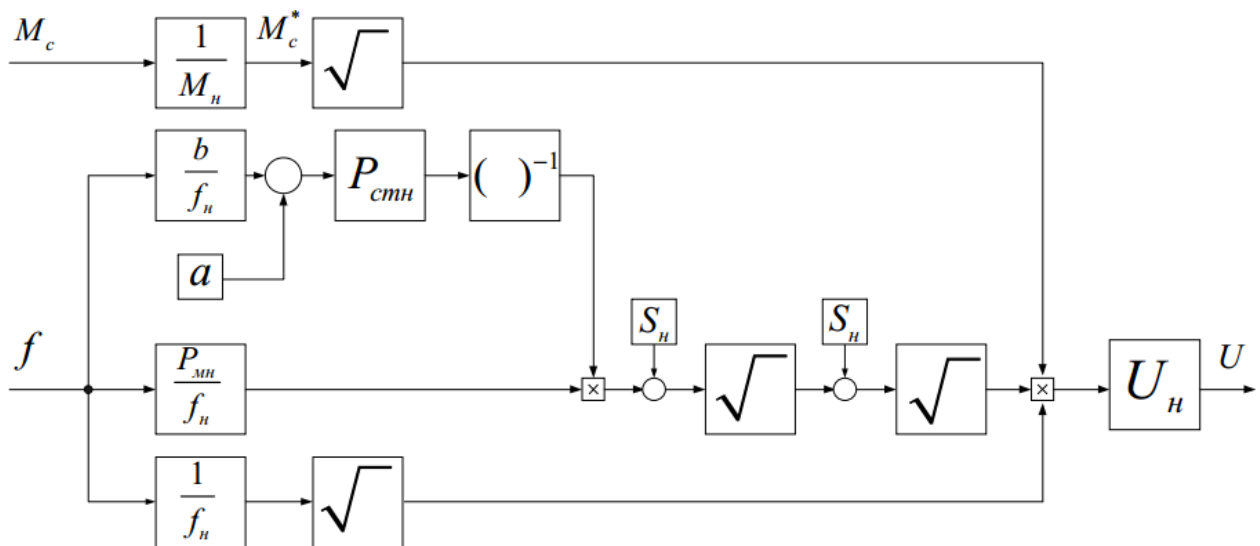


Рисунок 4.7 – Структурна схема оптимального регулятора

Висновки

Створена вдосконалена модель стрічкового конвеєра, що включає взаємопов'язані моделі руху конвеєрної стрічки та електромеханічної системи керованого електропривода конвеєра. Ця модель надає можливість з високою точністю аналізувати динамічні процеси, характерні для конвеєрів з електроприводом, розташованим в головній частині конвеєра, а також імітувати процес транспортування вантажу.

Завдяки аналізу енергетичної діаграми електромеханічного перетворення та застосуванню екстремального методу оптимізації, розроблено схему оптимального регулятора напруги. Крім цього, в даній роботі представлено модель асинхронного двигуна в системі координат статора (a-b), а також перетворювача частоти, що дозволяє детальніше дослідити його динамічні властивості в умовах реальної експлуатації.

регулювання напругою в залежності від завантаженості конвеєра (ОРН); 3 – модель асинхронного електродвигуна в системі координат (a-b); 4 – частина схеми яка відповідає за виведення втрат електромеханічної системи, а саме втрати в сталі статора, міді ротора та механічні втрати. Та подальший їх перерахунок в ККД механізму.

Пі проведення досліджень режимів запуску в кілька етапів, прискорення тягового органа здійснювалося згідно з визначеною характеристикою, яка представлена на рисунку 5.2. Цей підхід дозволяє більш точно налаштувати процес запуску, забезпечуючи плавність переходу та стабільність роботи конвеєра на кожному етапі. Завдяки цьому, системі вдається досягти оптимальної роботи без перевантажень та зменшення зносу обладнання.

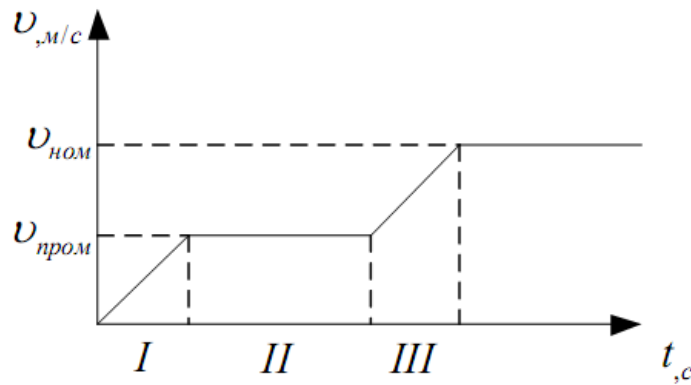


Рисунок 5.2 – Характеристика розгону тягового органа

Де $v_{ном}$ і $v_{пром}$ - номінальна та проміжна швидкості руху стрічки;

I – фаза рушання та розгону до проміжної швидкості

II – фаза руху з проміжною швидкістю

III – фаза розгону до номінальної усталеної швидкості

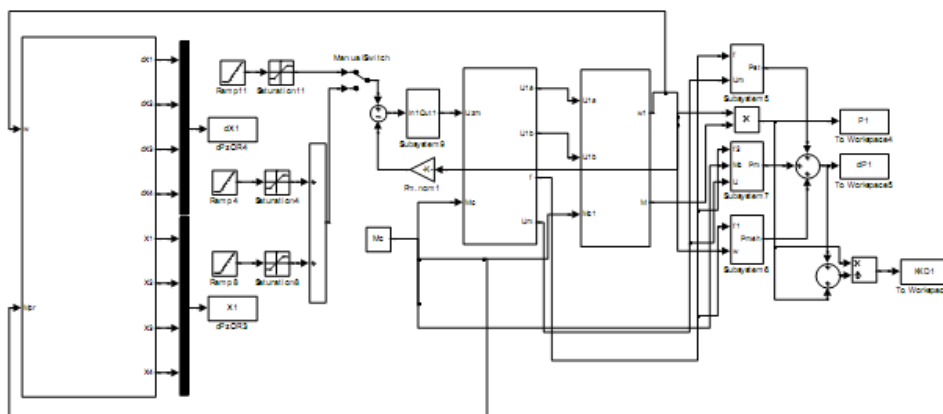


Рисунок 5.3 – Модель електромеханічної системи конвеєра для забезпечення пуску в декілька ступінь

Для реалізації багатоступінчастого запуску конвеєра зворотний зв'язок по швидкості тимчасово розмикається, а задатчик інтенсивності змінює свою характеристику, як це показано на рисунку 5.3. Це дозволяє адаптувати процес запуску до поточних умов, максимально використовуючи можливості обладнання.

При розробці моделі механічної частини конвеєра було використано метод прямого розв'язання диференціальних рівнянь (4.46-4.50), які описують динаміку руху тягового органу. Схема цього блоку, що забезпечує вирішення даних рівнянь, представлена на рисунку 5.4. Такий підхід дозволяє більш точно дослідити динаміку конвеєра і забезпечити оптимальне керування його запуском та роботою в різних умовах.

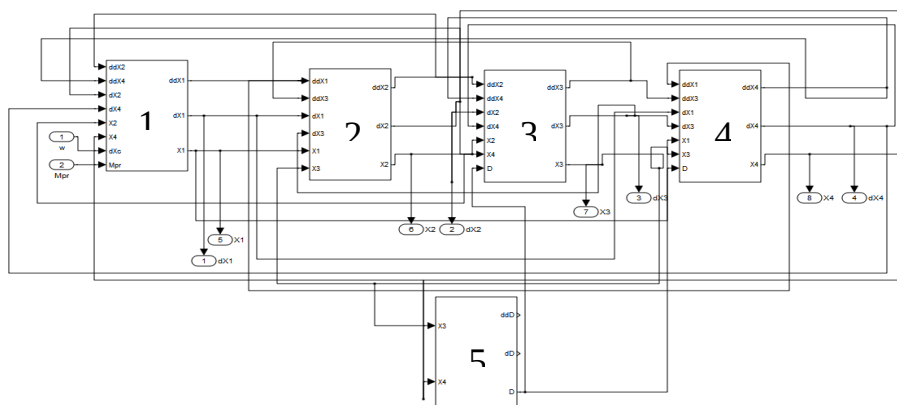


Рисунок 5.4 – Представлення п'яти нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку в Matlab

Блоки 1, 2, 3, 4 та 5 відповідають за вирішення диференціальних рівнянь, що входять до математичної моделі руху конвеєрної стрічки. Завдяки цій моделі можна з більшою точністю визначити зміни параметрів стрічкового конвеєра під час його запуску.

Висновки

На підставі аналізу математичних виразів, що описують роботу блоків електромеханічної системи, були розроблені моделі магістрального конвеєра. Ці моделі дають змогу досліджувати режим роботи при запуску з урахуванням зміни технологічних параметрів установки. Вона охоплює як прямий запуск, так і ступеневу зміну швидкості тягового механізму, коли його навантаженість варіюється від $0,5 M_n$ до M_n , а час запуску складає від 5 до 18 секунд. Крім того, ця модель дозволяє проводити дослідження для систем керування як у розімкнутій, так і в замкнутій конфігурації.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПУСКУ МАГІСТРАЛЬНОГО КОНВЕЄРА ПРИ ВАРІАЦІЯХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ

6.1 Дослідження режимів пуску розімкнутої електромеханічної системи

Модель, зображена на рисунку 5.1, використовується для дослідження режимів прямого пуску тягового органа конвеєра. Моделювання перехідних процесів швидкості враховує рух кожної з чотирьох мас у спрощеній чотиримасовій моделі механічної частини конвеєра (m_1 ; m_2 ; m_3 ; m_4) для трьох значень інтенсивності пуску ($1x=5c$; $2x=10c$; $3x=18c$) і трьох значень варіацій навантажень ($0.5M_n$; $0.7M_n$; M_n).

Додатково, для кожного режиму пуску були побудовані графіки часової залежності розподілу втрат енергії в електромеханічній системі.

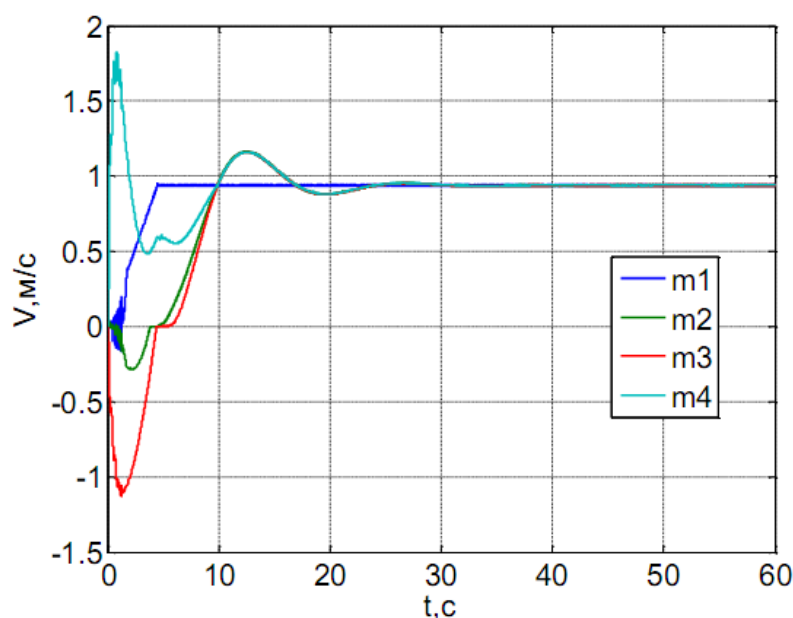


Рисунок 6.1 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=0.5M_n$; $t_n=1x$)

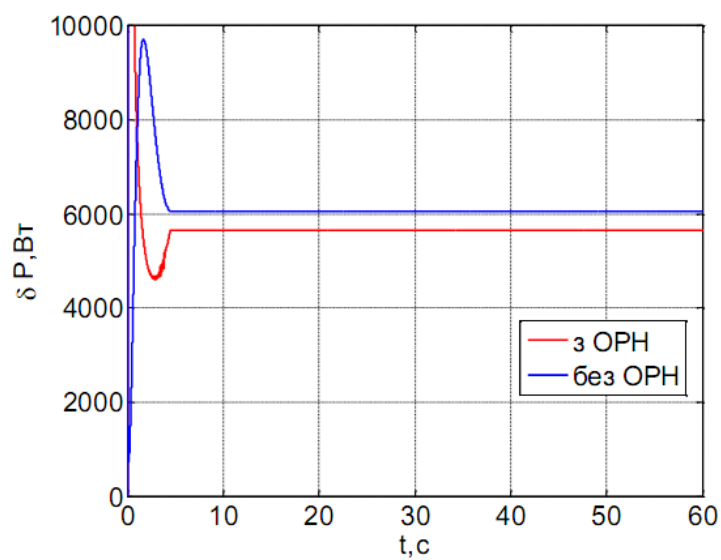


Рисунок 6.2 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=0.5M_H$; $t_H=1x$)

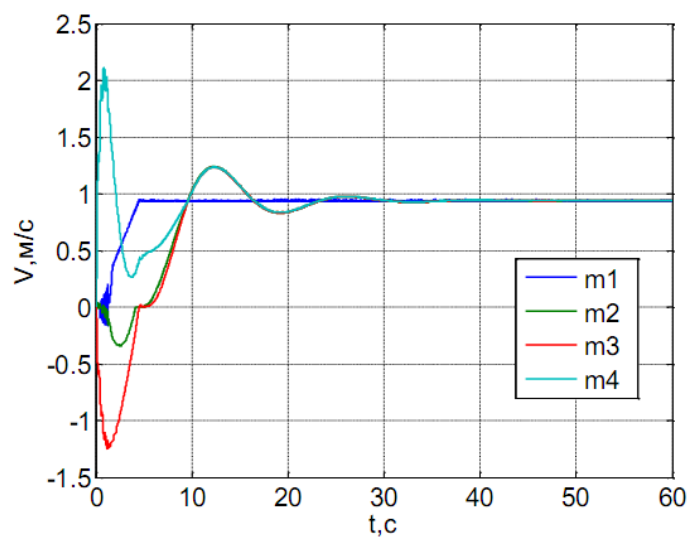


Рисунок 6.3 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=0.7M_H$; $t_H=1x$)

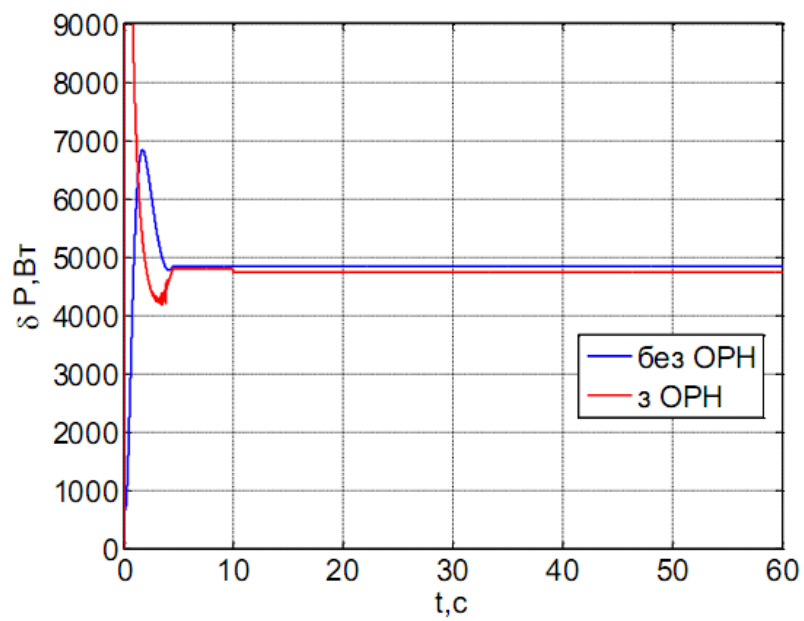


Рисунок 6.4 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=0.7M_H$; $t_H=1x$)

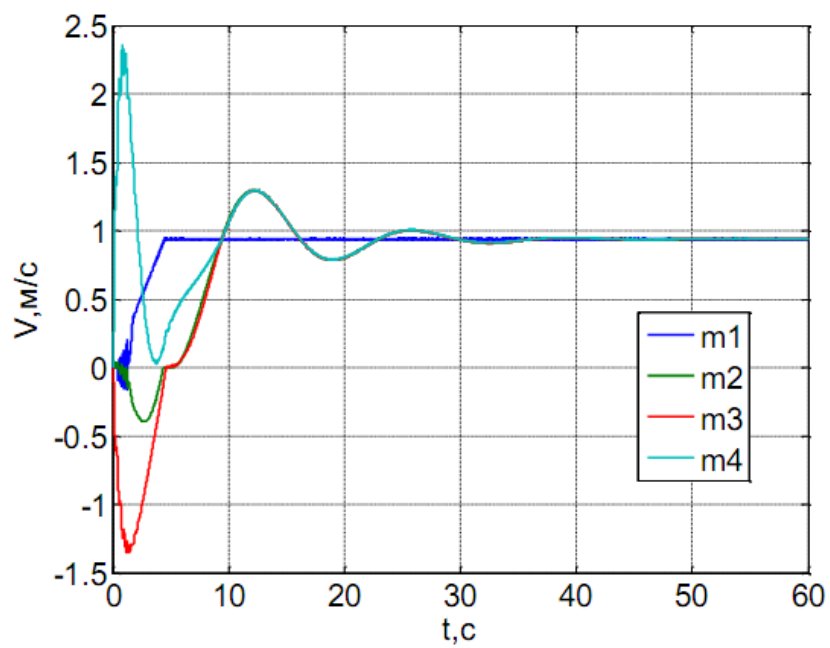


Рисунок 6.5 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_H$; $t_H=1x$)

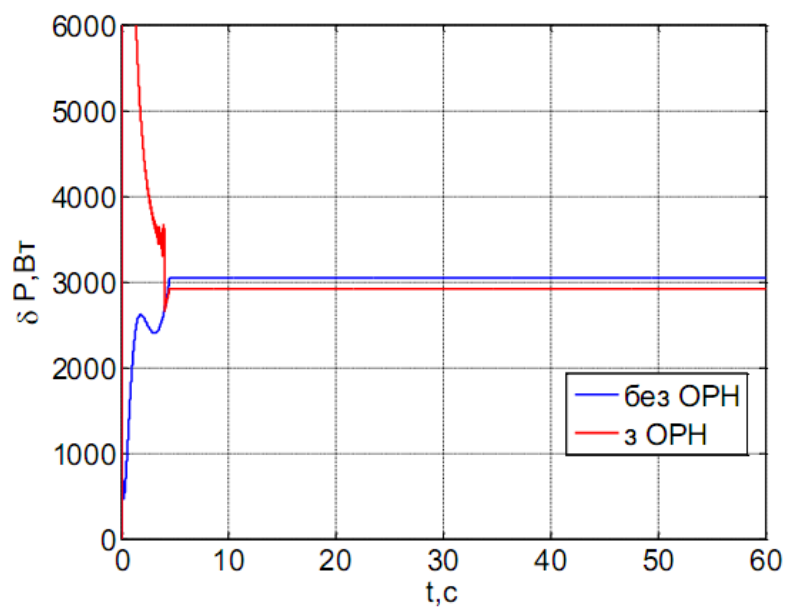


Рисунок 6.6 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=M_H$; $t_H=1x$)

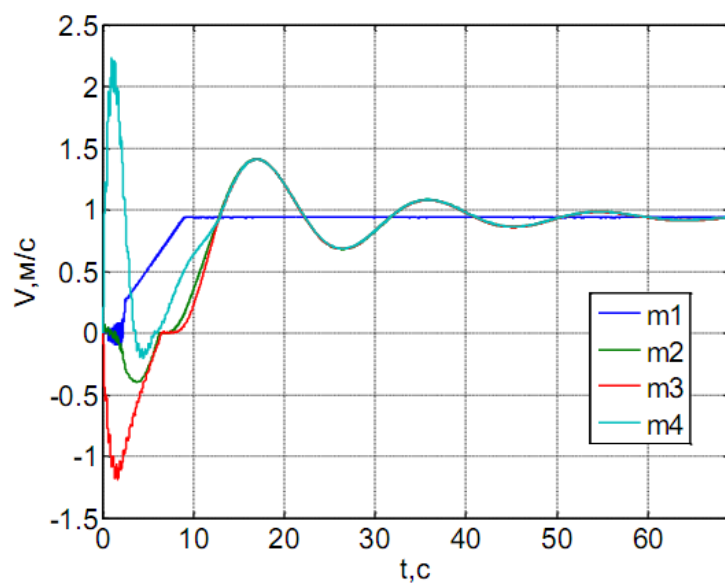


Рисунок 6.7 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_H$; $t_H=2x$)

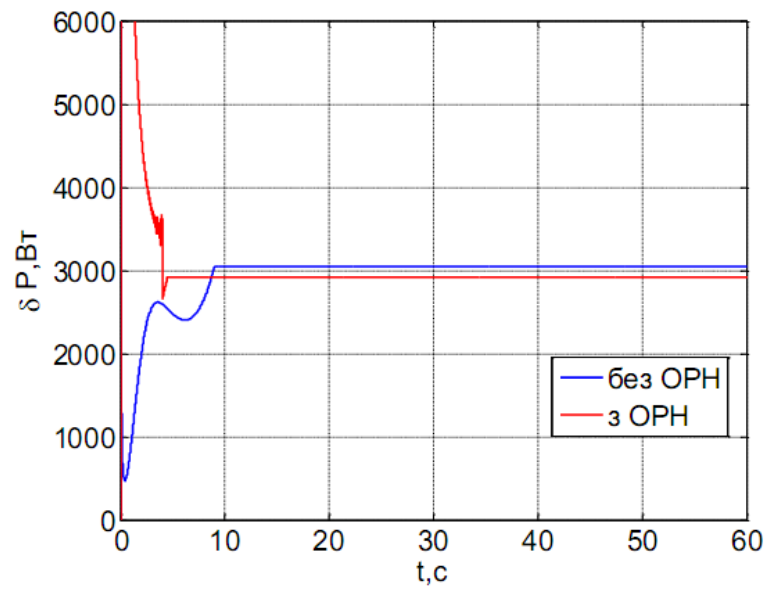


Рисунок 6.8 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=M_H$; $t_H=2x$)

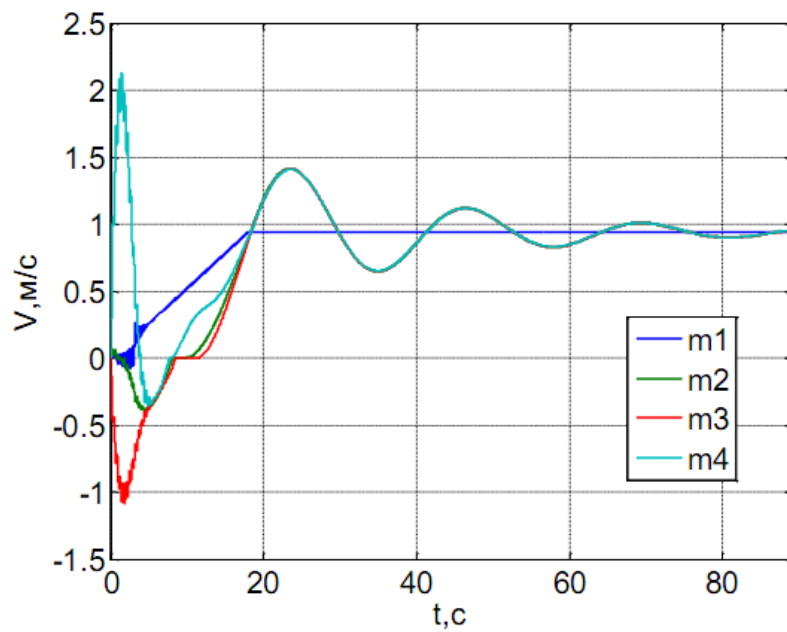


Рисунок 6.9 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_H$; $t_H=3x$)

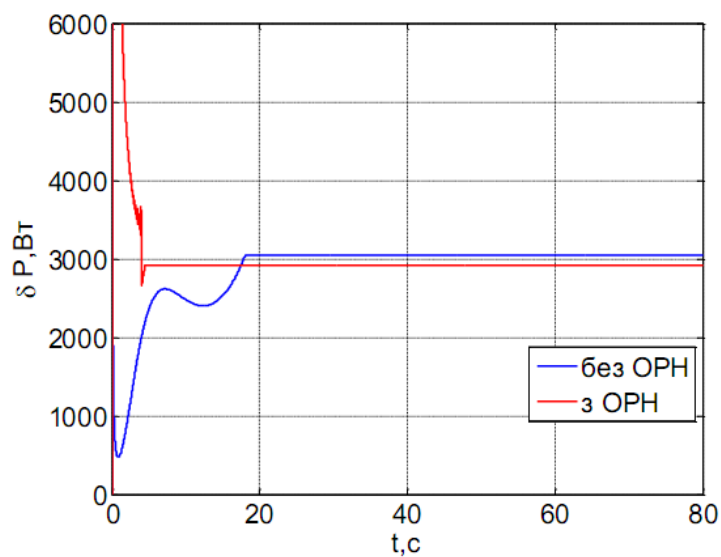


Рисунок 6.10– Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=M_H$; $t_n=3x$)

Для точнішої оцінки енергетичних параметрів системи, на основі отриманих графіків, було складено таблиці 6.1–6.6.

Таблиця 6.1

Без ОРН ($t_n=1x$)

Р, Вт	6000	4800	3000
М, Н/м	$0.5M_H$	$0.7M_H$	$1M_H$

Таблиця 6.2

З ОРН ($t_n=1x$)

Р, Вт	5500	4680	2900
М, Н/м	$0.5M_H$	$0.7M_H$	$1M_H$

Таблиця 6.3

Без ОРН ($M=M_H$)

Р, Вт	3000	2940	2890
t, с	1х	2х	3х

Таблиця 6.4

3 ОРН ($M=M_H$)

Р, Вт	2900	2940	2990
t, с	1х	2х	3х

Таблиця 6.5

Без ОРН

σ , %	39	44	50
Час затухання, с	26.8	32.5	39.5
М, Н/м	0.5М _Н	0.7М _Н	1М _Н

Таблиця 6.6

Без ОРН ($M=M_H$)

σ , %	50	46	41
Час затухання, с	39.5	72	101
t, с	1х	2х	3х

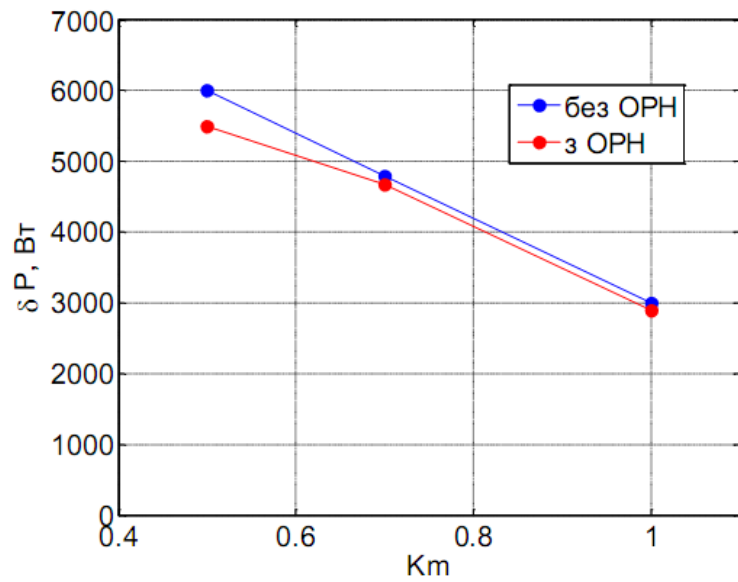


Рисунок 6.11 – Графіки залежності розподілення втрат від навантаження

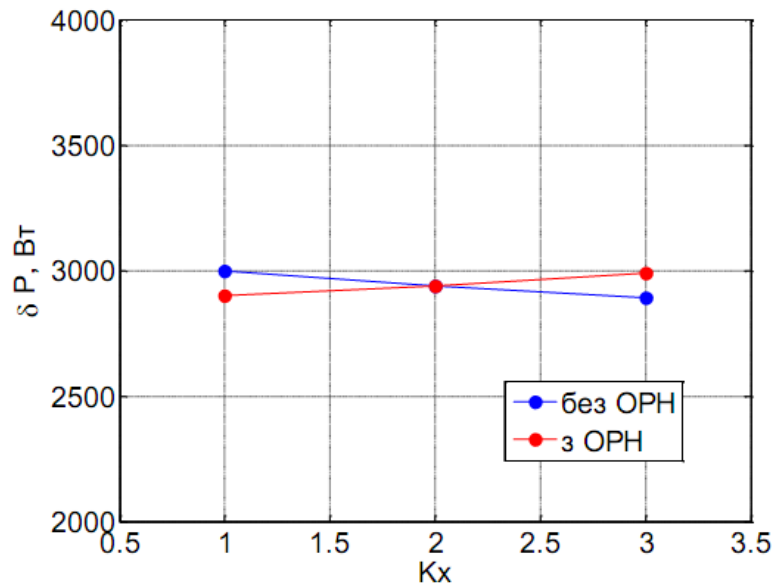


Рисунок 6.12 – Графіки залежності розподілення втрат від інтенсивності пуску при $M=M_n$

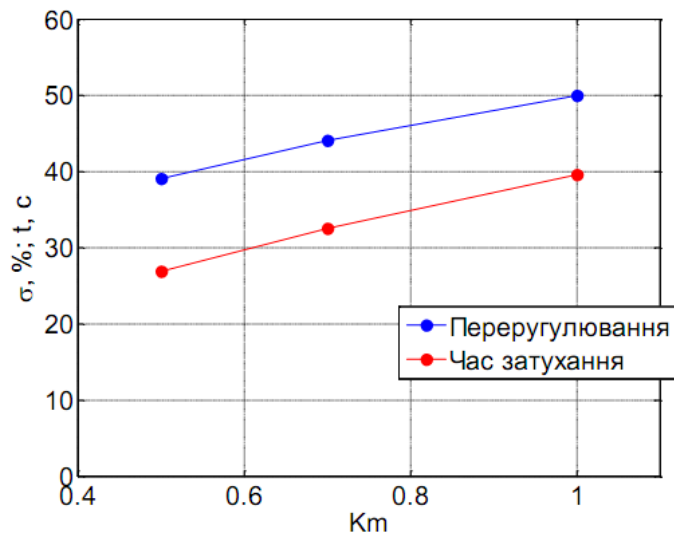


Рисунок 6.13 – Графіки зміни перерегулювання та часу затухання від навантаження

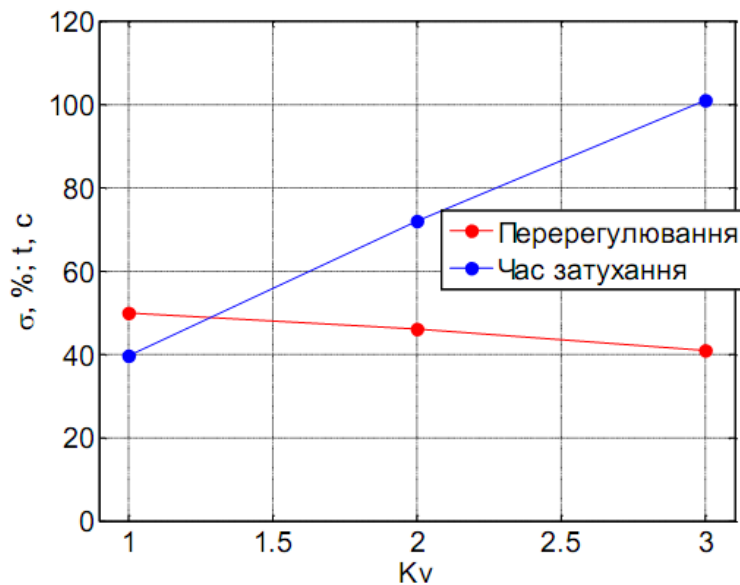


Рисунок 6.14 – Графіки зміни перерегулювання та часу затухання від інтенсивності пуску при $t_n=1x$

Як показали дослідження розподілення втрат енергії в розімкнутій електромеханічній системі конвеєра при пуску для варіацій навантаження тягового органа $\Delta P = f(K_m)$ (рис. 6.11) дослідження оптимального регулятора напруги не дасть відчутного ефекту, причому зі збільшенням

навантаження втрати для випадків з ОРН та без ОРН вирівнюються.

Аналіз графіка 6.12 показує незначну зміну втрат енергії (з ОРН та без ОРН) зі збільшенням тривалості пуску. Зі зростанням навантаження збільшуються як перерегулювання, так і ступінь затухання коливань тягового органа під час пуску. Тому, враховуючи найкращі дисипативні властивості (рис. 6.13), доцільно орієнтуватися на пуск ненавантаженої стрічки. Підсумовуючи, для розімкнутої системи керування пуском конвеєра застосування оптимального регулятора напруги не призведе до значного покращення енергетичної ефективності.

6.2 Дослідження режимів пуску у замкненій системі

На відміну від попередньої моделі в даному випадку був введений зворотний зв'язок по швидкості. Пуск конвеєра моделювався для трьох значень навантаження ($M=0.5M_n$, $M=0.7M_n$, $M=M_n$) і для трьох інтенсивностей наростання швидкості (1х; 2х; 3х).

Перехідні процеси по швидкості $v = f(t)$ і втрат енергії $\Delta P = f(t)$ для різних значень моменту і часу приведені на рисунках (6.9 – 6.14).

Графіки при $M=0.5M_n$:

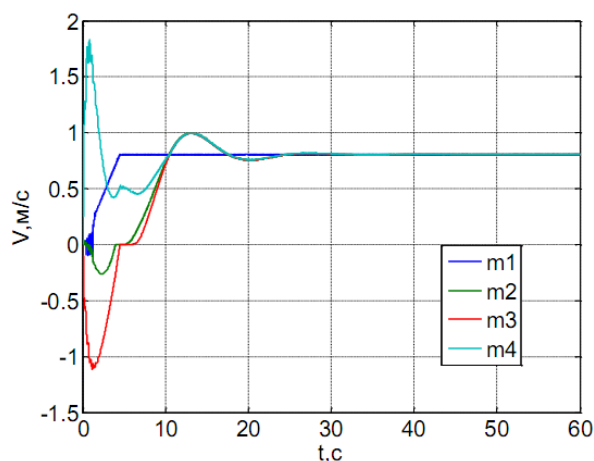


Рисунок 6.15 – Графіки переходних процесів по швидкості ($M=0.5M_n$; $t_n=1x$)

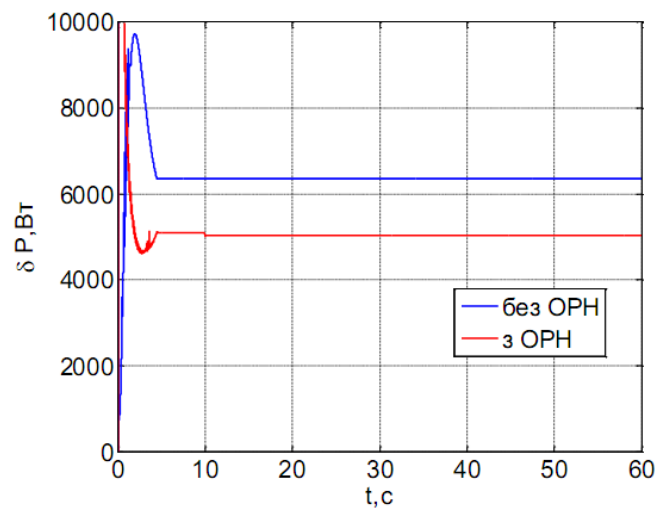


Рисунок 6.16 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=0.5M_n$; $t_\pi=1x$)

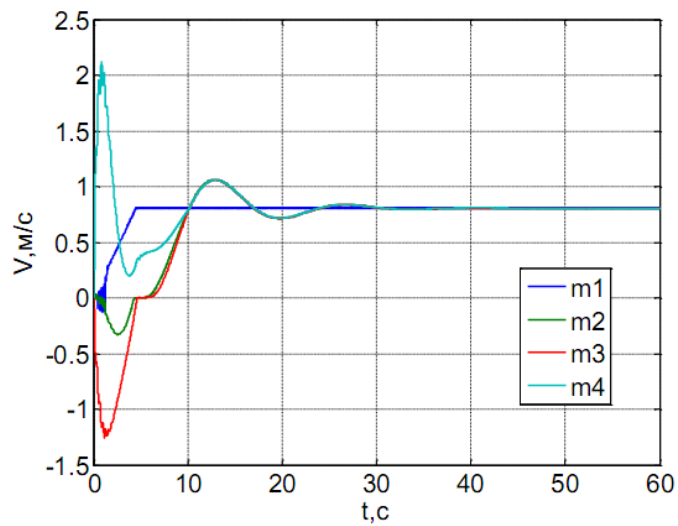


Рисунок 6.17 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=0.7M_n$; $t_\pi=1x$)

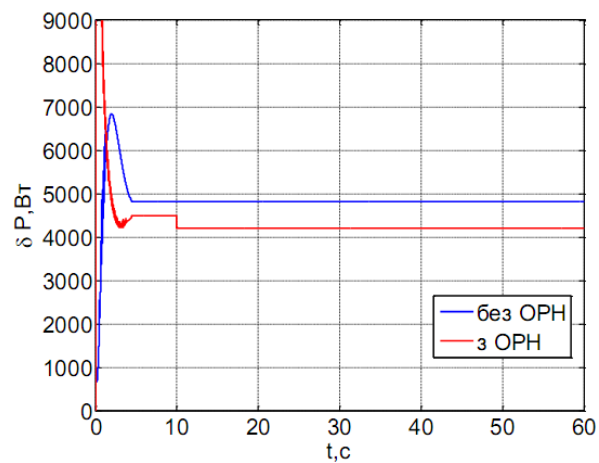


Рисунок 6.18 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=0.7M_n$; $t_\pi=1x$)

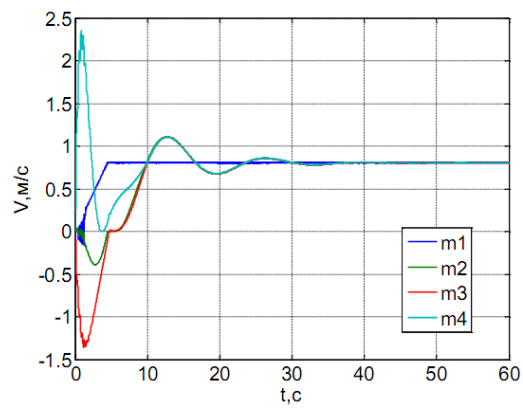


Рисунок 6.19 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_H$; $t_H=1x$)

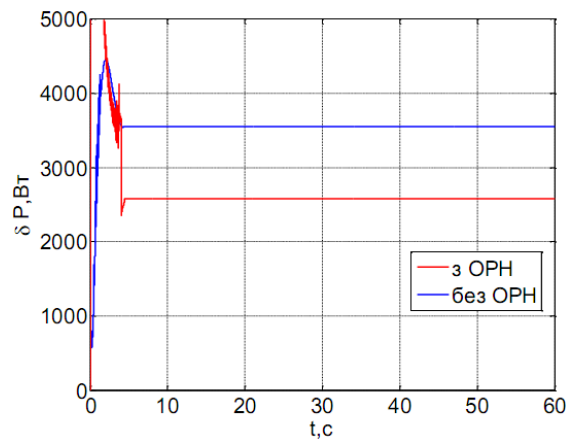


Рисунок 6.20 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=M_H$; $t_H=1x$)

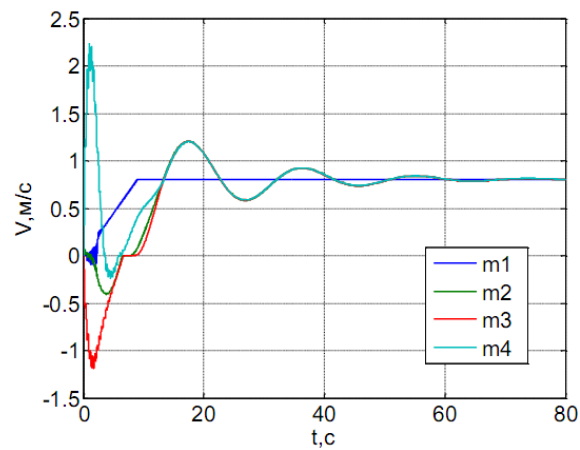


Рисунок 6.21 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_H$; $t_H=2x$)

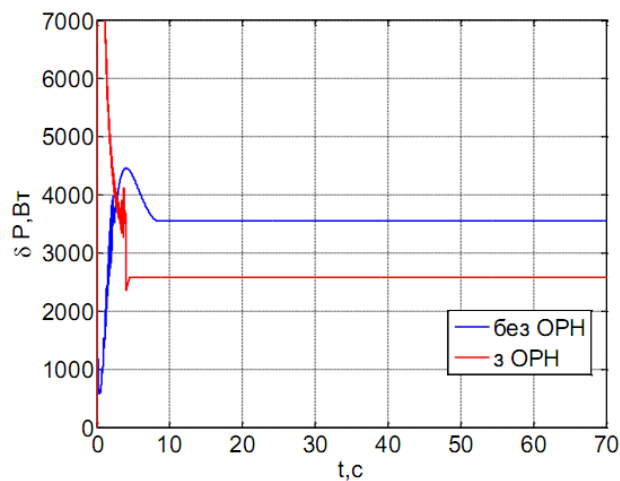


Рисунок 6.22 – Графіки розподілення втрат відносно часу при пуску
($M=M_n$; $t_n=2x$)

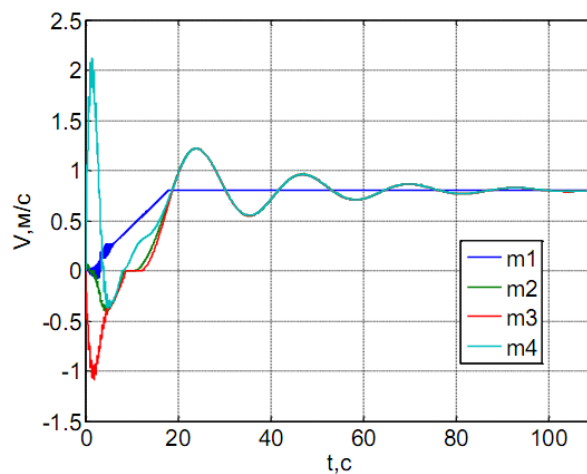


Рисунок 6.23 – Графіки перехідних процесів по швидкості ($M=M_n$; $t_n=3x$)

Аналіз результатів дозволяє зробити наступні висновки.

При використанні замкнутої системи керування для режимів пуску при використанні оптимального регулятора напруги величина втрат зменшується в середньому до 31% в діапазоні зміни навантаження від $0.5M_n$ до M_n .

Також при зміні тривалості пуску від 5с до 18с втрати знижуються, в середньому до 6%.

Як показують графіки $\sigma = f(K_m)$ перерегулювання в залежності від зміни навантаження мало відрізняється від пуску при розімкнутій системі і знаходиться в межах допустимого рівня.

Двоступеневий пуск довгого конвеєра з проміжною швидкістю тягового органа $0.3 * v_n$ та застосуванням оптимального регулятора напруги (ОРН) у замкнутій системі керування дозволяє знизити втрати енергії до 55% при зміні навантаження від $0.5 M_n$ до M_n . Збільшення проміжної швидкості до $0.5 * v_n$ знижує втрати в середньому до 43% при тому ж діапазоні навантаження. Отже, використання ОРН забезпечує кращу енергетичну ефективність при проміжній швидкості $0.3 * v_n$. Крім того, зниження цієї проміжної швидкості зменшує коливання стрічки. Зменшення проміжної швидкості з $0.5 * v_n$ до $0.3 * v_n$ призводить до зниження перерегулювання до 11% при $M = 0.5 M_n$ та до 14% при $M = M_n$.

ВИСНОВКИ

Огляд науково-технічної та патентної літератури виявив, що підвищення енергетичної ефективності та надійності електромеханічних систем під час пуску є перспективним напрямком досліджень. Для точного моделювання руху використовувалася чотиримасова схема механічної частини, що забезпечує достатню точність опису пускових режимів. Розроблена в Matlab модель дозволяє досліджувати пускові режими як для розімкнутих, так і для замкнутих систем автоматичного керування з різними технологічними параметрами. Модифікація моделі дозволяє досліджувати параметри руху та енергетичні втрати при випадковому пуску. Дослідження розімкнутої системи показали, що використання оптимального регулятора напруги не призводить до значного (лише 9%) підвищення енергетичної ефективності, знижуючи перерегулювання в тяговому органі лише на 2%. Натомість, у замкнутій системі керування, застосування оптимального регулятора напруги суттєво покращує енергетичні та механічні показники під час пуску. Рекомендовано використовувати замкнуті системи керування з оптимальним регулятором напруги, особливо при ступінчастому пуску. Для подальшого зниження втрат енергії пропонується підключати оптимальний регулятор напруги з затримкою (15-20%) від повного часу пуску.