

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет  
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Розробка та дослідження електроприводу конвейера ЛК4  
Дробильної Фабрики №3 ПРАТ ПІВНГЗК за системою асинхронно  
вентильний каскад з мікропроцесорним керуванням та урахуванням  
особливостей механічної частини»

*КНУ.МР.141.24.776-07*

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м \_\_\_\_\_ / Кошелєв Р.В./

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/Осадчук Ю.Г./

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/Осадчук Ю.Г./

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

\_\_\_\_\_/Сінчук О.М./

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/Осадчук Ю.Г./

Кривий Ріг  
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Кошелєв Роман Вадимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка та дослідження електроприводу конвейера ЛК4 Дробильної Фабрики №3 ПРАТ ПівнігЗК за системою асинхронно вентильний каскад з мікропроцесорним керуванням та урахуванням особливостей механічної частини»
2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи  
Мета роботи – розробити та дослідити електропривід конвейера за системою асинхронно вентильний каскад. Завдання кваліфікаційної роботи: дослідити електропривід конвейера; розглянути систему асинхронно вентильний каскад; розглянути мікропроцесорне керування електроприводом спираючись на особливості механічної частини..
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)  
1.Характеристика електромеханічної системи та її роль в технологічному процесі, особливості задач і проектування 2. Вибір устаткування електромеханічної системи і аналіз систематичних режимів електропривода 3. Обґрунтування, вибір та дослідження якісних показників САК ЕП 4. Дослідження перехідних процесів з урахуванням особливостей механічної частини електроприводу конвейера, як об'єкта керування 5. Вибір технічних засобів реалізації мікропроцесорних САК ЕП і конструкторська розробка елементів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
1.Кінематична схема конвейера та приводної станції; 2.Схема заміщення АВК; 3.Функціональна схема АВК з підлеглим регулюванням; 4.Дослідження динамічних процесів трьох в різних режимах системи ЕП; 5. Дослідження перехідних процесів трьох масової механічної системи; 6.Принципові схеми ЕКК; 7.Схеми автоматизації технологічного процесу.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Осадчук Ю.Г.		
II	Осадчук Ю.Г.		
III	Осадчук Ю.Г.		

## 7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Характеристика електромеханічної частини, її роль в технологічному процесі, постановка задачі</i>	<i>16 жовтня 2024 р.</i>
2	<i>Вибір обладнання електромеханічної системи і аналіз статичних режимів ЕП</i>	<i>23 жовтня 2024 р.</i>
3	<i>Обґрунтування, вибір і дослідження якісних показників САК ЕП</i>	<i>2 листопада 2024 р.</i>
4	<i>Вибір технічних засобів реалізації САК ЕП і конструкторська розробка елементів( блоків, вузлів) САК</i>	<i>15 листопада 2024 р.</i>
5	<i>Розробка мікропроцесорної системи керування ЕП з контролем енергетичних показників</i>	<i>29 листопада 2024 р.</i>
6	<i>Енергетика системи, енергетичні показники системи АВК, ККД вентильного каскаду</i>	<i>9 грудня 2024 р.</i>
7	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>13 грудня 2024 р.</i>

Дата видачі завдання 15.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Роман КОШЕЛЄВ.  
(ПІБ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Осадчук Ю.Г.  
(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту:  
94с., \_\_\_рис, \_\_\_ табл.

**Об'єкт розробки** - електропривод з пружними зв'язками.

**Мета роботи** - дослідження динамічних режимів роботи електроприводу з пружними зв'язками.

**Метод дослідження** - За допомогою регулювання електропривода по системі АВК вирішено питання зменшення динамічних навантажень та збільшення терміну служби конвеєрної стрічки. Послідовне включення роторної групи двигунів вирішує проблему розподілу навантажень двохдвигунного електроприводу.

**Результати роботи**– для розрахунку електроприводу з пружними зв'язками.

**Ключові слова:** двигун, система АВК , регулятори , пружність стрічки, автоматизація.

# Зміст

## Розділ 1.

Характеристика системи електроприводу

1.1 Технічні умови роботи

1.2 Аналіз довговічності конвеєрної стрічки.....

1.3 Завдання системи керування.....

1.4 Конкурентні системи електроприводу.....

## Розділ 2.

Розрахунок та вибір електромеханічного обладнання

.....

2.1. Розрахунок моменту навантаження та вибір обладнання.....

2.1.1 Попередній розрахунок двигуна.....

2.1.2 Розрахунок елементів силового кола.....

2.1.3 Елементи трифазного випрямляча.....

2.1.4 Вибір трансформатора.....

2.1.5 Вибір тиристорів інвертора.....

2.2 Складання рівнянь статички та розрахунок статичних характеристик.....

2.2.1 Математичні рівняння.

2.2.2 Математичні моделі.....

2.2.3 Побудова статичних характеристик

## Розділ 3

Розрахунок системи керування.....

3.1 Прямий пуск з пружними зв'язками.....

3.2 Структура системи керування.....

3.3 Розрахунок основних параметрів.....

3.4 Структура системи керування з регуляторами.....

3.5 Складові динамічної моделі.....

3.6 Динамічні режими.....

## **Розділ 4**

Дослідження перехідних процесів з пружним зв'язком.....	
4.1 Дослідження перехідних процесів .....	
4.2 Розрахунок моменту .....	
4.3 Динаміка електроприводу .....	
4.4 Розподіл навантажень двохдвигунового електроприводу .....	

## **Розділ 5**

Мікропроцесорна система керування .....	
5.1 Вибір елементів .....	
5.1.1 Вибір тахогенератора .....	
5.1.2 Вибір датчиків .....	
5.2 Розробка системи керування.....	
5.3 Розробка мікропроцесорної системи керування ЕП з контролем енергетичних показників.....	
5.3.1 Задачі автоматизації контролю.....	
5.3.2 Математичні рівняння .....	
5.3.3 Дослідження динаміки .....	
5.3. Мікропроцесорна система.....	
5.4 Енергетичні показники системи АВК.....	
5.4.1 Коефіцієнт корисної дії АВК	
5.4.2 Коефіцієнт потужності вентильного каскаду .....	

## Вступ

Сучасні системи регульованого електроприводу мають широке розповсюдження на промислових об'єктах, а також технологічних комплексах. За допомогою електричного приводу виконуються найбільш складні технологічні операції. Тому, дуже важливо забезпечити такі системи останніми розробками у сфері технічної науки та електротехнічної промисловості.

Промислове обладнання технологічних комплексів гірничо-збагачувальних підприємств відрізняється великою енергоємністю та важкими умовами роботи. Слід зазначити, що на такий перебіг впливає складність технологічних операцій а також великий об'єм відповідальної роботи. Тому для потреб гірничо-видобувних промисловості використовують обладнання великої встановленої потужності.

До важливих технологічних операцій у гірничій промисловості можна віднести виробничі процеси, що пов'язані з транспортуванням рудної маси, або видобутої породи у межах підприємства, виробництва, цеху.

Найпоширенішими видами транспорту при цьому виступають безперервні системи, наприклад такі як конвеєри.

Конвеєр є механізмом складної конструкції, у якому розподіляється механічна енергія. Не дивлячись на відносно низьку швидкість переміщення конвеєрної стрічки, конвеєр є високопродуктивним механізмом, який відрізняється надійністю у роботі, а також простотою керування.

Слід зазначити, що підприємства гірничо-видобувного циклу налічують у своєму складі велику кількість конвеєрних установок різного типу та виконання. Такі механізми відрізняються своїм конструктивним виконанням, таким як довжина, ширина, тип стрічки, а також елементами, що відтворюють рух конвеєрної стрічки. До таких елементів можна віднести станції головного руху, а також натяжні пристрої. Це обладнання забезпечує роботу конвеєрної установки з постійною швидкістю, тобто без зміни продуктивності. Можна сказати, що за таким принципом будуються технологічні лінії багатьох установок. Але з точки зору ефективності такого застосування, обладнання конвеєрної установки буде не повністю завантажено, а отже номінальним параметрам електроспоживання може відповідати не зовсім корисний режим роботи.

Останнє ствердження змушує розмірковувати про необхідність розробки технологічних ліній зі змінними параметрами продуктивності. У свою чергу

цей факт призводить до необхідності застосовувати для таких механізмів системи регульованого електроприводу. З конструктивних особливостей можна вважати за хороший прояв такого рішення застосування систем регульованого електроприводу для приводних станцій конвеєрних установок. Такі системи мають забезпечити відповідне регулювання параметрів електроприводу при необхідності зміни продуктивності технологічної установки.

Для електроприводу конвеєрної установки найбільш простими, а тому й найбільш поширеними є системи з асинхронними двигуном у їх складі.

За специфікою використання обладнання конвеєрної установки слід розрізняти особливості конструкції електричної машини, що складає таку структуру. Так можна виділити, що потужні асинхронні двигуни мають суттєві недоліки при застосуванні у таких установках.

Розглянемо процес пуску такого двигуна. При запуску асинхронного двигуна з коротко замкненим ротором виникають значні пускові струми, і як наслідок значний пусковий момент, що створює надзусилля при роботі системи, що у свою чергу призводить до виникнення аварійних ситуацій. Найбільш поширеними проявами є порив стрічки, замикання роликів, або, навіть вихід з ладу електричного двигуна.

Зменшити пускові надзусилля можливо впливом на пусковий момент асинхронної машини. Найбільш простим при цьому тут виглядає застосування можливості плавного регулювання зміни значення моменту асинхронної машини при пуску. За відсутності можливості здійснювати таке керування з боку обмотки статора використовують інші, теж доволі ефективні методи. Наприклад, можна впливати на зміну значення ЕРС у роторному колі.

Виходячи із запропонованого методу регулювання, таке застосування можливе при використуванні у якості провідних електричних двигунів асинхронних машин з фазним ротором. Такі двигуни є більш громіздкими, та більш вибагливими щодо експлуатації, на відміну від їх короткозамкненого виконання, але й більш прості при здійсненні можливості регулювання їх параметрів. Зазвичай такі системи використовують комплекси реостатних опорів, що приєднані до обмотки ротора, та виконують функцію зниження ЕРС у колі ротора електричної машини. Таке регулювання є напрочуд простим щодо його виконання та реалізації, тому дуже широко застосовується у промислових об'єктах. Також цей приклад виконання регулювання параметрів електричного приводу не обійшов і конвеєрні



установки також.

Але слід зазначити, що не дивлячись на простоту виконання та обслуговування подібних систем електроприводу, останні є не дуже ефективними у плані споживання електричної енергії, й вважаються енергоефективними та не заощадливими. Це пов'язано з тим, що при застосуванні реостатів у роторному колі для зміни частоти обертання асинхронного двигуна буде зростати кількість теплової енергії, в залежності від ступеню регулювання електричної машини, яка буде виділятися у значній мірі у роторному колі. Цей процес призводить до втрати ефективного розподілу електричної енергії у структурі електричної машини. І чим більшим буде навантаження на електричний двигун, а от же й більшим буде струм, ці втрати будуть зростати та знижувати коефіцієнт корисної дії конвеєрної установки.

Тому для здійснення ефективного керування параметрами асинхронного двигуна з фазним ротором у коло ротора такої машини вводять не опори, а ЕРС у вигляді додаткової напруги. Таке застосування за принципом створення протидії амплітуд них значень ЕРС роторного кола й додаткової напруги виключає протікання теплових процесів з підвищенням виділенням теплової енергії, а отже заощаджує втрати електричної енергії у роторному колі, та підвищує коефіцієнт корисної дії технологічної установки.

Для забезпечення працездатності подібних систем в умовах гірничо-видобувного підприємства, а саме такої запиленої місцевості, як ділянка подрібнення дробарної фабрики, слід виконувати спеціальні умови щодо встановлення й подальшої експлуатації обладнання конвеєрної установки.

Тому обладнання виконується у пиле та вологозахищенному виконанні.

Для створення додаткової ЕРС у колі ротору асинхронної машини, сучасні тенденції щодо розвитку перетворюваної та обчислювальної техніки пропонують використовувати інверторів групи перетворюваної техніки з мікропроцесорним управлінням. Такий підхід дозволяє використовувати розрахунки щодо здійснення плавного регулювання параметрами електричної машини, а також пришвидшити процес розрахунку складних завдань та якість роботи системи регулювання.

Керування інверторною групою здійснюється по декільком каналам регулювання. Так можна зазначити параметри навантаження, що визначаються за струмом, та параметри частоти обертання установки, що можуть бути визначені як безпосередньо, так й по значенню напруги.

Процес пуску конвеєрної установки є дуже важливим для забезпечення

надійності її роботи. Тому завданням мікропроцесорної системи керування є унеможливлення проявів аварійних ситуацій, які може спричинити пуск з надмірним навантаженням, або затяжний пуск, а також пуск з підвищенням пусковим моментом, або ударний пуск.

Ще однією проблемою при здійсненні пуску потужних конвеєрних установок є довжина та велика протяжність елементів конвеєрної стрічки, що спричиняє виникнення пружних зусиль, які впливають на створення додаткового моменту пружного зв'язку. Врегулювати такі прояви можна за рахунок уявлення елементів конвеєрної стрічки у вигляді багато масової структури з відповідними пружними з'єднаннями. Це обумовлює виконання додаткових розрахунків та відповідного налаштування системи керування.

Сучасні мікропроцесорні системи, що керують регульованими асинхронними електроприводами враховують нелінійні та статичні навантаження у вигляді факторів збурення системи. Тому при застосуванні відповідного математичного апарату щодо розв'язку подібних складних систем, можна стверджувати, що впровадження систем асинхронного регульованого електроприводу з мікропроцесорним керуванням та врахуванням особливостей конвеєрної стрічки щодо складу та пружності її елементів допомагає підвищувати експлуатаційні показники конвеєрної установки а також здійснювати економічне регулювання її продуктивності та забезпечувати надійність та безпечність в усіх режимах роботи.

**Розділ 1**  
**Характеристика системи електроприводу.**

## 1.1. Технічні умови роботи.

Характеристики конвеєру.

Таблиця 1.1- Характеристики конвеєру.

Продуктивність, т/ч	4930
Повна довжина конвеєра, м	115,6
Висота підйому, м	18,9
Максимальний кут нахилу, град	9°27
Швидкість руху стрічки, м/с	2,32
Ширина стрічки, мм	2000
Насипна вага, т/мі	2,1
Максимальний розмір шматків, мм	500
Тип редуктора	КЦ2-1710
Сумарна встановлена потужність, кВт	630
Привід	одноб. 2-х двиг.
Діаметр приводного барабана, мм	1440

Кінематична схема конвеєру.

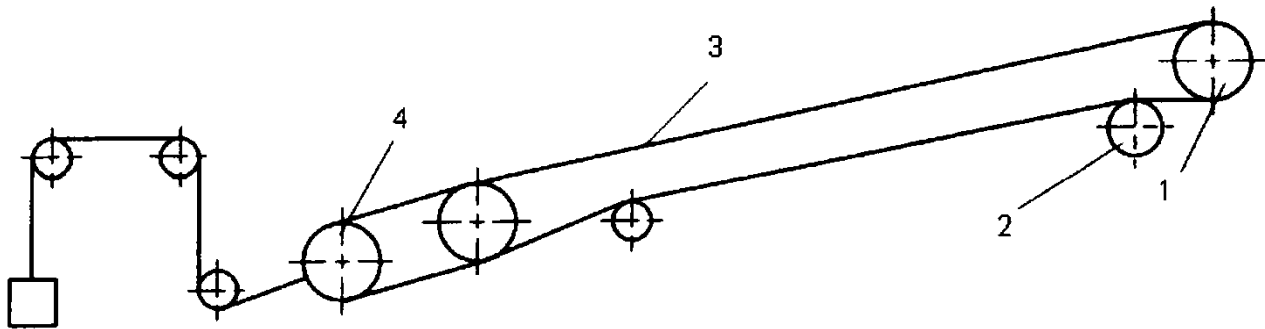


Рис 1.1- Кінематична схема конвеєру.

Стрічковий стаціонарний конвеєр є транспортуєчий пристрій безперервної дії.

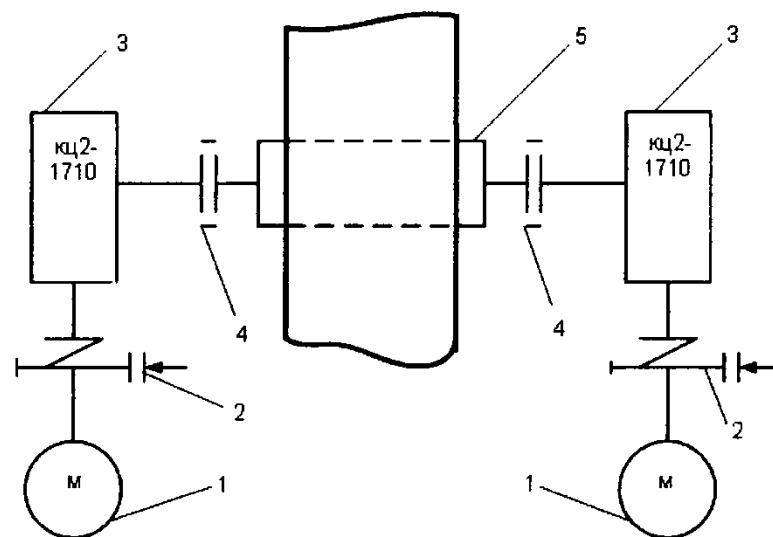


Рис 1.2- Обладнання.

Характеристики конвеєру таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Характеристики конвеєру.

Найменування показників	Норма
<b>1. Електродвигун</b> а) кількість, штук б) потужність, кВт в) частота обертання ротора, об/хв г) напруга, В	 2 800 985 6000
<b>2. Редуктор конічний-циліндровий КЦ2-1710</b> а) кількість, штук б) передавальне число в) частота обертання вхідного валу, об/хв г) розрахунковий крутячий момент на вихідному валу, кг см	 2 31,9 985 14700

## 1.2. Аналіз довговічності конвеєрної стрічки.

Разом з постійним розширенням області застосування, характерною тенденцією сучасного розвитку стрічкових конвеєрів в Україні і за кордоном.

Близько 50% всіх простоїв конвеєрів пов'язане з виготовленням або переробкою стикових з'єднань конвеєрної стрічки, схід стрічки на сторону, особливо в місцях перевантаження вантажопотоку. Існуючі засоби по центрівці стрічок зводяться до установки під кутом роликів опор або зміна положення їх уручну, що часто приводить до децентрівці і зносу стрічки. До 25% втрат маємо із-за поривів стиковальних з'єднань і в основному при пуску конвеєрів. Тому доцільно знижувати навантаження на стикові з'єднання і підвищувати надійність роботи стику. До 12% складають заштибовання транспортної конвеєрної лінії унаслідок низької ефективності чистячих пристроїв. До 20% складає позаплановий об'єм робіт по заміні і ремонту стрічок унаслідок передчасного зносу стиків із-за роботи з несправними роликами.

## 1.3. Завдання системи керування.

## 1.4. Конкурентні системи електроприводу.

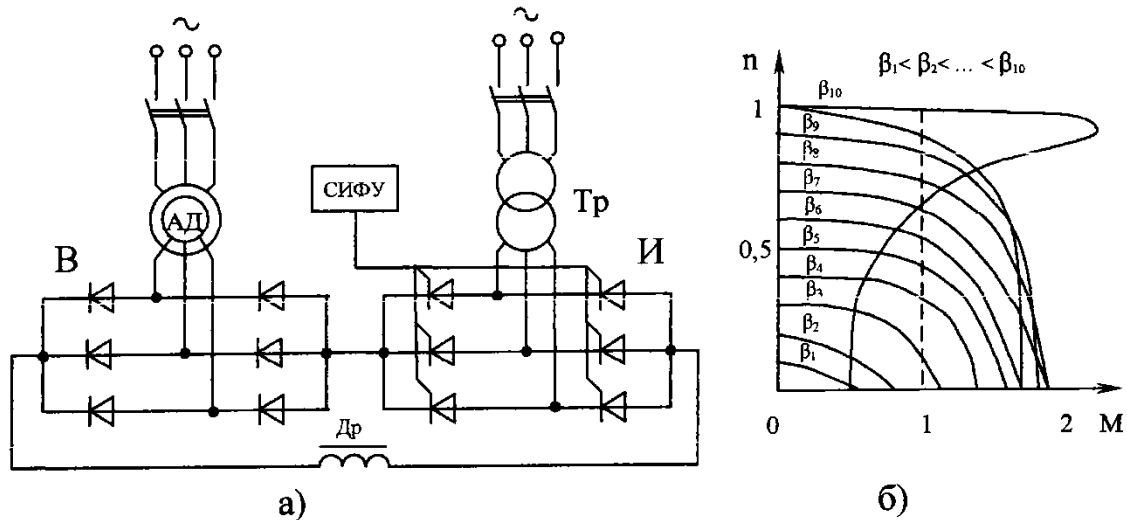


Рис 1.3- Схема АВК.

### Висновки:

1. Конвеєр ЛК-4 є важливим компонентом транспортної системи дробильної фабрики №3, через який щомісяця транспортується до 900 тис. тонн рудної маси. Його безперерйна робота є ключовою для стабільної продуктивності фабрики.
2. Конвеєрна стрічка, яка становить 65–75% вартості всієї установки, є найбільш зношуваним елементом. Термін її служби обмежений через бічні зсуви, динамічні навантаження під час пуску, а також часте підйомно-спадне навантаження.
3. Виявлено основні вимоги до системи електропривода конвеєра:

- Плавний запуск для зниження динамічних навантажень.
  - Узгоджена робота декількох двигунів для рівномірного натягу стрічки.
  - Запобігання пробуксовці стрічки.
  - Регулювання швидкості у вузькому діапазоні для стабільного руху вантажу.
4. Аналізуючи можливі схеми електропривода, обрано систему асинхронно-вентильного каскаду (АВК), яка забезпечує високу надійність, енергозбереження за рахунок рекуперації енергії та можливість плавного регулювання швидкості.



## **Розділ 2**

**Розрахунок та вибір електромеханічного обладнання.**

## 2.1. Розрахунок моменту навантаження та вибір обладнання.

### 2.1.1. Попередній розрахунок двигуна.

Проведемо розрахунки.

$$W = (q_m + q_n + q_p) \ell \omega \cos \alpha \pm (q_m + q_n) h$$

$$W = (q_n + q_p) \ell \omega \cos \alpha \pm q_n h$$

Де

$q_n$  – вага 1м конвеєрної стрічки (паспортні дані);

$\ell$  – довжина конвеєра, м

$h$  – висота підйому, м

$\cos \alpha$  – кут нахилу конвеєра

$\omega$  – коефіцієнт опору, може бути прийнятий в межах 0,03-0,04.

$$q_m = \frac{Q}{3.6v} \text{ кг/м,} \quad (2.3)$$

Де

$q_m$  – вага 1м матеріалу що знаходиться на стрічці, кг/м

$Q$  – продуктивність конвеєра, т/ч

$v$  – швидкість руху стрічки, м/с.

$$q_m = \frac{Q}{3.6v} \text{ кг/м,} \quad (2.4)$$

Де

$q_m$  – вага 1м частин верхніх роликкоопор, що обертаються, кг/м

$\ell_p$  – крок верхніх роликкоопор, м

$\lambda'$  – вага частин, що обертаються, одній верхньою роликкоопори, кг

$$q_p'' = \frac{\lambda''}{\ell_x} \text{ кг/м,} \quad (2.5)$$

Де

$q_p''$  – w вага 1м частин нижніх роликкоопор, що обертаються, кг

$\ell_x$  – крок нижніх роликкоопор, м

$\lambda''$  – вага частин, що обертаються, одній нижньою роликкоопори, кг

$$S_i = S_{i-1} + W(i-1) - i \quad (2.6)$$

$$S_{нб} = S_n = S_{n-1} + W(n-1)/n \quad (2.7)$$

$$S_{нб} = S_{сб} e^{\mu\alpha}$$

т.е. (2.8)

$$S_n = t e^{\mu\alpha},$$

Де

$\mu$  – коефіцієнт зчеплення стрічки з барабаном

$\alpha$  – кут обхвату барабана стрічкою в радіанах.

$$N = \frac{S_{нб} - S_{сб}}{\eta_6} \quad (2.9)$$

$$\eta_6 = \frac{1}{1 + \omega_6(2n-1)} \quad (2.10)$$

$$P_6 = \frac{Nv}{102} \text{ кВт} \quad (2.11)$$

$$p_s = \frac{p_6 \kappa}{\omega} \text{кВт} \quad (2.12)$$

$$q_m = \frac{Q}{3.6 \nu} = \frac{4390}{3.6 \times 2.32} = \frac{4390}{8.352} = 590 \text{кВт/м}$$

$$q'_p = \frac{\lambda'}{\ell_p} = \frac{197}{1.1} = 179 \text{кВт}$$

$$q''_p = \frac{\lambda''}{\ell_x} = \frac{103}{3} = 34.3 \text{кВт}$$

$$(q_m + q_{\pi} + q'_p) \times \omega = q_{\text{раб}} = (590 + 74.4 + 179) \times 0.04 = 33.7 \text{кВт}$$

$$(q_{\pi} + q''_p) \times \omega = (74.4 + 34.3) \times 0.04 = 4.35 \text{кВт}$$

$$(q_m + q_{\pi}) = 590 + 74.4 = 664.4 \text{кВт}$$

$$W = (q_m + q_n + q_p') \ell \omega \cos \alpha + (q_m + q_n) h = (590 + 74.4 + 179) \times 115.16 \times 0.04 \cos 9 + \\ + (590 + 74.4) \times 18.9 = 16401.34 \text{ кг}$$

Опір на похилій ділянці холостої гілки:

$$W = (q_n + q_p'') \ell \omega \cos \alpha + q_n h = (74.4 + 34.3) \times 115.16 \times 0.04 \times \cos 9 + \\ + (74.4 \times 18.9) = 1901.61 \text{ кг}$$

Далі переходимо до тягового розрахунку ( рис. 2.1.).

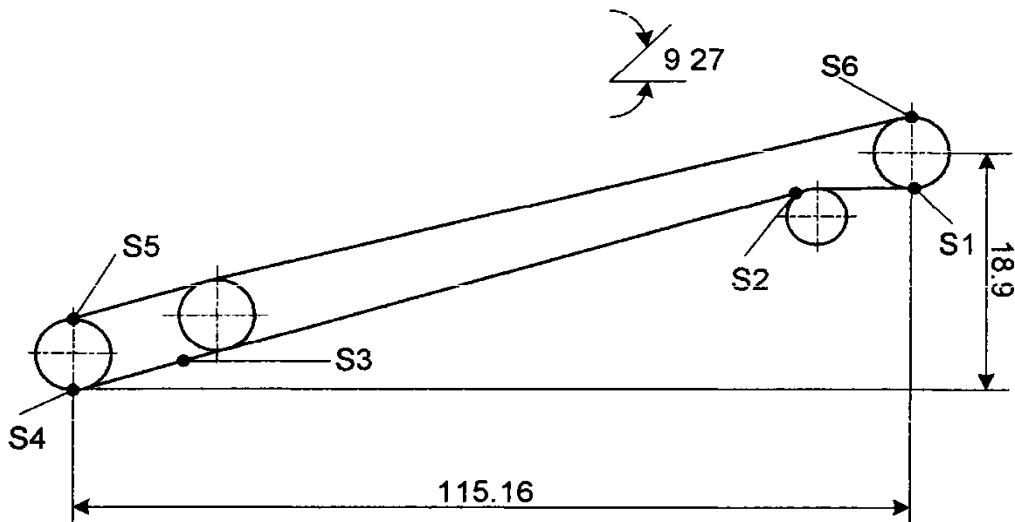


Рис 2.1- Геометрична схема конвеєра

$$1) S_1 = S_{\text{сб}} = t;$$

$$2) S_2 = S_1 + \omega_{1-2};$$

$$\omega_{1-2} = 0.02S_1 = 0.02t \text{ кг};$$

$$S_2 = t + 0.02t = 1.02t \text{ кг};$$

$$3) S_3 = S_2 + \omega_{2-3};$$

$$\omega_{2-3} = q_{\text{хол}} \times \ell \cos \alpha - q_{\text{л}} = 4.35 \times 115.16 \times 0.99 - 74.4 \times 18.9 = -910.91 \text{ кг};$$

$$S_3 = 1.02t - 910.91 \text{ кг};$$

$$4) S_4 = S_3 + \omega_{3-4};$$

$$\omega_{3-4} = 0.02S_3;$$

$$S_4 = 1.02S_3 = 1.02(1.02t - 910.91) = 1.04t - 929.1 \text{ кг};$$

$$5) S_5 = S_4 + \omega_{4-5};$$

$$\omega_{4-5} = 0.04S_5;$$

$$S_5 = 1.04S_4 = 1.04(1.04t - 929.1) = 1.08t - 966.2 \text{ кг};$$

6)

$$S_6 = S_5 + \omega_{5-6};$$

$$\omega_{5-6} = q_{\text{паб}} \times \ell \cos \alpha + q_{\text{гр}} h = 33.7 \times 115.6 \times 0.99 + 664.4 \times 18.9 = 16393.86 \text{ кг};$$

$$S_6 = 1.08t - 966.2 + 16393.8;$$

$$S_6 = 1.08t + 15427.66;$$

З іншого боку:

$$S_6 = S_1 e^{\mu};$$

$$\alpha = 210^\circ = 3.66 \text{ рад}$$

$$\mu = 0.35 \text{ (барабан футерований);}$$

Вирішуючи спільно два рівняння (2.6.–2.7.), отримуємо:

$$1.08 + 15427.66 = t e^{\mu} \text{ або } 1.08t + 15427.66 = t 3.6;$$

$$2.52t = 15427.66 \text{ кг};$$

$$t = \frac{15427.66}{2.52} = 6122 \text{ кг};$$

Підставляючи значення  $t$  у вираз для, обчислюємо натягнення стрічки в кожній крапці.

Таблиця 2.1- Результати розрахунку.

Значення натягнення виражене через t	Чисельні значення Натягнень, кг
$S_1=t$	$S_1= 6122$
$S_2=1.02t$	$S_2= 6244$
$S_3=1.02t-910.91$	$S_3 = 5333.09$
$S_4=1.04t- 929.1$	$S_4 =5314.9$
$S_5=1.08t- 966.2$	$S_5 = 5277.8$
$S_6=1.08t +15427.66$	$S_6 = 21671.66$

$$\eta_6 = \frac{i}{1 + n_6(2n - 1)} = \frac{i}{1 + 0.04(2 \times 1.38 - 1)} = 0.93;$$

$$N = \frac{S_6 - S_1}{\eta_6} = \frac{21671,66}{0,93} = 16720 \text{ кг};$$

$$P_6 = \frac{Nv}{102} = \frac{16720 \times 232}{102} = 320.3 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{ндв}} > P_{\text{расч}};$$

$$P_{\text{эл}} = \frac{P_6 \kappa}{\eta_{\text{ред}}} = \frac{380.3 \times 1.25}{0.95} = 500 \text{ кВт};$$

Таблиця 2.2- Дані двигуну.

N,п/п	Найменування	Параметри
1	номінальна напруга живлення	6000 В
2	номінальний струм	39 А
3	- напруга на роторі	520 В
4	струм ротора	370 А
5	частота обертання(синхронна)	1000 об/хв.
6	частота обертання	985 об/хв.
7	момент інерції	19кг*м <sup>2</sup>
8	Сos φ	0.85
9	к. к. д.	0.92
10	λ	2
11	номінальна потужність	315кВт

### 2.1.2. Розрахунок елементів силового кола.

$$E_{2pmax} = k_1 \times E_p \times S_{max}, \text{ В} \quad (2.13)$$

$$E_{2pmax} = 2 \times 1,35 \times 520 \times 1 = 702 \times 2 = 1404 \text{ В}$$

Номінальний випрямлений струм ротора двигуна :

$$I_{2n} = 0.76 \times I_{dn} \Rightarrow I_{dn} = \frac{I_{2n}}{0.76}, \quad (2.14)$$

$$I_{dn} = \frac{370}{0,76} = 487, \text{ А}$$

### 2.1.3. Елементи трифазного випрямляча.

$$I_B = \frac{I_{dn}}{3 \times 0.9 \times k_r \times k_n \times k_k \times k_n \times n_{нар}}, \quad (2.15)$$

Де:



$$I_b = \frac{487}{3 \times 0,9 \times 0,92 \times 0,9 \times 0,9 \times 1 \times 1} = 242 \text{ , A}$$

$$U_{в.обр.} = 1,045 \times E_{2pmax}, \text{ B} \quad (2.16)$$

$$U_{в.обр.} = 1.045 \times 702 = 733, \text{ B}$$

#### 2.1.4. Вибір трансформатора.

$$U_{2r} = \frac{1404}{2,34 \times 0,966} = 621,7 \text{ B} \quad (2.17)$$

$$I_{2\phi} = k_2 i I_{дн}, \text{ A} \quad (2.18)$$

$$I_{2\phi} = 0,816 \times 487 = 397 \text{ A}$$

$$S_r = \frac{m \times k_{2i} \times E_{2p.max} \times I_{дн}}{k_2 \times 0.966} \quad (2.19)$$

#### 2.1.5. Вибір тиристорів інвертора.

$$S_T = \frac{3 \times 0,816 \times 1404 \times 487}{2,34 \times 0,966} = 740,481 \text{ кВт}$$

$$U_{т.обр} = 2,34 \times 1,045 \times U_{2\phi}, \text{ B}$$

(2.20)

$$U_{т.обр} = 2,34 \times 1,045 \times 660 = 1613,9 \text{ B}$$

$$I_r = \frac{I_{дн}}{30 \times k_r \times k_b \times k_c \times k_n \times n_{пар}}, \text{ A} \quad (2.21)$$

$$I_r = \frac{487}{3 \times 0.9 \times 0.92 \times 0.9 \times 0.9 \times 1 \times 1} = 242 \text{ A}$$

-

**2.2. Складання рівнянь статички та розрахунок статичних характеристик.**

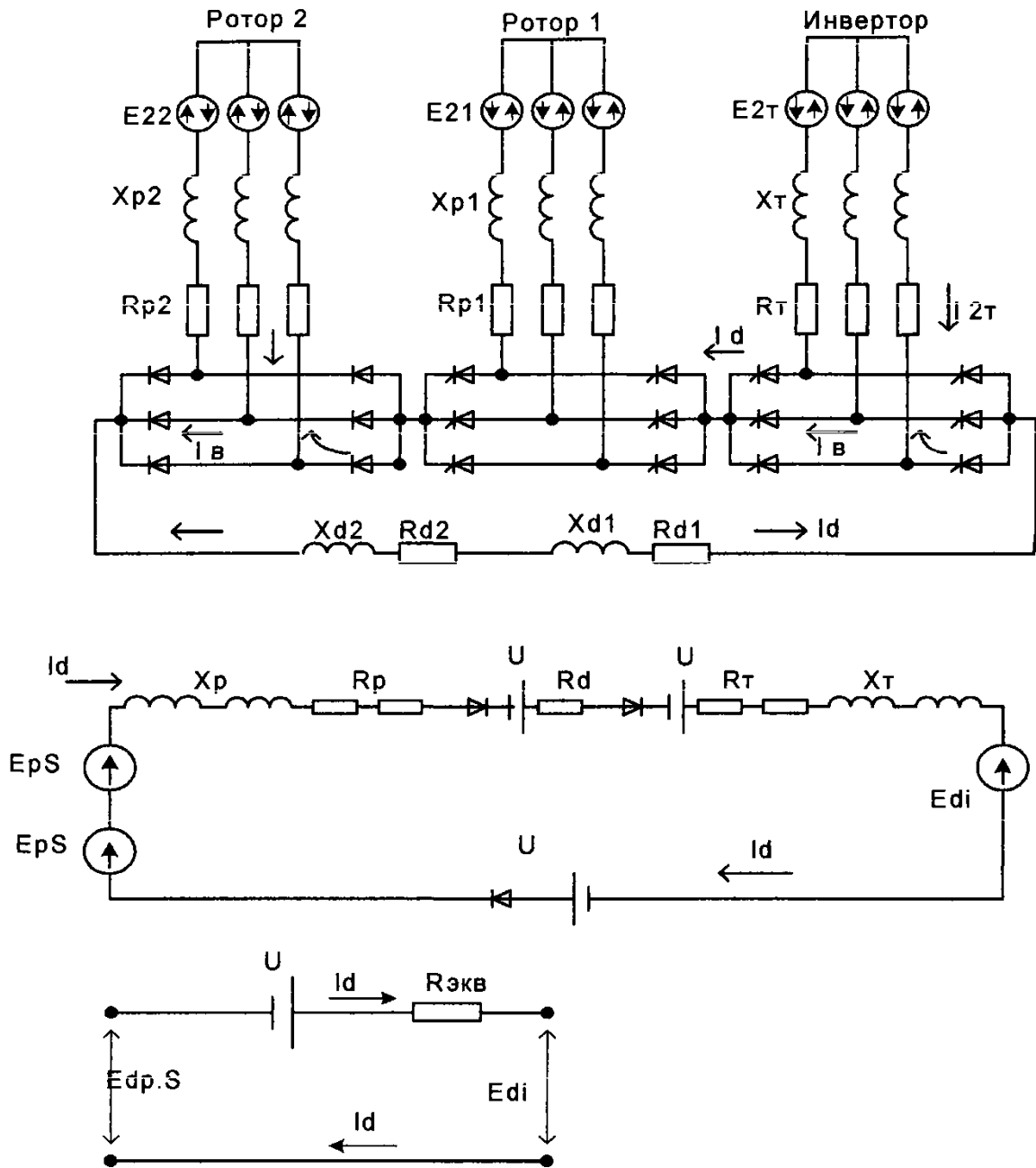


Рис 2.2- Схема заміщення роторного ланцюга асинхронно- вентильного каскаду.

$$E_{дp.n} s = E_{дi} + I_d R_{эkv}, \text{ В} \tag{2.22}$$

або

$$I_d = \frac{E_{дp.n} s \times E_{дi}}{R_{эkv}}, \text{ А} \tag{2.23}$$

$$\Delta E = I_d X R_{\text{экв}}, \text{ В} \quad (2.24)$$

$$R_{\text{экв.}} = \frac{3x_{\text{P.}} \times S}{\pi} + \frac{3x_{\text{P.}}}{\pi} + 2r_2 + 2r'S + r_{\text{сд.}} + 2r_{\text{T}}, \text{ Ом} \quad (2.25)$$

$$\rho = \frac{x_{\text{T.}}}{x_{\text{P.}}} + \frac{2\pi r_2}{3x_{\text{P.}}} + \frac{\pi r_{\text{сд.}}}{3x_{\text{P.}}} + \frac{2\pi r_{\text{T.}}}{3x_{\text{P.}}} \quad (2.26)$$

$$x_{\text{P.}} = \frac{E_{\text{P.}}^2}{2\omega_1 \kappa_{\text{M.}} M_{\text{H}} 9.81}, \text{ Ом} \quad (2.27)$$

$$r_1 = \frac{U_1 s_{\text{H}}}{\sqrt{3} I_{1\text{H}} \kappa_{\text{T}}^2}, \text{ Ом} \quad (2.28)$$

$$r_2 = \frac{1025 M_{\text{H}} s_{\text{H}}}{I_{2\text{H}}^2 P}, \text{ Ом} \quad (2.29)$$

$$r_T = \frac{\Delta P_{HT} - \Delta P_{xx}}{3I_{2T.H}^2} = \frac{\Delta P_{кз}}{3I_{2TH}^2}, \text{ Ом} \quad (2.30)$$

$$Z_T = \frac{E_{2T} e_k \%}{100I_{2T.H}} , \text{ Ом} \quad (2.31)$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2} , \text{ Ом} \quad (2.32)$$

$\Delta P_{HT}$ ,  $\Delta P_{xx}$ ,  $\Delta P_{кз}$  - втрати навантажень, втрати холостого ходу і короткого замикання трансформатора, Вт;

$I_{дн}$  - номінальний випрямлений струм трансформатора, А;

$I_{2T.H}$  - номінальний фазний струм вторинної обмотки трансформатора, А;

$e_k$  - напруга короткого замикання трансформатора, %.

### 2.2.1 Математичні рівняння.

$$M = \frac{\kappa_1}{9.81\omega_1} I_d E_p - \frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_p , \text{ кгс}\cdot\text{м} \quad (2.33)$$

$$E_{dp} = E_{di} + \Delta E , \text{ В} \quad (2.34)$$

$$E_{dp} = \kappa_1 E_{ps} = 1.35 E_{ps} , \text{ В} \quad (2.35)$$

$$E_{di} = k_2 E_2 \tau \cos \beta , \text{ В} \quad (2.36)$$

$$\frac{\kappa_2 E_{2T}}{\kappa_1 E_p} = \varepsilon \quad (2.37)$$

$$\frac{2r'_i \pi}{3x_p} = q \quad (2.38)$$

$$\frac{\Delta U}{\kappa \cdot E} = \lambda \quad (2.39)$$

$$I_d = \frac{\pi \kappa_1 E_p}{3x_p} * \frac{s - (\varepsilon \cos \beta + \lambda)}{s(1+q) + \rho} \quad , A \quad (2.40)$$

$$M = \frac{6E_p^2}{\pi \omega_1 x_p 9.81} \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} - \frac{s - s_0}{s(1+q) + \rho} \quad H^* M \quad (2.41)$$

$$s_0 = \varepsilon \cos \beta + \lambda . \quad (2.42)$$

### 2.2.2. Математичні моделі.

### 2.2.3. Побудова статичних характеристик.

Номінальні параметри:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} \quad , \text{ рад/с} \quad (2.43)$$

$$\omega_n = \frac{\pi \times 985}{30} = 103,15 \text{ рад/с}$$

$$E_p = 520 \text{ В}; E_{2T} = 660 \text{ В}; \kappa_M = 2 .$$

Номінальні моменти двигуна:

$$\mathbf{M}_H = \frac{\mathbf{P}_H}{\omega_H}, \mathbf{H}^* \mathbf{M} \quad (2.44)$$

315000

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} \quad , \text{ рад/с} \quad (2.45)$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \times 1000}{30} = 104.72 \text{ рад/с} .$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} \quad (2.46)$$

$$s = \frac{1000 - 985}{1000} = 0.015 .$$

Індуктивний опір фази двигуна:

$$X_P = \frac{E_P^2}{2\omega_1 \kappa_M M_H} \quad , \text{ Ом} \quad (2.47)$$

$$X_{po} = \frac{520^2}{2 \times 104.72 \times 2 \times 3053} = 0.2114 \quad , \text{ Ом}$$

$$X_p = 2 \times X_{po} = 2 \times 0.2114 = 0.4229 \text{ Ом} .$$

Активний опір фази статора двигуна:

$$r'_{1o} = \frac{u_1 s_H}{\sqrt{3} I_{1r} \kappa_T} \quad , \text{ Ом} \quad (2.48)$$

$$r'_{1o} = \frac{6000 \times 0.015}{\sqrt{3} \times 39 \times 11.54^2} = 0.01 \quad , \text{ Ом}$$

$$r' = 2r'_{1o} = 2 \times 0.01 = 0.02 \text{ Ом}$$



$$k_t = \frac{U}{I_s} = \frac{6000}{520} = 11.54 \quad (2.49)$$

$$r_r = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{3 \times I_{2\text{н}}^2}, \text{ Ом} \quad (2.50)$$

$$r_r = \frac{8000}{3 \times 419^2} = 0.0152 \text{ Ом}$$

$$z_r = \frac{E_{2r} \times P_k \%}{100 \times I_{2\text{н}}} = \frac{660 \times 4.3}{100 \times 419} = 0.0677 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір:

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}, \text{ Ом} \quad (2.51)$$

$$X_T = \sqrt{0,0677^2 - 0,0152^2} = \sqrt{0,00436} = 0,066 \text{ Ом}$$

Активний опір:

$$r_{20} = \frac{1025 \times M_n S_n}{I_{2\text{н}}^2 P \times .81}, \text{ Ом} \quad (2.52)$$

$$r_{20} = \frac{1025 \times 3053 \times 0.015}{370^2 \times 3 \times 9.81} = 0.01165 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 2r_{20} = 2 \times 0.01165 = 0.0233 \text{ Ом}$$

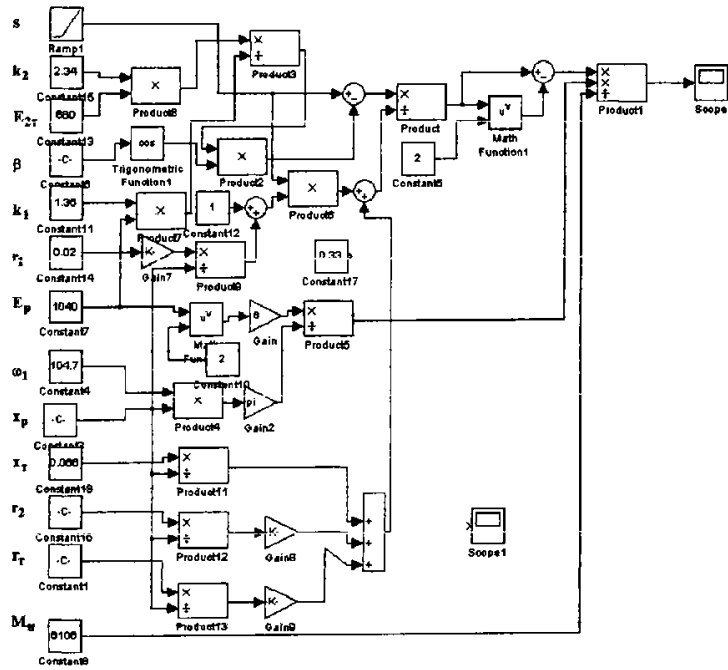
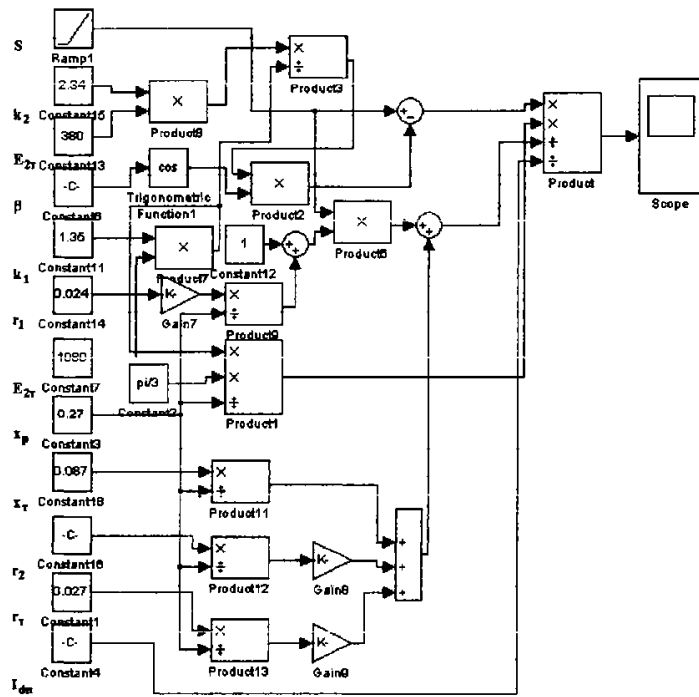


Рис 2.3- Математична модель електромагнітного моменту системи АВК.



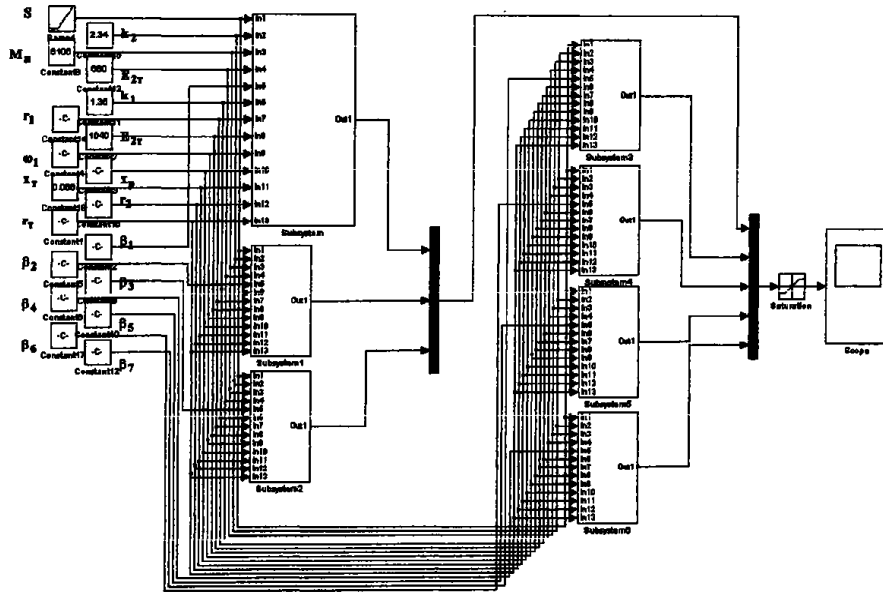


Рис 2.4- Математична модель сімейства механічних характеристик АВК.

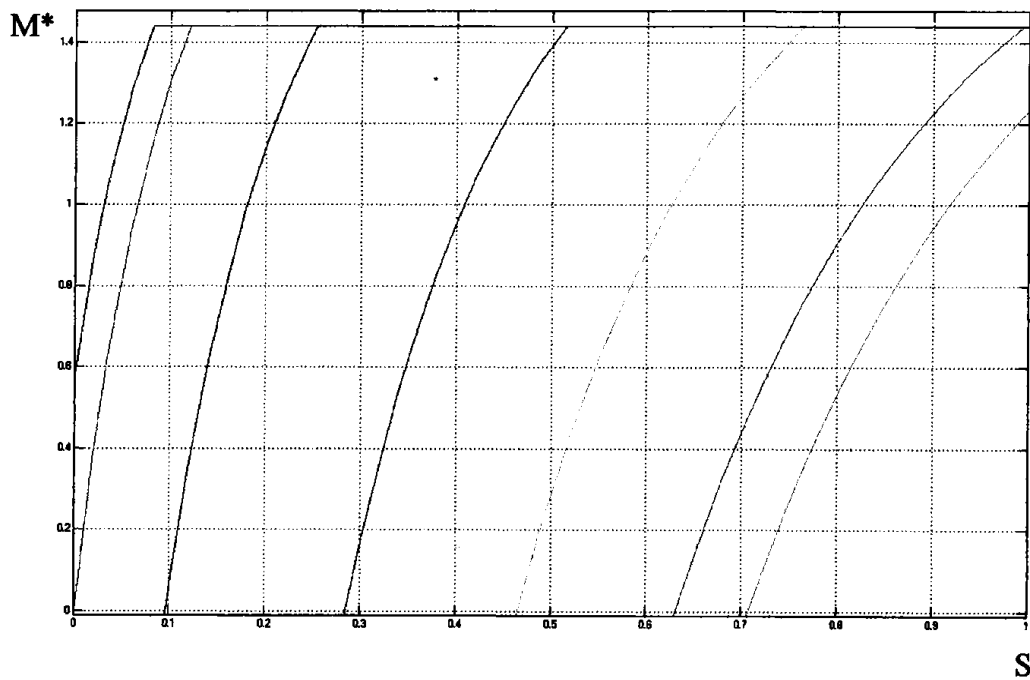


Рис 2.5- Сімейство механічних характеристик системи АВК.

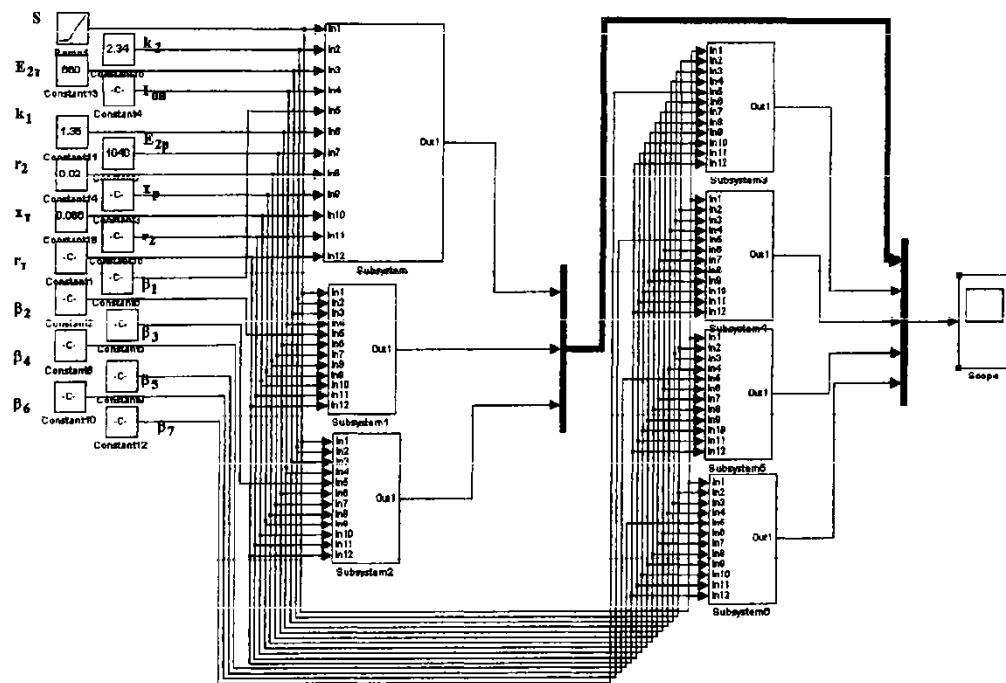


Рис 2.6- Математична модель сімейства швидкісних характеристик.

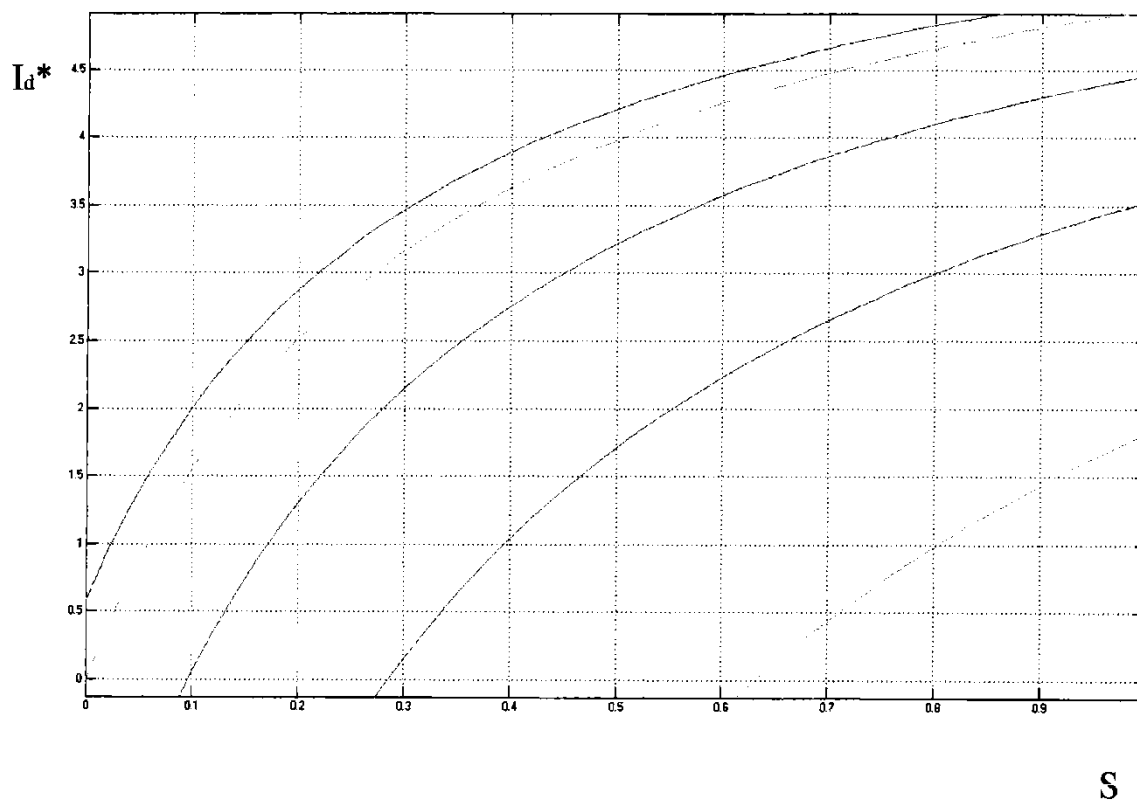


Рис 2.7- Сімейство швидкісних характеристик системи АВК.

**Висновки:**

1. Розраховано натягові зусилля та потужність, необхідну для роботи конвеєра. Встановлено, що загальна потужність привода повинна складати 630 кВт, щоб забезпечити запас на пікові навантаження.
2. У якості основних двигунів обрано два асинхронні. Кожен двигун має номінальну потужність 315 кВт, ККД – 92%, та синхронну швидкість 1000 об/хв.
3. Вибрано силові компоненти:
  - Вентильний каскад на базі діодів Д243-800-40.
  - Тиристри інвертора.
  - Трансформатор для забезпечення стабільного живлення роторного ланцюга.
4. Розроблено математичну модель механічних характеристик, яка підтвердила необхідність замкненої системи управління для стабільної роботи конвеєра у режимах змінного навантаження.

## **Розділ 3**

### **Розрахунок системи керування.**

### 3.1. Прямий пуск з пружними зв'язками.

Представимо розрахункову схему:

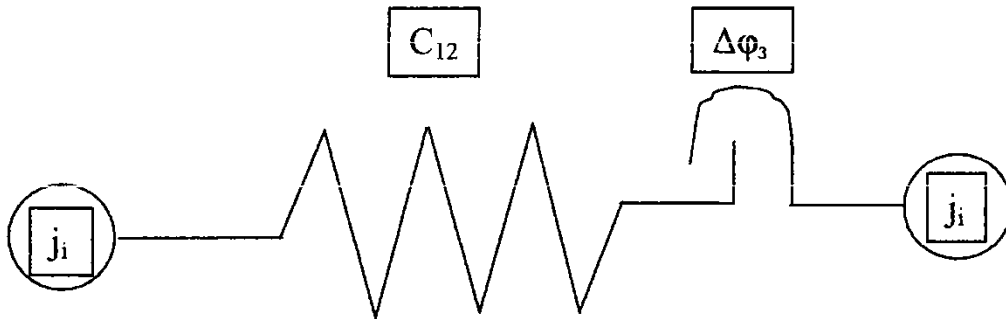


Рис 3.1 - Розрахункова двохмасова схема механічної частини.

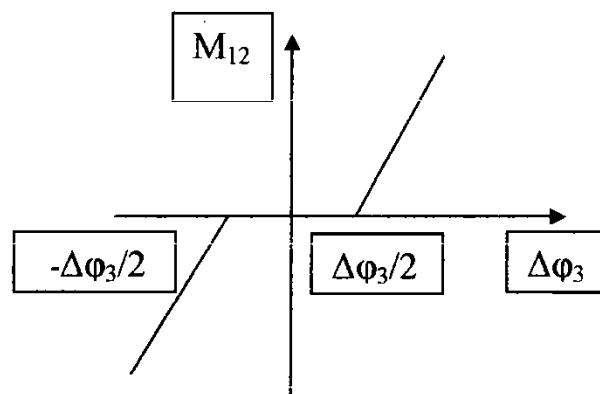


Рис 3.2 - Графік залежності  $M_{12} = f(\varphi_1 - \varphi_2)$ .

Рівняння руху для цієї системи в операторній формі має вигляд[4]

$$M_1 - M_{12} - M_{c1} = j_1 P \omega_1$$

$$M_{12} - M_{c2} = j_2 P \omega_2$$

(3.1)

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 \pm \Delta\varphi_3/2) \quad \text{при} \quad (\varphi_1 - \varphi_2) > \Delta\varphi_3/2$$

$$M_{12} = 0 \quad \text{при} \quad (\varphi_1 - \varphi_2) \leq \varphi_3/2$$

$$R_1 = r'_1 \cdot \kappa_T^2, \text{ Ом} \quad (3.2)$$

$$R_1 = 0.02 \cdot 11.54^2 = 2.66 \text{ Ом}$$

$$L_1 = \frac{x_1}{\omega}, \text{ мГн} \quad (3.3)$$

$$L_1 = \frac{56.318}{314} = 0.179 \text{ мГн} = \frac{0.0897}{2} = 0.042 \text{ мГн}$$

$$x_1 = x_p \cdot \kappa_T^2 = 0.42 \cdot 11.65^2 = 56.318$$

$$L = \frac{L_1}{2} = \frac{0.179}{2} = 0.0897 \text{ мГн}$$

$$r'_2 = r_2 \cdot \kappa_T^2, \text{ Ом} \quad (3.4)$$

$$r'_2 = 0.0233 \cdot 11.54^2 = 3.025 \text{ Ом}$$

$$L_M = \frac{\frac{U_\Lambda}{\sqrt{3}}}{I_{\text{н}} \cdot \omega}, \text{ мГн} \quad (3.5)$$

$$L_M = \frac{\frac{6000}{\sqrt{3}}}{15 \cdot 314} = 0.88 \text{ мГн}$$

Проведемо моделювання.



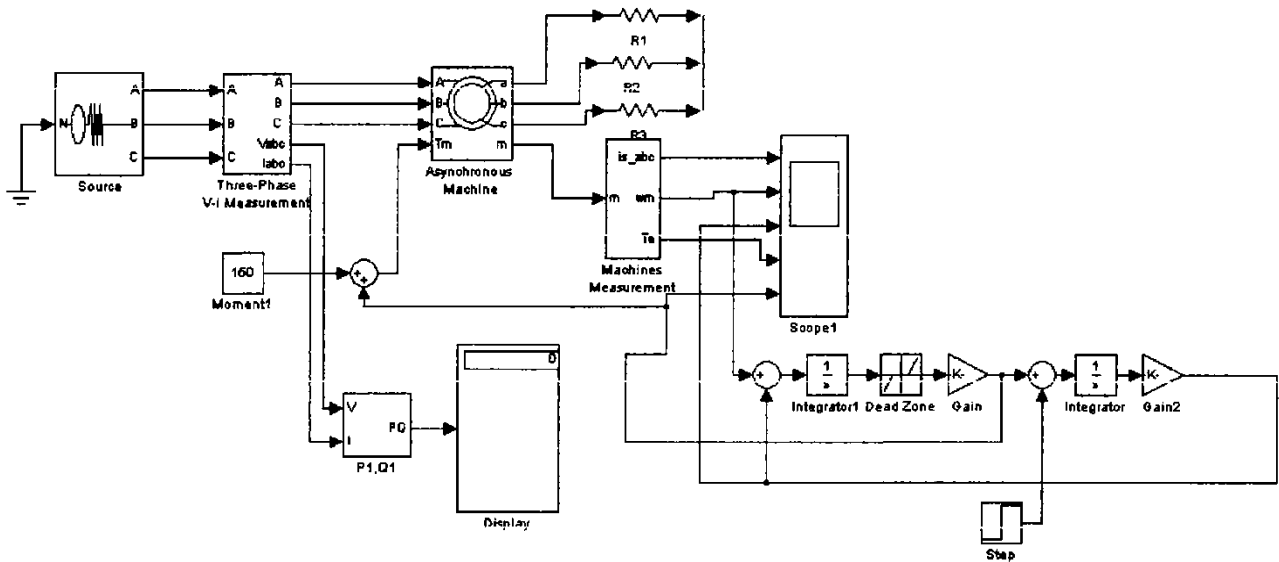


Рис 3.3- Математична модель прямого пуску АД с фазним тором .

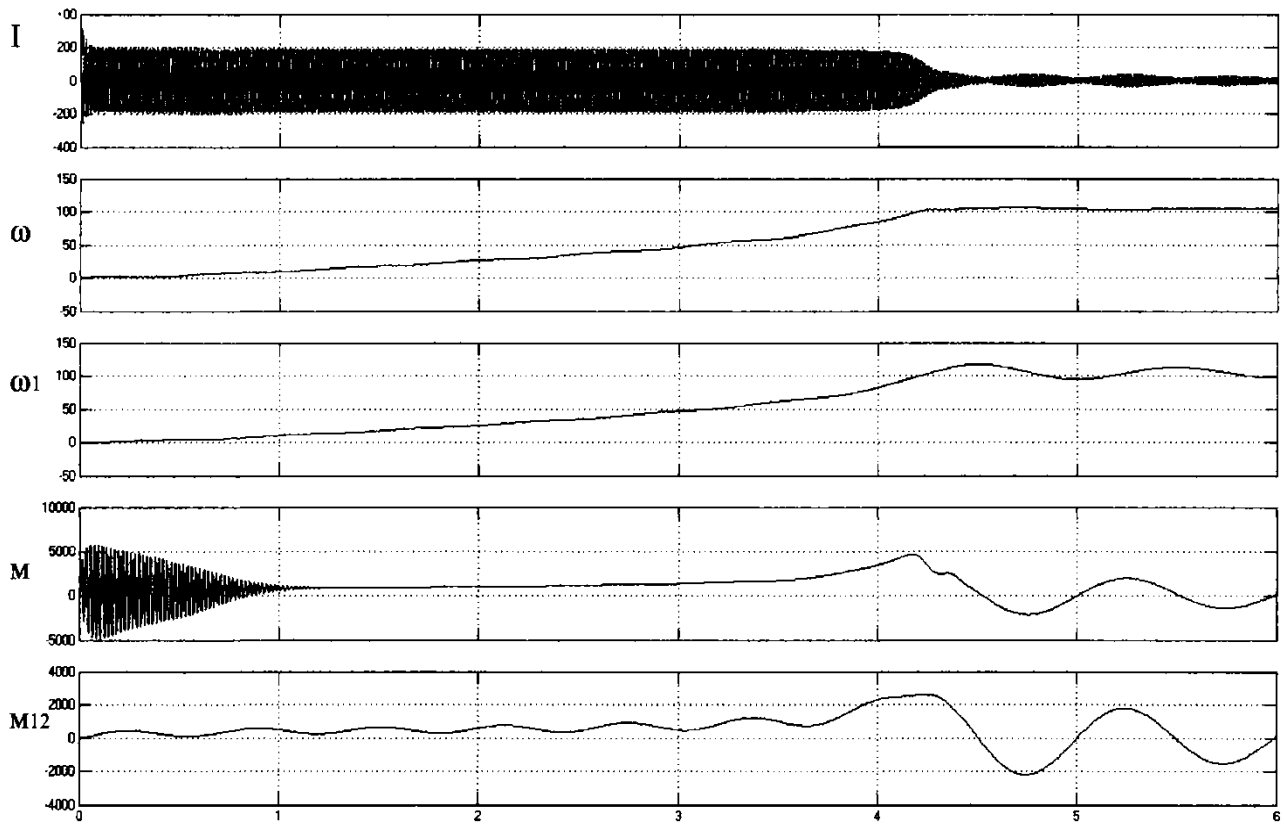


Рис. 3.4- Осциллограмма пуска АД з урахуванням кінематичних зв'язків.

### 3.2. Структура системи керування.

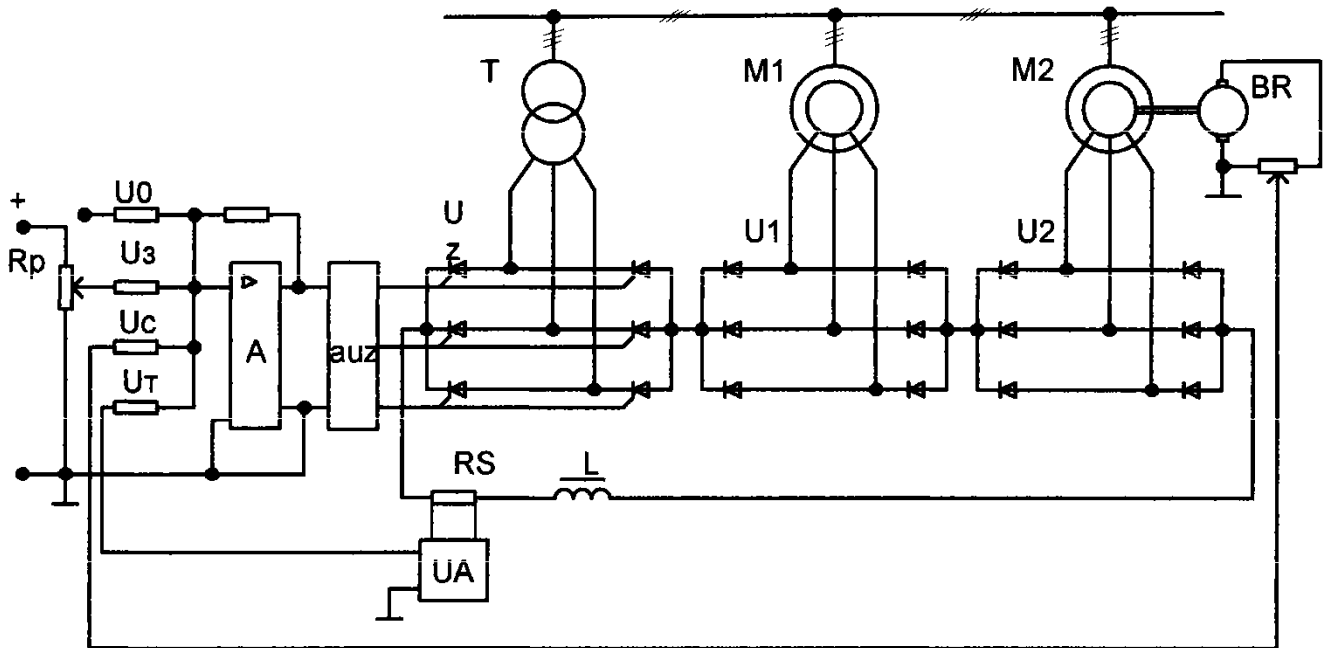
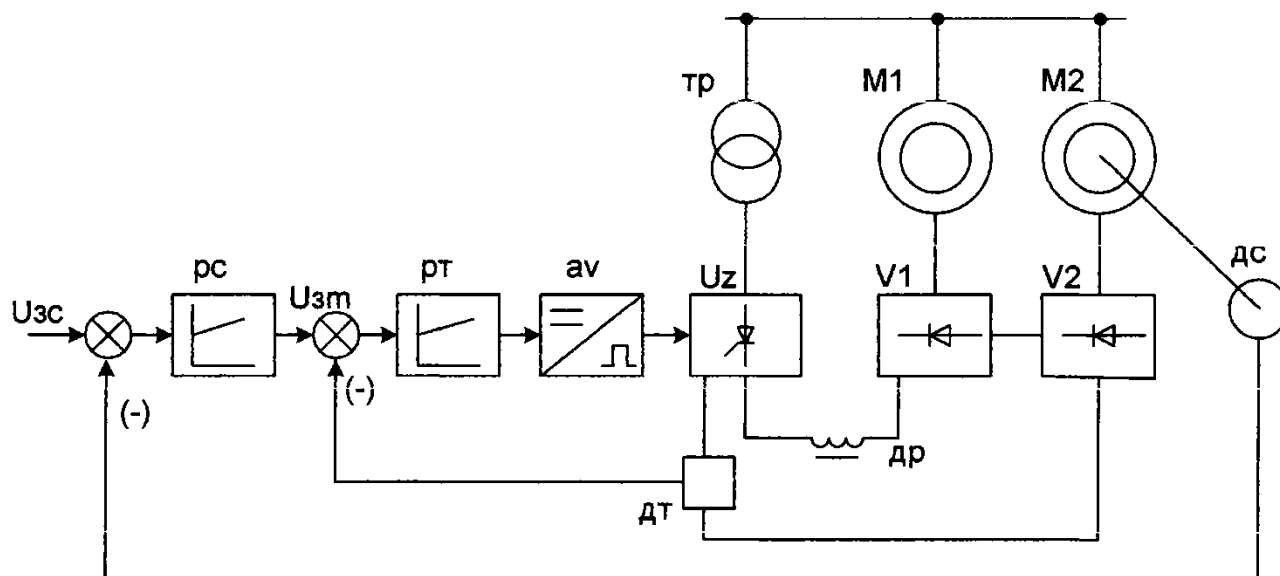


Рис. 3.5- Функціональна схема АВК.



### 3.3. Розрахунок основних параметрів.

Визначим індуктивність випрямленого ланцюга ротора АД.

Е.Р.С. інвертування[3]:

$$U_{yn} = e_n + T_n \frac{de_n}{dt}, \text{В} \quad (3.6)$$

де:

$U_{yn}$  - напруга керування інвертора;

$k_n$  - коефіцієнт посилення інвертування і СУИ;

$T_n$  - постійна часу інвертування, визначувана в основному фільтром СУИ.

$$e_{d0} - e_n = i_d r_s + L_s \frac{di_d}{dt} \quad (3.7)$$

$$R_s = 2R_1' s + \frac{mX_3}{2\pi} s + 2R_2 + R_p + 2R_T + \frac{mX_T}{2\pi} \quad (3.8)$$

$$L_s = L_d + L_a = L_d + L_p + L_T \quad (3.9)$$

де:

$X_d, L_d$  -  
рівні  $X_d = X_1 + X_2; L_d = X_d / (2\pi f_c)$ ;

$R_1, X_1$  - активне і індуктивне опори;

$R_2, X_2$  - активне і індуктивне опори;

$$M = \frac{1}{\omega_0} \left( E_{d0} - \frac{mX_d}{2\pi} i_d \right) i_d \quad (3.10)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.11)$$

$$M = \frac{1}{(E_{d0} - \frac{m x_d}{s} I_{d, \text{об}})} i_d = c i_d \quad (3.12)$$

### 3.4. Структура системи керування з регуляторами.

$$W_{\text{ПТ}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p} * \frac{R_s(T_s p + 1)}{\kappa_H} * \frac{1}{\kappa_T} = \frac{R_s T_s}{2T_{\mu} \kappa_H \kappa_T} + \frac{R_s}{2T_{\mu} \kappa_H \kappa_T p} \quad (3.13)$$

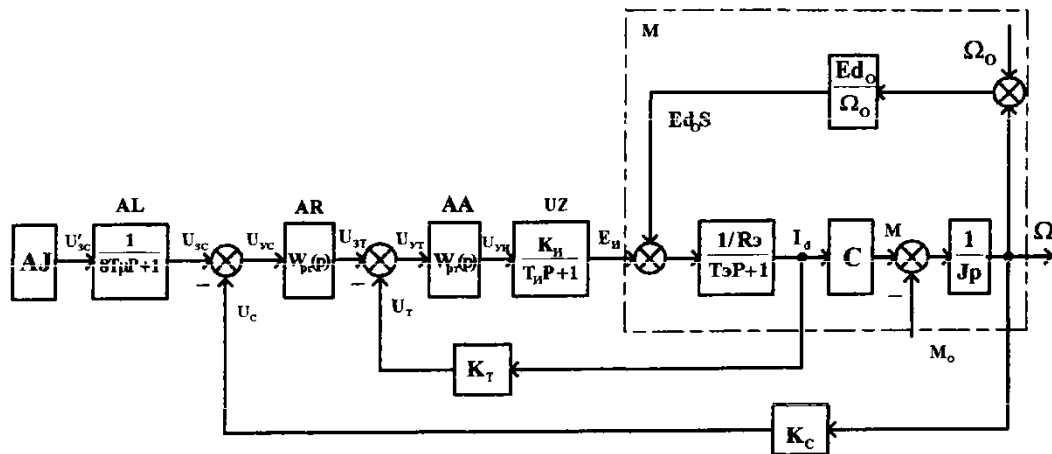


Рис 3.7- Структурна схема АВК з підлеглим регулюванням координат.

$$W_{\text{о.КТ}}(p) = \frac{I_d}{U_{\text{ст}}} = \frac{1}{(2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1)\kappa_T} \quad (3.14)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{1}{2^2 T \mu p} * \frac{Jp}{c} * \frac{k_T}{k_c} = \frac{Jk_T}{4T\mu * C * k_c} \quad (3.15)$$

$$W_{o.kc}(p) = \frac{\Omega}{U_{3c}} = \frac{1}{(4T\mu p(2T\mu p(T\mu p + 1) + 1) + 1)k_c} \quad (3.16)$$

$$\omega = \frac{U_0 - U_{3c}}{k_c} - \frac{4T\mu E_{d0}}{J} M_c \quad (3.17)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{(8T\mu p + 1)Jk_T}{32T_\mu^2 p c k_c} \quad (3.18)$$

$$\omega = \frac{(U_0 - U_{3c})}{k_c} \quad (3.19)$$

### 3.5. Складові динамічної моделі.

$$T_e = L_e / R_e = 0,0096 / 0,5318 = 0,01808 \text{ с},$$

де:

$L_e$  - сумарна індуктивність роторного ланцюга

$$L_e = 2(L_T + L_p) + L_{др}, \text{ Гн} \quad (3.2)$$

$$L_e = 2(0,00021 + 0,00135) + 0,00325 = 0,0096 \text{ Гн},$$

де:

$L_T$  - індуктивність;

$L_p$  - індуктивність ротора АД;

$L_{др}$  - індуктивність дроселя.

$$L_T = x_T / \omega \text{ Гн}; \quad (3.22)$$

$$L_T = 0,066 / 314 = 0,00021 \text{ Гн};$$

$$L_p = x_p / \omega \text{ Гн}; \quad (3.23)$$

$$L_p = 0,4229 / 314 = 0,00135 \text{ Гн}.$$

Сумарний опір:

$$R_e = 2(r_T + r_1 + r_2) + 3/\pi (x_T + x_p) + 2R_{др}, \text{ звідки}$$

(3.24)

Коефіцієнт моменту:

$$k_M = \frac{3\sqrt{2}E_{2p}}{\pi\omega} \quad (3.25)$$

$$k_M = \frac{3\sqrt{2} * 1040}{\pi * 103.15} = 13.575$$

Коефіцієнт посилення інвертування:

$$k_n = \frac{E_{di}}{10} \quad (3.26)$$

$$k_n = \frac{1.35 * 1040 * 1}{10} = 140.4$$

Прийmemo  $S = 0.7$ . Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$k_{or} = \frac{10}{2 * I_d} \quad (3.27)$$

$$k_{or} = \frac{10}{2 * 430.2} = 0.01161$$

$$I_d = \frac{I_{pH}}{0.86} \quad , \text{ A} \quad (3.28)$$

$$I_d = \frac{370}{0.86} = 430.2 \text{ A}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$k_{\omega} = \frac{10}{\omega_n} = \frac{10}{103.15} = 0.0969 \quad (3.29)$$

Визначимо чисельне значення передавальних функцій регуляторів. Регулятор струму[5]:

$$W(p)_{or} = \frac{R_s T_s}{2T\mu K_n K_{or}} + \frac{R_s}{2T\mu K_n K_{or} p} \quad (3.30)$$



$$W(p)_{\text{пр}} = \frac{0.5318 * 0.01808}{2 * 0.01 * 140.4 * 0.01161} + \frac{0.5318}{2 * 0.01 * 0.01161 * p}$$

Пропорційна частина регулятора струму:

$$W_{\text{п}}(p)_{\text{пр}} = 0.295$$

Інтегральна частина регулятора струму:

$$W_{\text{и}}(p)_{\text{пр}} = \frac{16.312}{p}$$

Регулятор швидкості:

$$W(p)_c = \frac{jk_{o\Gamma}}{4T_{\mu}c_m k_{oc}} \quad (3.31)$$

$$W(p)_c = \frac{0.01161 * \tau}{4 * 0.01 * 13.575 * 0.0969} = 0.22\tau ,$$

### 3.6. Динамічні режими.

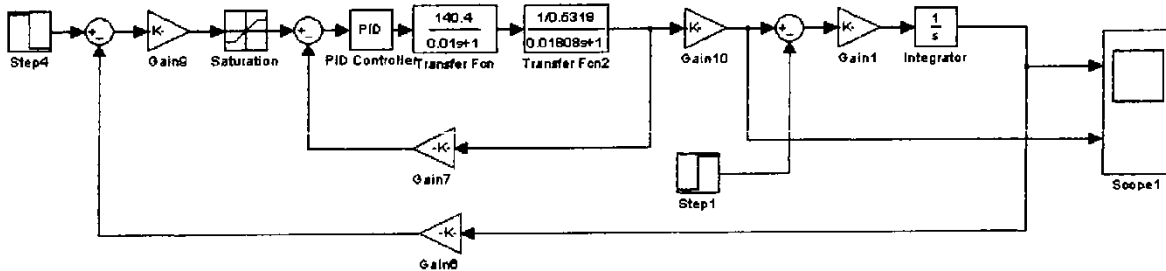


Рис 3.8- Математична модель АВК з підлеглим регулюванням координат.

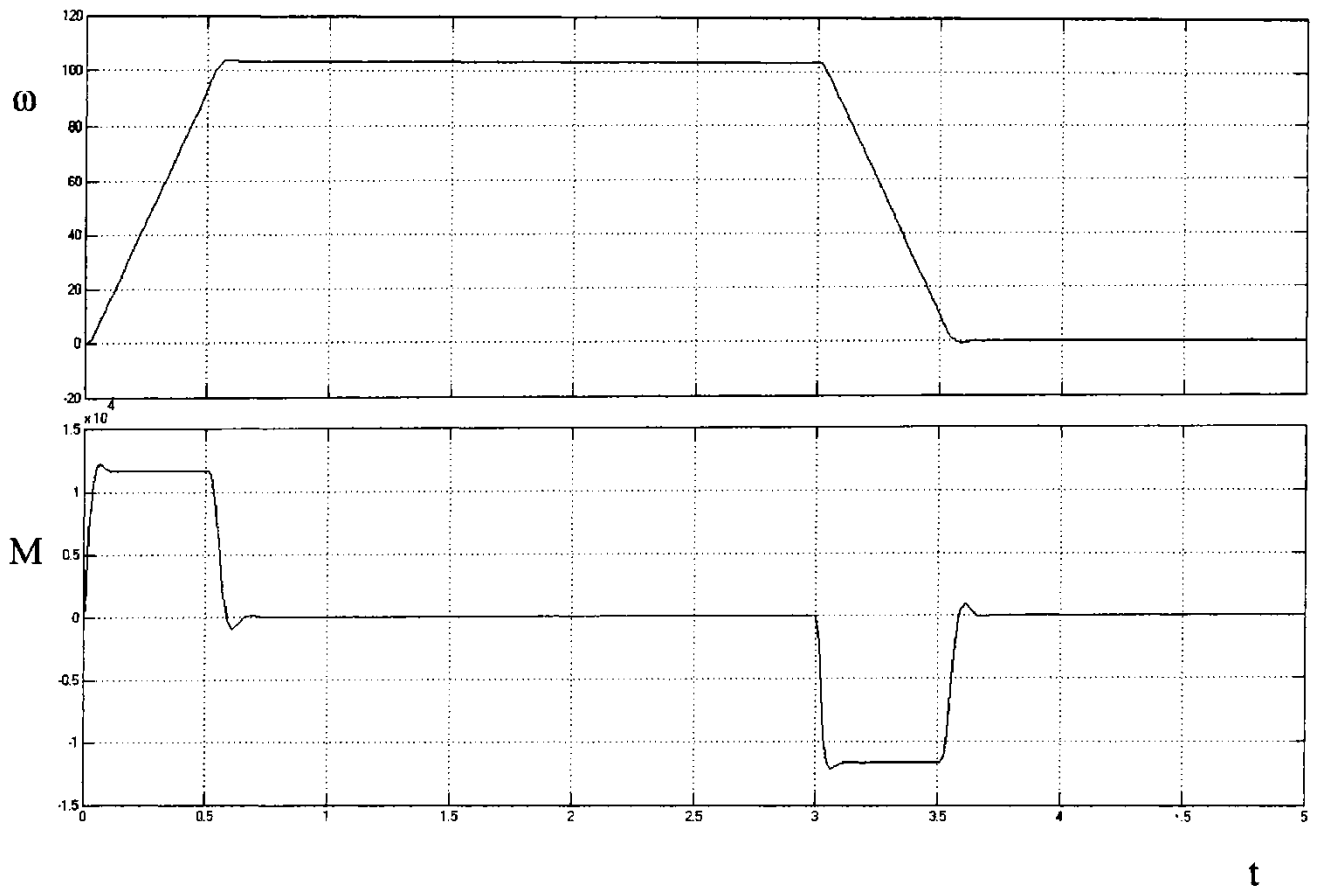


Рис 3.9- Осцилограма пуску і зупинки замкнутої системи АВК.

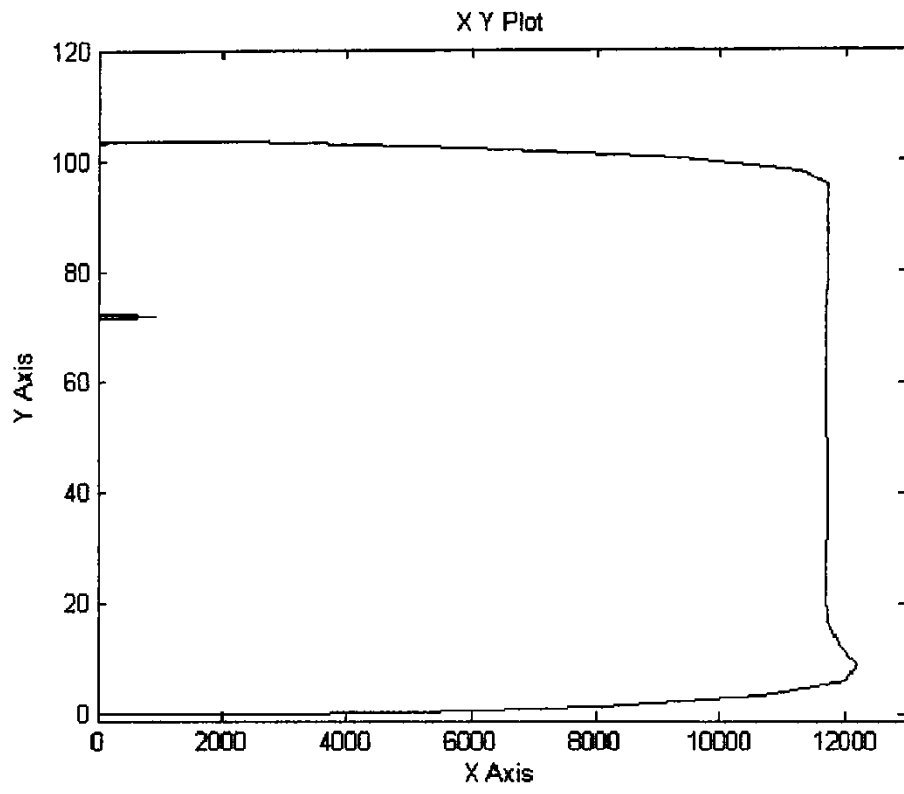
$$\omega = 104 \text{ рад/с.}$$

характеристика динамічних режимів:

$$\Delta := \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_1} \cdot 100\%$$

$$\Delta = 3,36\%$$

ω



M

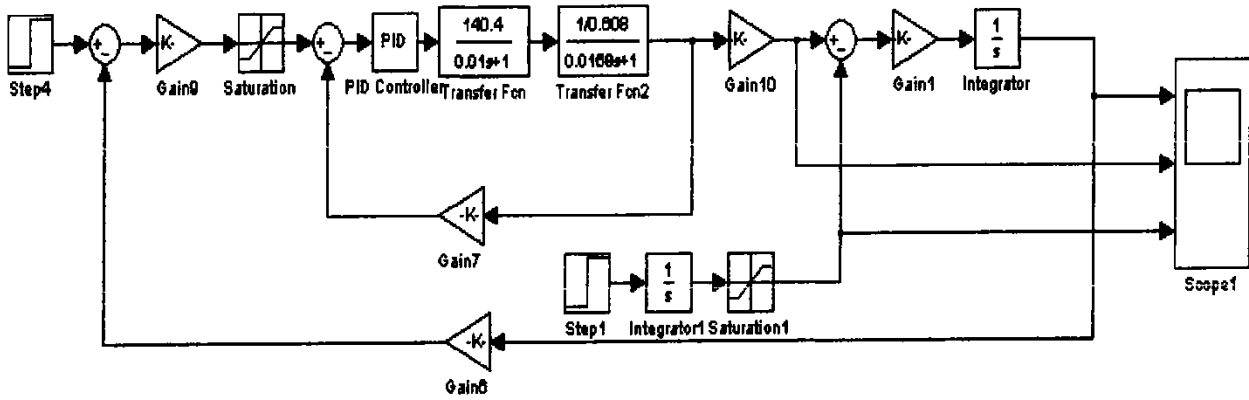


Рис 3.11- Математична модель системи АВК з поступовим завантаженням конвеєра.

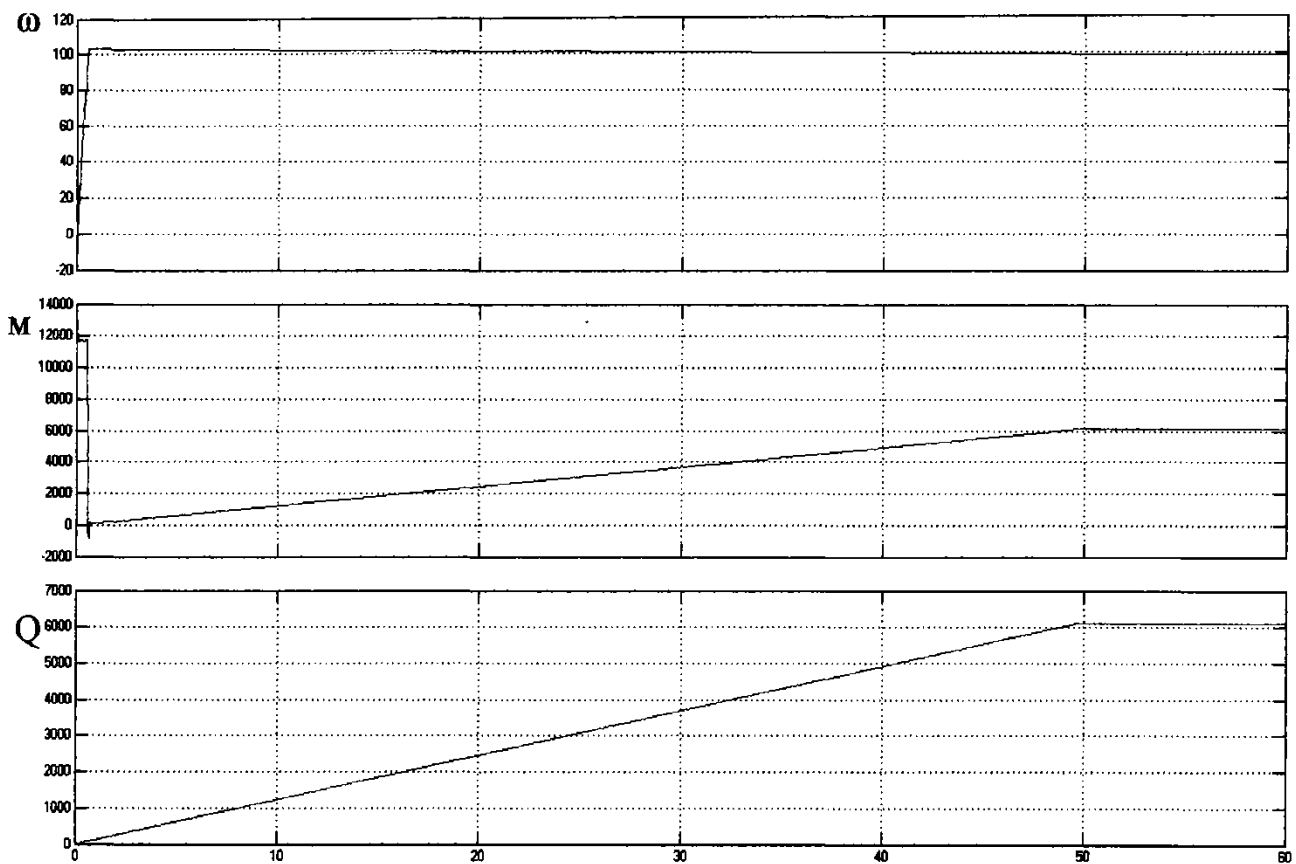


Рис 3.12- Осцилограма з поступовим завантаженням конвеєра

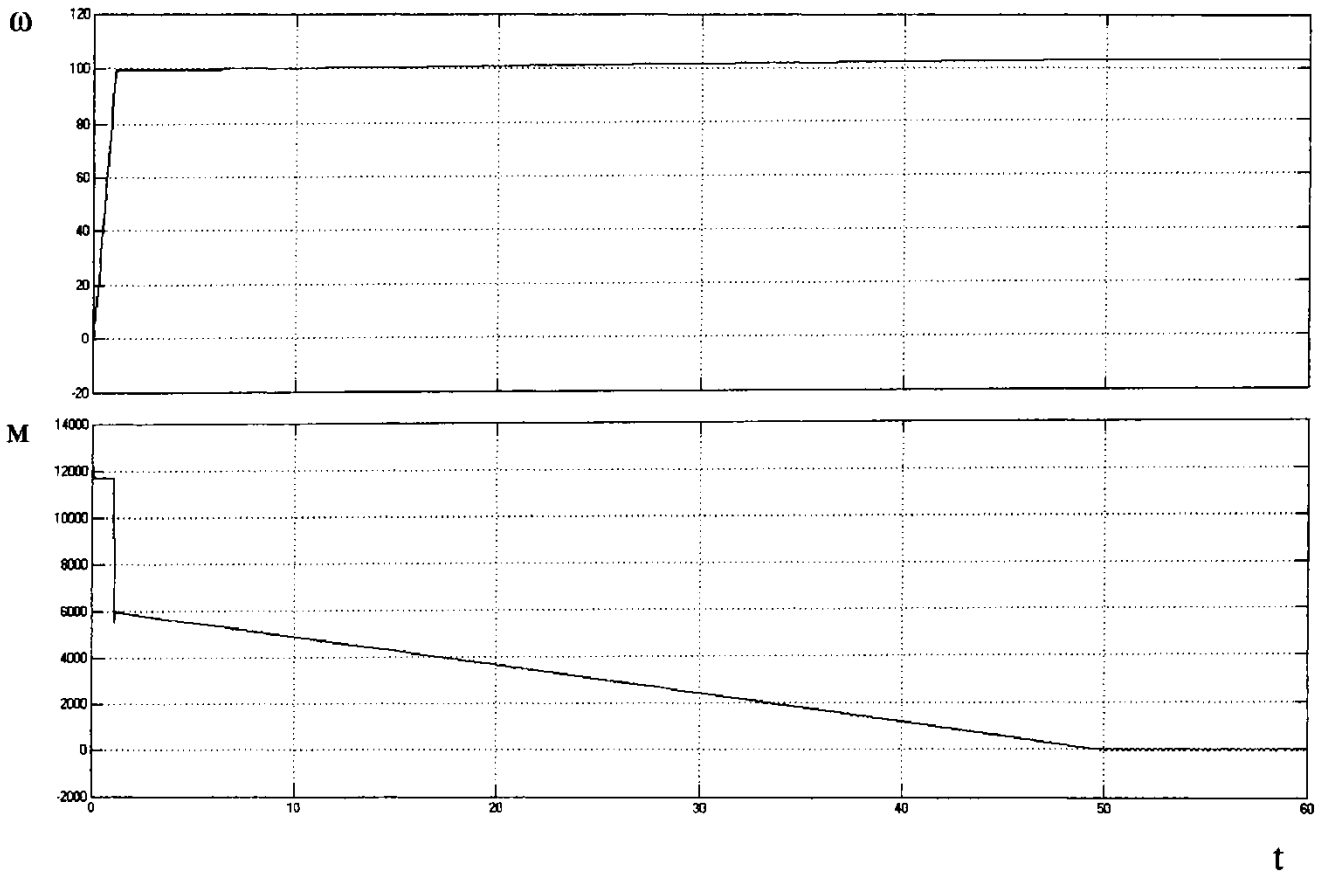


Рис 3.13- Осцилограма з поступовим розвантаженням конвеєра.

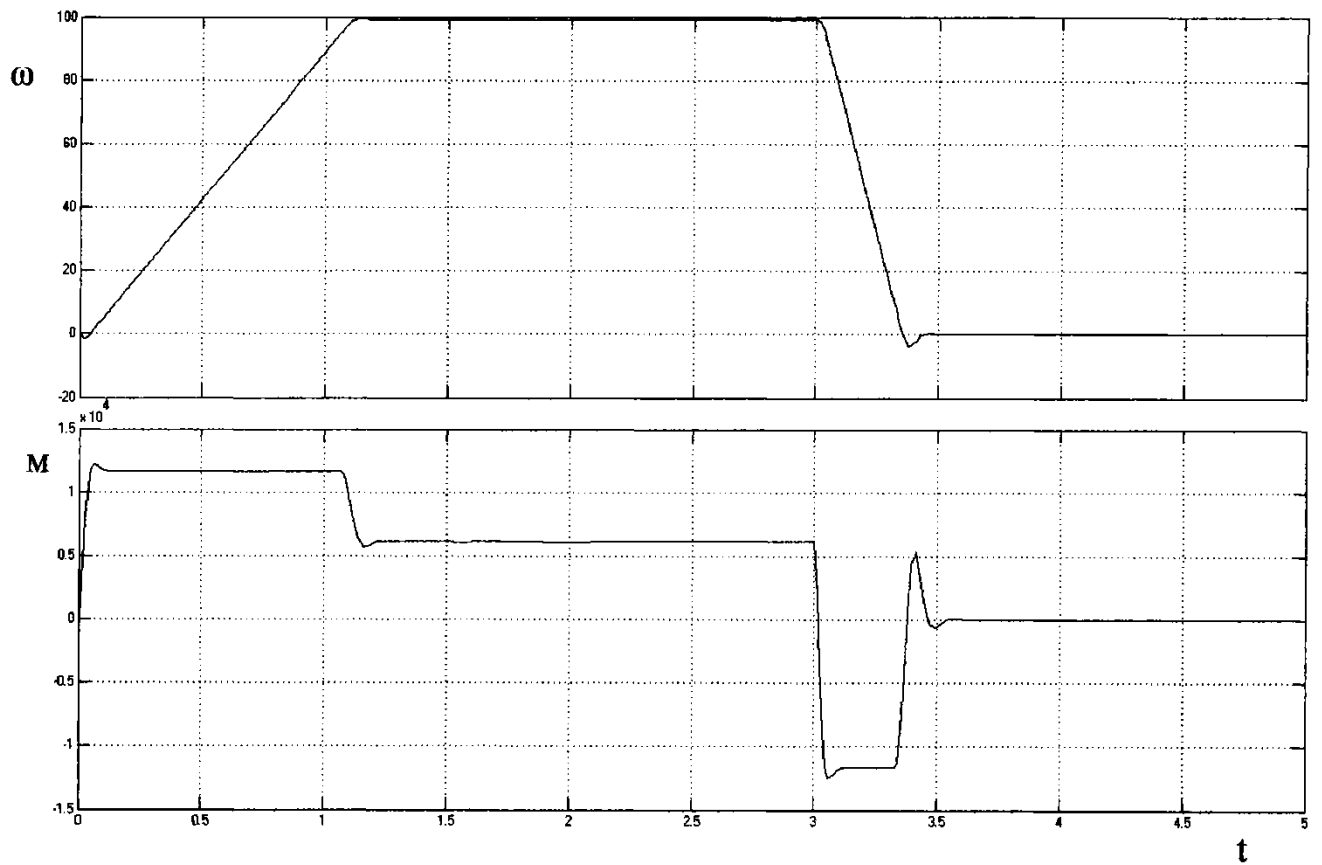


Рис 3.14- Осцилограма пуску і зупинки конвеєра під навантаженням.

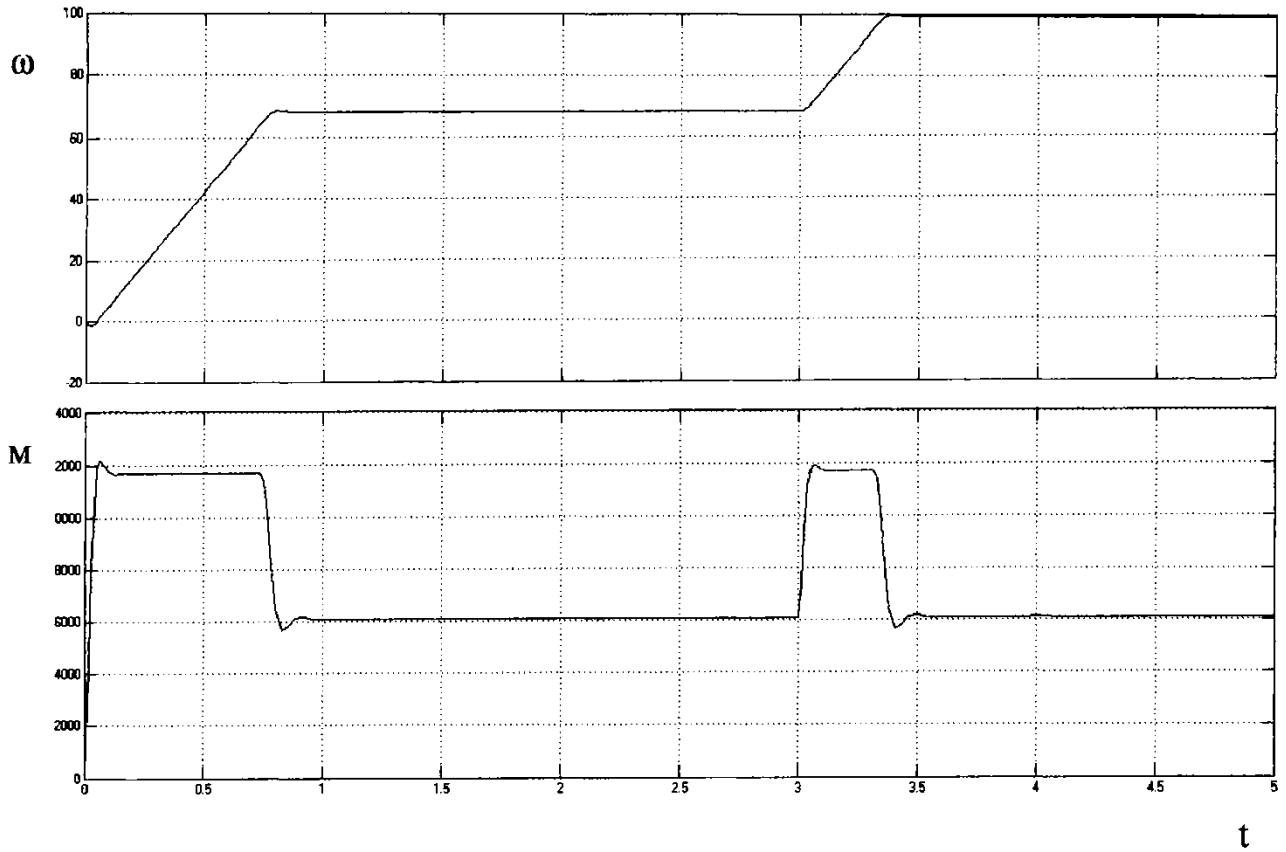


Рис 3.15- Осцилограма пуску конвейера під навантаженням і подальшим збільшенням швидкості.

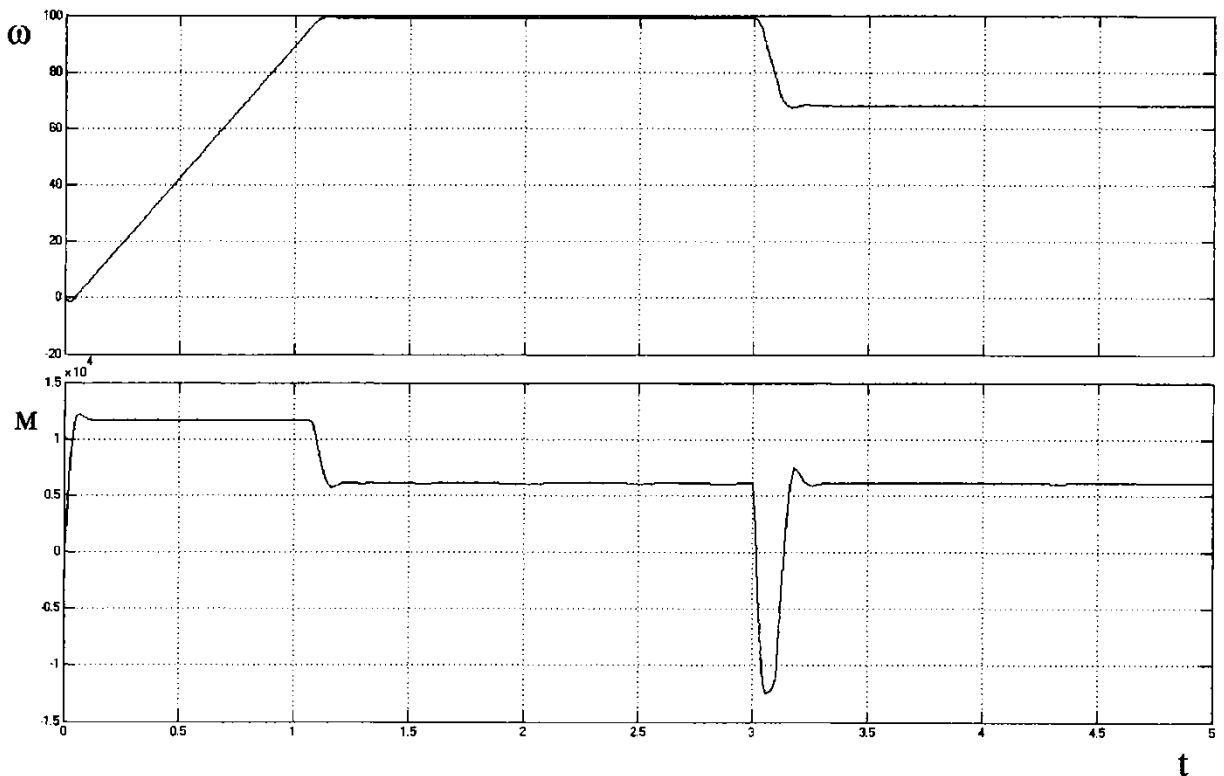


Рис 3.16- Осцилограма пуску конвейера під навантаженням і подальшим зменшенням швидкості.

## Висновки:

1. Аналіз динамічних режимів показав, що пуск асинхронних двигунів без спеціального управління призводить до коливань натягу стрічки через пружні деформації, а також значного зносу вузлів.
2. Для усунення цих проблем запропоновано використати замкнуту систему автоматичного управління з підлеглим регулюванням, яка забезпечує:
3. стабільну швидкість руху конвеєра;
4. мінімальне перерегулювання під час змін навантаження;
5. рівномірний розподіл зусиль між двигунами.
6. Запропонована функціональна схема управління включає:
7. Зворотний зв'язок за швидкістю, який забезпечує стабільність динамічних характеристик.
8. Позитивний зворотний зв'язок за струмом для підвищення точності регулювання.
9. Розроблені передатні функції регуляторів дозволили оптимізувати роботу САУ для забезпечення точності регулювання в межах 5%.
10. Аналіз кривих перехідних процесів показують правильність розрахунків та настройки регуляторів.

**Розділ 4**  
**Дослідження перехідних процесів**  
**з пружним зв'язком.**



## 4.1. Дослідження перехідних процесів.

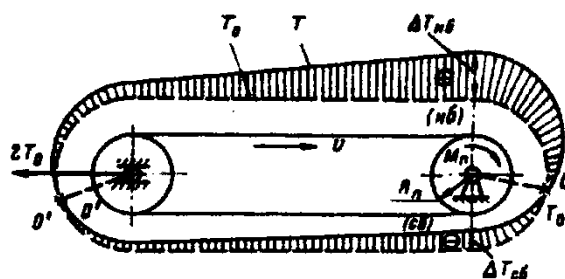


Рис 4.1- Еюра натягнень конвеєра в режимі пуску.

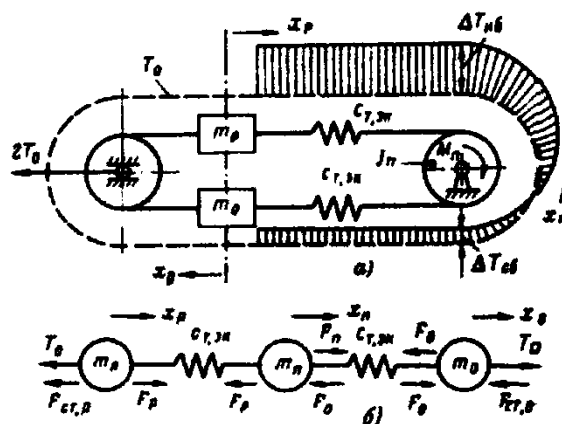


Рис 4.2- Моменти у стрічці

$$\begin{aligned}
 F_n - c_{r,zn}(x_n - x_0) - c_{r,zn}(x_n - x_p) &= m_n \ddot{x}_n; \\
 c_{r,zn}(x_n - x_0) - F_{ct0} + T_0 &= m_0 \ddot{x}_0; \\
 c_{r,zn}(x_n - x_p) - F_{ct,p} - T_0 &= m_p \ddot{x}_p
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 M - M_{12} - M_{13} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\
 M_{12} - M_{ctp} - M_o &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\
 M_{13} - M_{cto} + M_o &= J_3 \frac{d\omega_3}{dt}; \\
 M_{12} &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); \\
 M_{13} &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_3);
 \end{aligned}$$

$$\varphi_1 = \frac{x_n}{\rho}, \varphi_2 = \frac{x_p}{\rho}, \varphi_3 = \frac{x_o}{\rho}$$

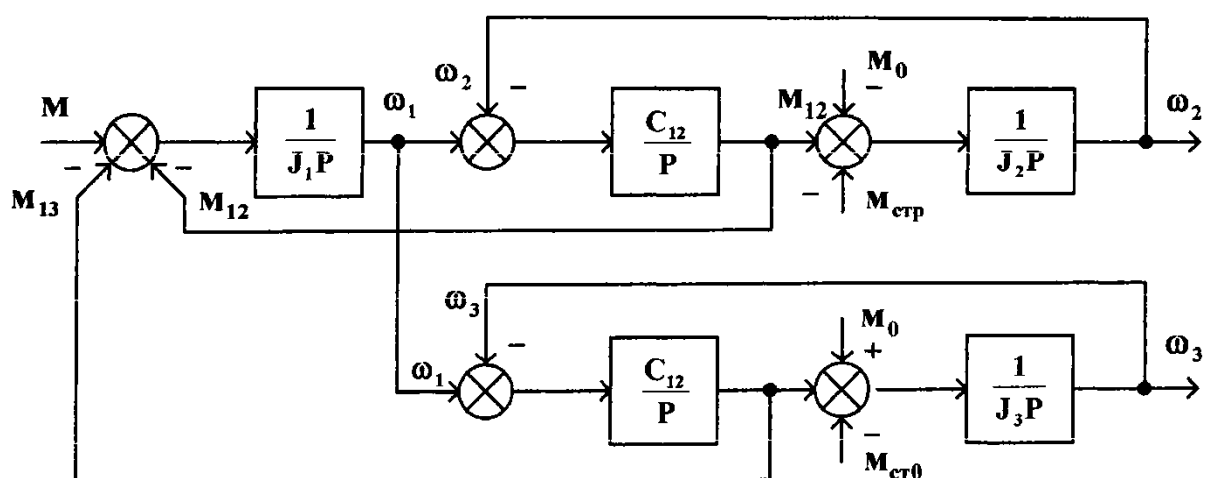


Рис 4.3- Структурна схема.

З урахуванням жорсткості валу  $C_{11}$  електродвигуна, махових мас двигуна  $J_1'$  і приводного барабана  $J_1$ , зазорів в зубчатих передачах  $\Delta\varphi_1$ , а також жорсткості транспортерної стрічки  $C_{12}$  і моментів інерції їх складових частин  $J_2$  і  $J_3$  структурна схема багатомасової механічної частини електроприводу конвеєра прийме вигляд (рис. 4.5).

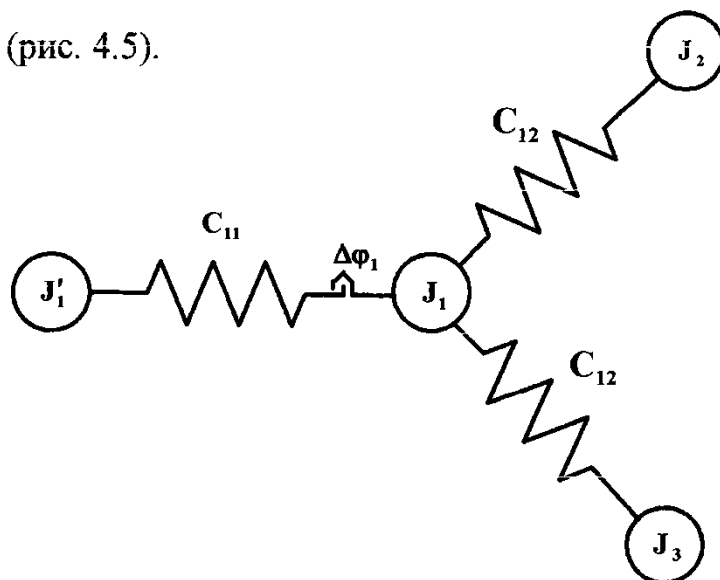


Рис 4.4- Трьохмасова розрахункова схема механічної частини електроприводу конвеєра.

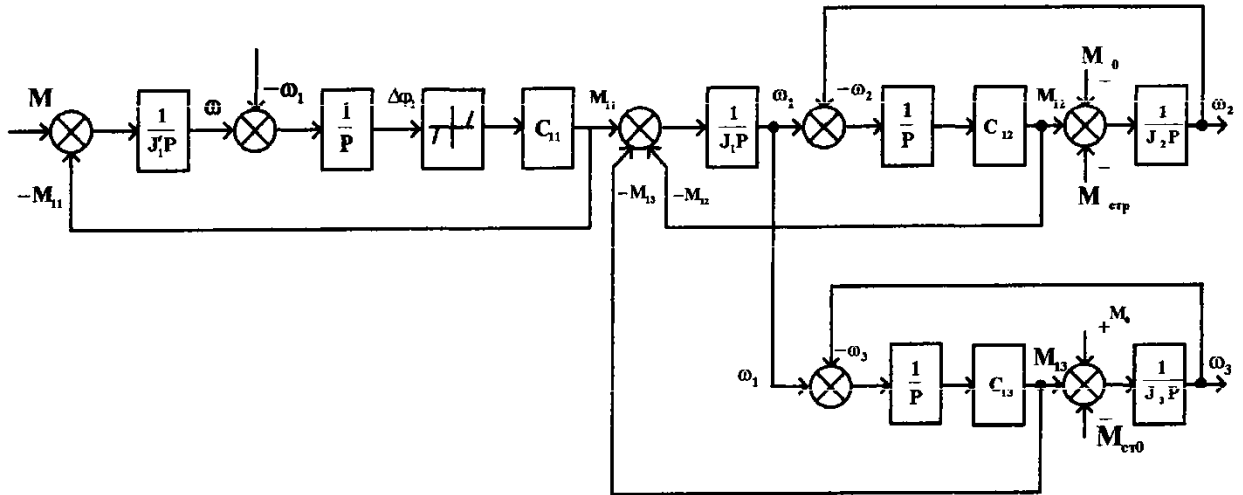


Рис 4.5- Структурна схема трьохмасової механічної частини електроприводу конвеєра.

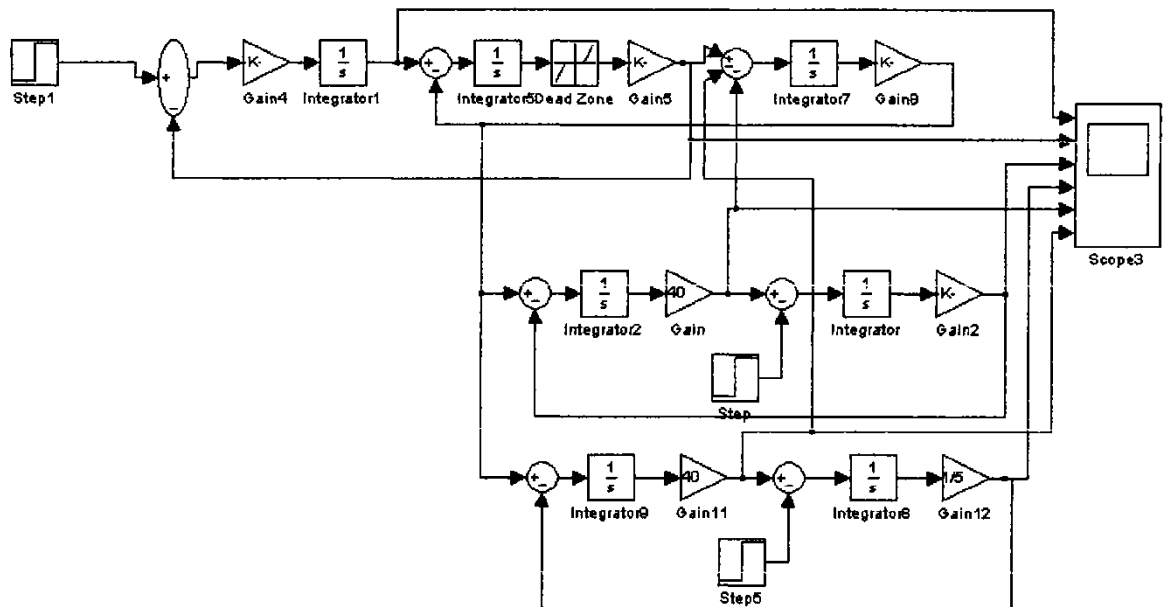


Рис 4.6- Математична модель трьохмасової механічної частини електроприводу конвеєра.

## 4.2. Розрахунок моменту.

$$m^* = \frac{Q}{3600 \cdot V} = \frac{4930 \cdot 10^3}{3600 \cdot 2.32} = 590.28 \text{ кг/м} \quad (4.2)$$

$$m_p^* = m^* + m_n^* = 590.28 + 78.5 = 688.8 \text{ кг/м}, \quad (4.3)$$

$$m_p = m_p^* \cdot l = 688.8 \cdot 115.6 = 77016.5 \text{ кг}, \quad (4.4)$$

$$m_x = m_n^* \cdot l = 78.5 \cdot 115.6 = 9040 \text{ кг} \quad (4.5)$$

$$\rho = \frac{V}{\omega_n} = \frac{2.32}{103.15} = 0.02249. \quad (4.6)$$

$$J_2 = m_p \rho^2 = 77016.5 \cdot 0.02249^2 = 38.95 \quad (4.7)$$

$$J_3 = m_x \rho^2 = 9040 \cdot 0.02249^2 = 4.57 \quad (4.8)$$

$$J_1' = J_{об} \cdot 2 = 19 \cdot 2 = 38 \quad (4.9)$$

### 4.3. Динаміка електроприводу.

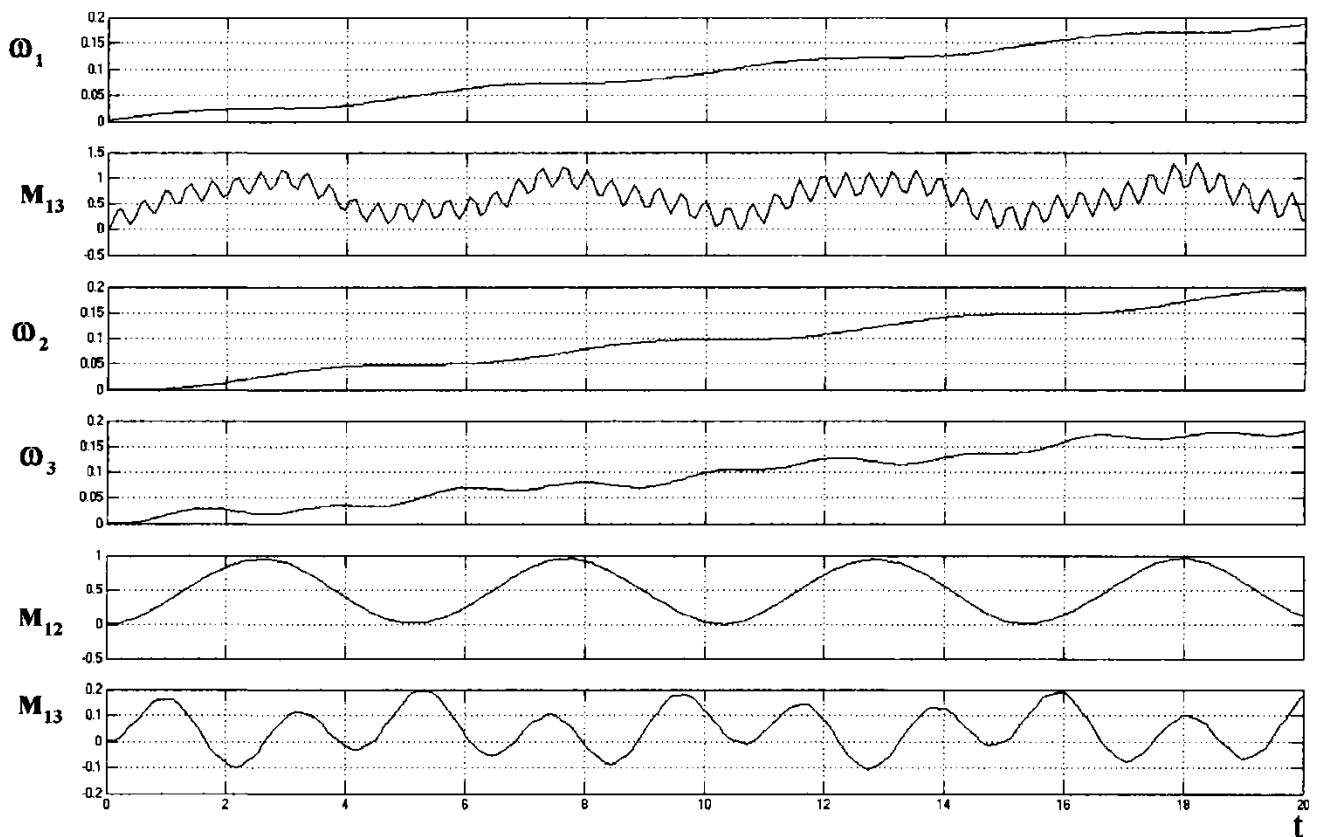


Рис 4.7- Осцилограми перехідних процесів трьохмасової механічної системи електропривода конвеєра при ступінчастій дії моменту.

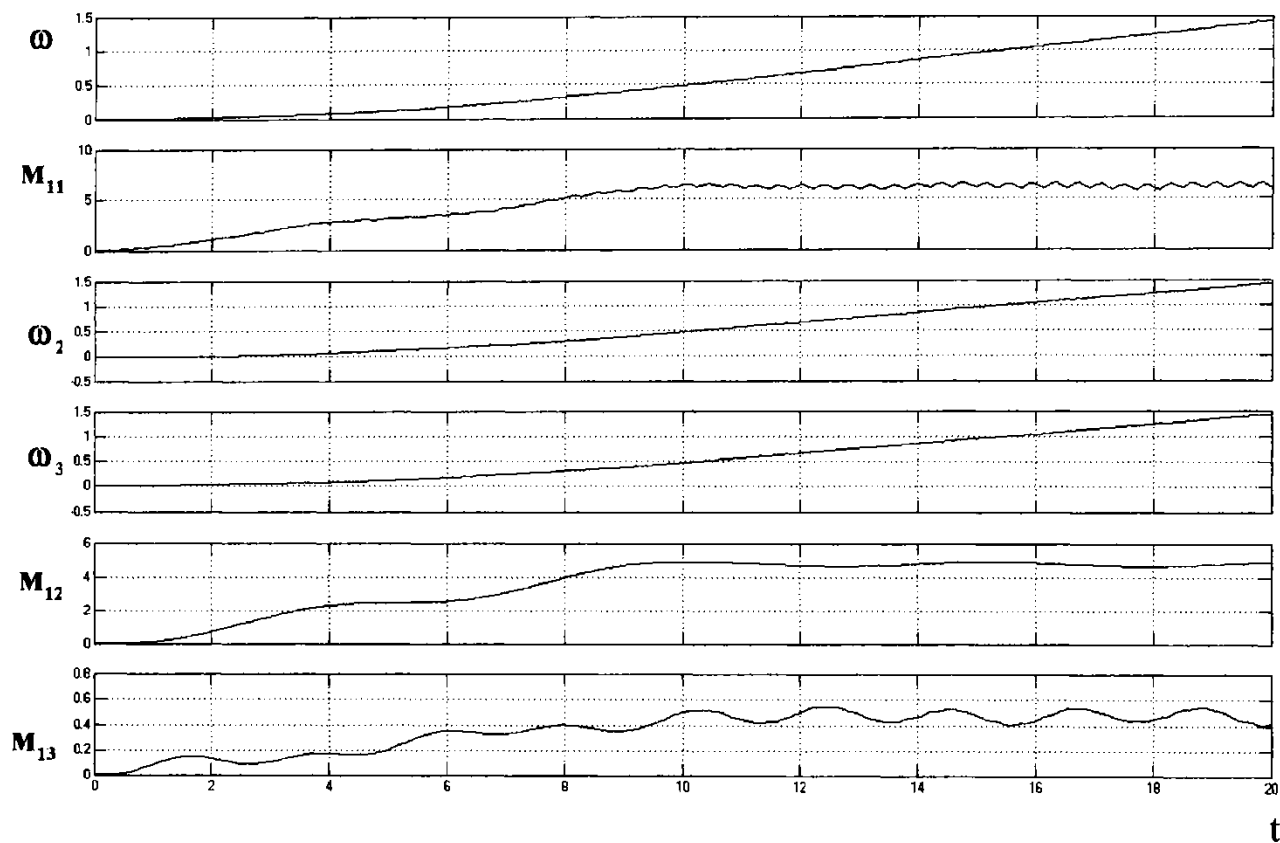


Рис 4.8- Осцилограма перехідних процесів трьохмасової механічної системи при лінійно зростаючому моменті.

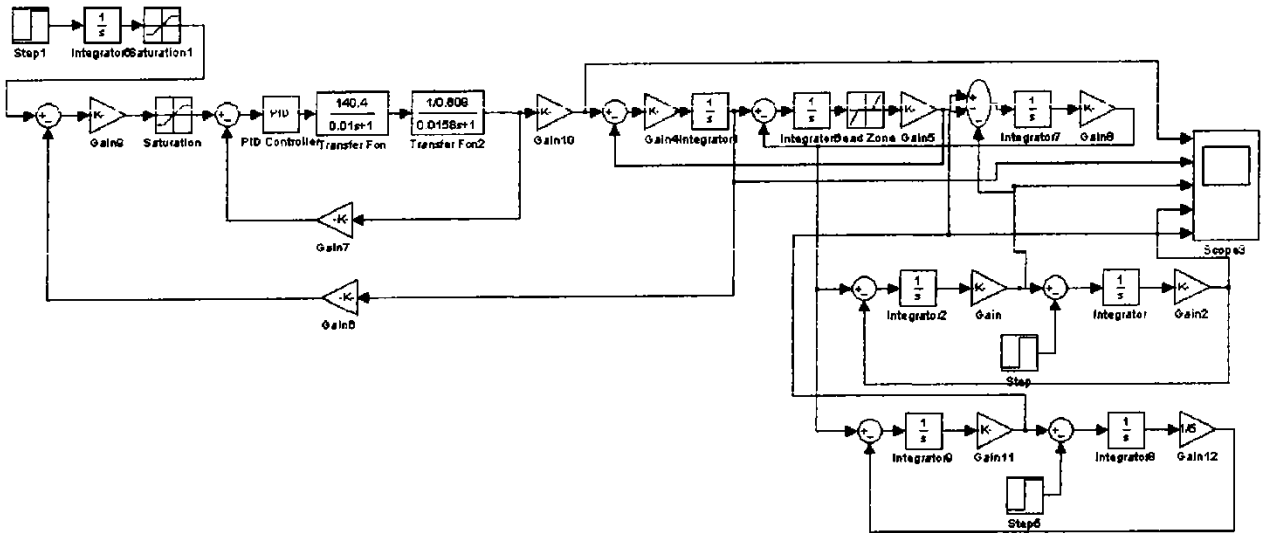


Рис 4.9- Математична модель системи АВК з урахуванням трьохмасової механічної частини.

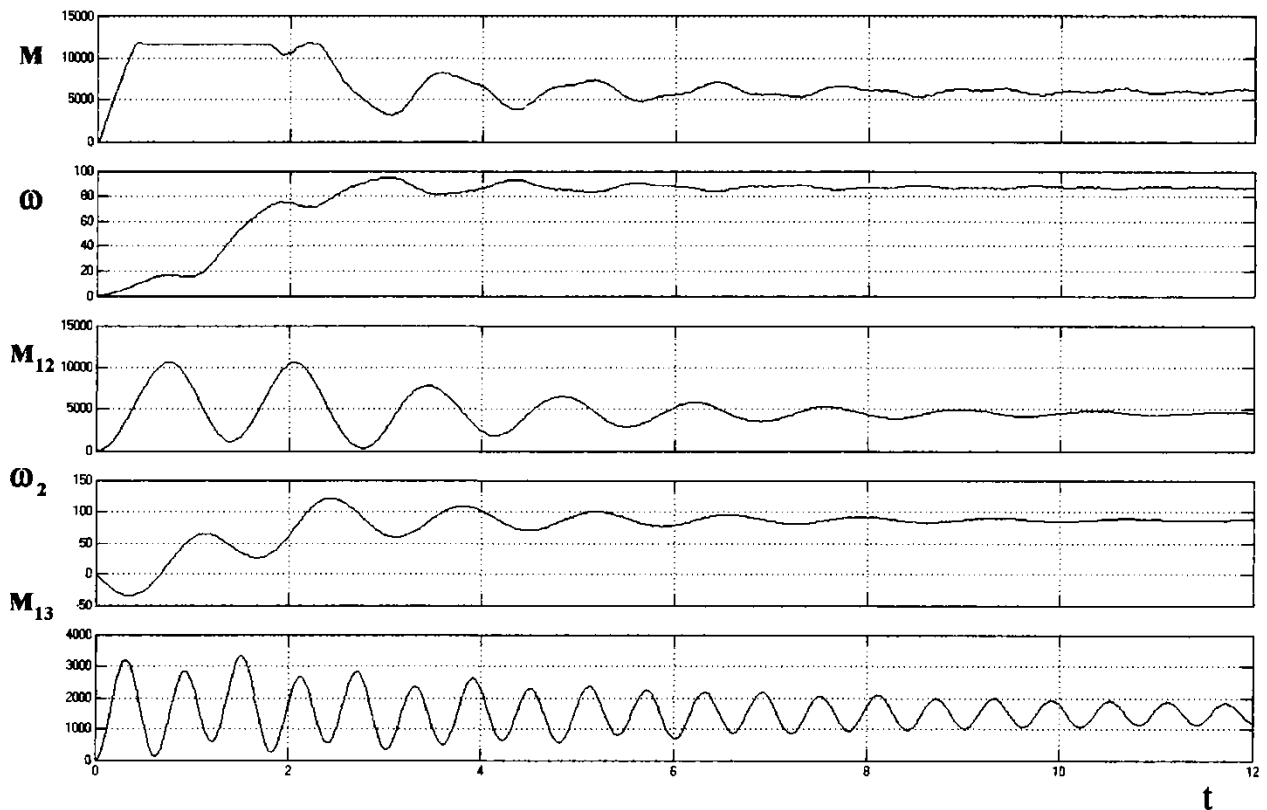


Рис 4.10- Осцилограми перехідних процесів при ступінчастому завданні сигналу

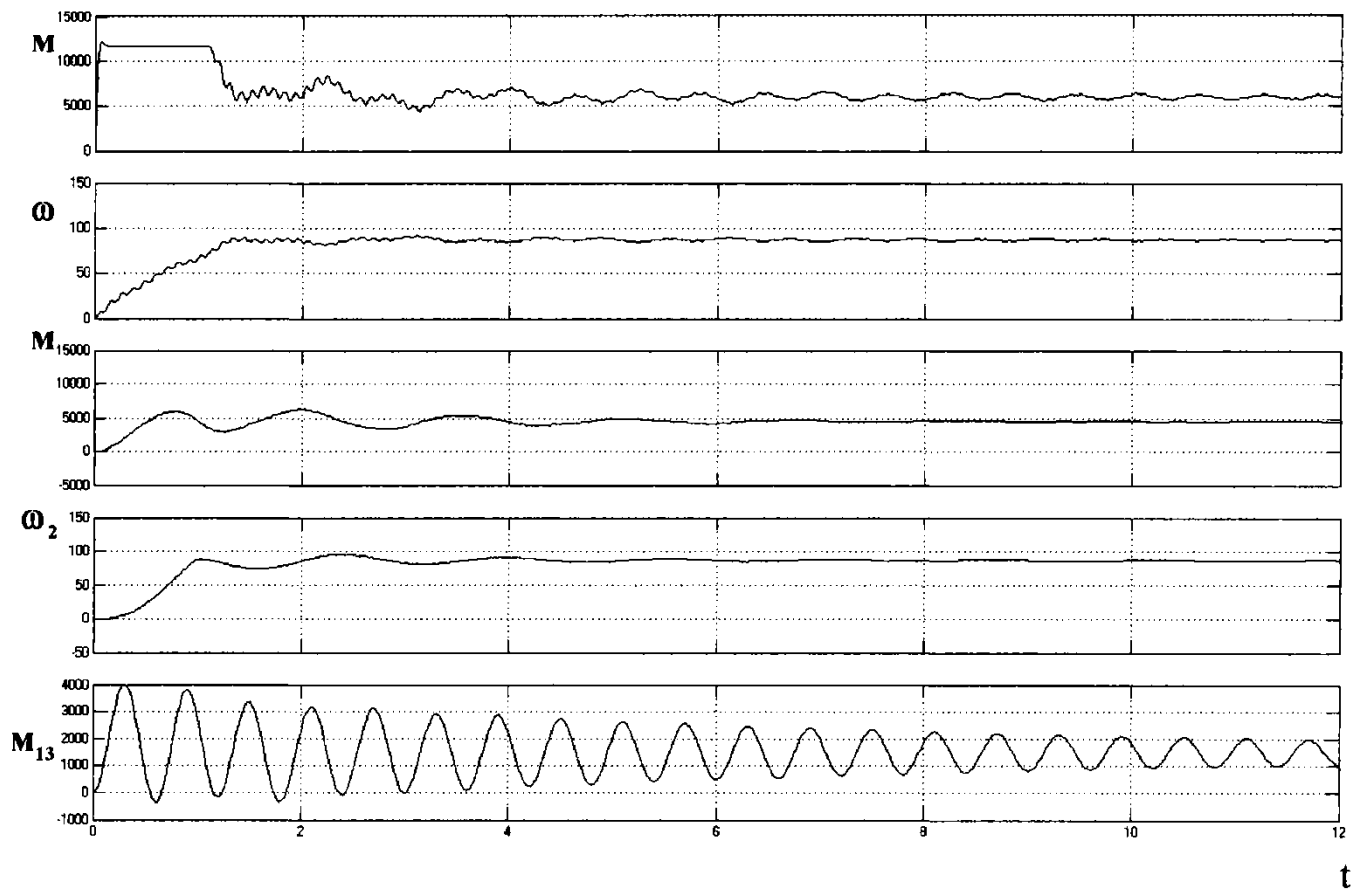


Рис 4.11- Осцилограми перехідних процесів при лінійно задаючому сигналі.

#### 4.4. Розподіл навантажень двохдвигунного електроприводу.

Рівняння:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 = \frac{\mathbf{M}_{\kappa 1}}{\omega_{01}} (\omega_{01} - \omega) + \frac{\mathbf{M}_{\kappa 2}}{\omega_{02}} (\omega_{02} - \omega) \quad (4.10)$$

або

$$\mathbf{M} = |\beta_1| (\omega_{01} - \omega) + |\beta_2| (\omega_{02} - \omega) \quad (4.11)$$



$$\omega = \frac{\omega_{01}|\beta_1| + \omega_{02}|\beta_2|}{|\beta_1| + |\beta_2|} - \frac{M}{|\beta_1| + |\beta_2|} \quad (4.12)$$

$$[\omega = f(M_{1,2})].$$

Оскільки  $\omega_{01} = \omega_{02}$ , а  $|\beta_1| = |\beta_2|$ , то (4.12) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_0 - M/2|\beta_1| \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} M_1 &= |\beta_1|(\omega_0 - \omega + M_c/|\beta|); \\ M_2 &= |\beta_2|(\omega_0 - \omega + M_c/|\beta|) \end{aligned} \quad (4.14)$$

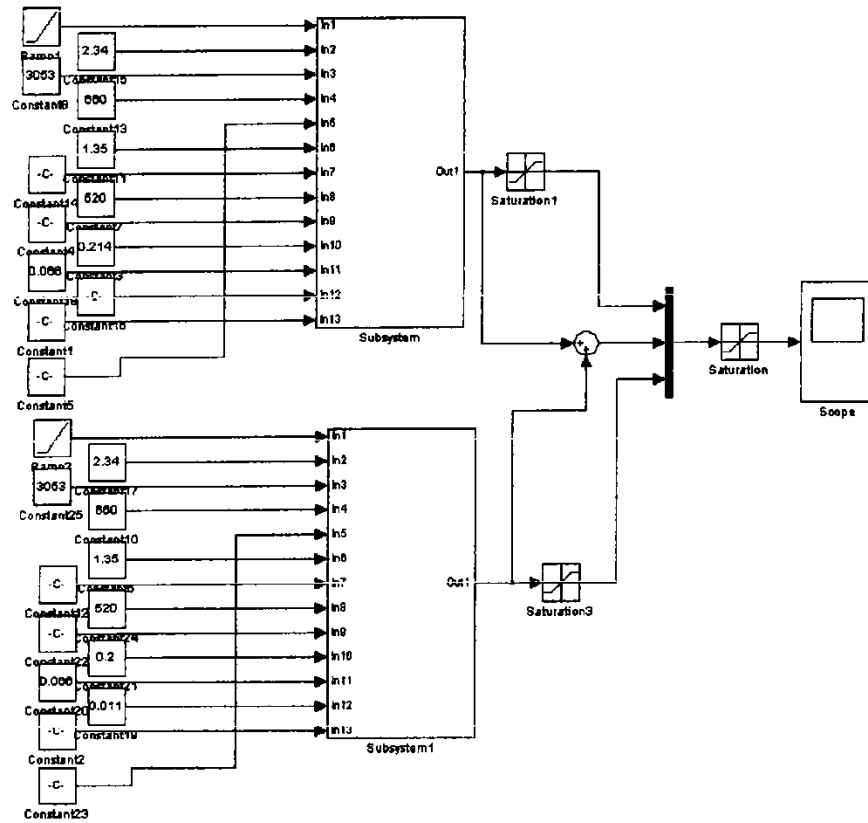


Рис 4.12- Математична модель розподілу навантаження.

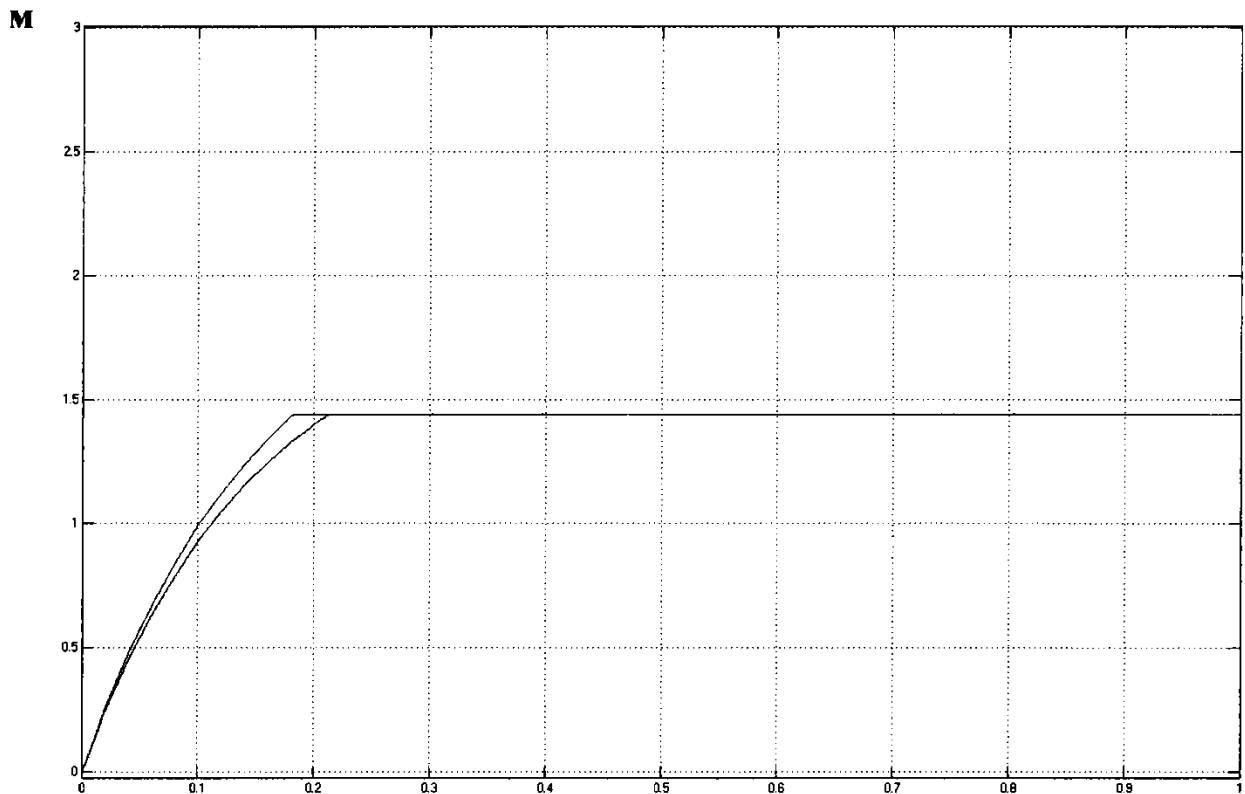


Рис 4.13- Механічна характеристика двохдвигунового приводу.

**Висновки:**

1. Проведено розрахунок моментів інерції механізму, що дозволило врахувати всі динамічні ефекти під час пуску та зупинки.
2. Виявлено, що коливання натягу стрічки при запуску можуть бути значними, що негативно впливає на її зносостійкість.
3. Запропоноване управління за допомогою АВК дозволяє знизити динамічні навантаження шляхом регулювання пускового моменту та швидкості.
4. Виконано моделювання роботи системи в умовах перехідних процесів, яке підтвердило ефективність використання роботи привода.
5. Аналіз механічних характеристик електроприводу конвеєра, дозволив вибрати систему АВК.

## **Розділ 5**

### **Мікропроцесорна система керування.**

## 5.1. Вибір елементів.

### 5.1.1. Вибір тахогенератора.

$$U_{\text{НТГ}}=230\text{В};$$

$$\omega_{\text{НТГ}}=1000\text{об/хв}=105\text{рад/с}$$

Коефіцієнт:

$$K_{\text{ТГ}}=U_{\text{НТГ}}/\omega_{\text{НТГ}}=2,2\text{Вс/рад}$$

Коефіцієнт потенціометричного дільника напруги:

$$K_{\text{дн}}=K_{\text{ос}}/K_{\text{ТГ}}=0,097/2,196=0,04$$

Напруга на виході тахогенератора при номінальній швидкості двигуна:

$$U_{\text{ТГ}}=K_{\text{ТГ}}*\omega_{\text{НТГ}}=2,196*103=230\text{В} \quad (4.3)$$

Струм навантаження тахогенератора:

$$I_{\text{тг}}=\frac{P_{\text{тг}}}{U_{\text{тг}}}=\frac{12}{230}=0,052\text{А} \quad (4.4)$$

Опір дільник напруги:

$$R_{\text{дн}}=\frac{U_{\text{тг}}}{I_{\text{тг}}}=\frac{230}{0,052}=4423\text{ Ом} \quad (4.5)$$

Оберемо у якості дільника напруги резистор типу ППБ-3Ах72 опором 4.7 кОм.  
Оскільки

$$K_{\text{дн}}=\frac{r}{R_{\text{дн}}}, \text{ то } r=K_{\text{дн}}*R_{\text{дн}}=0,044*4700=206\text{ Ом}. \quad (4.6)$$

### **5.1.2 Вибір датчиків.**

Виконуємо вибір датчиків на основі попередніх розрахунків.

Покажемо на наступних схемах їх застосування.

## **5.2. Розробка системи керування.**

Розробимо систему керування, при цьому напруга на затисках постійного струму некерованого випрямляча пропорційно напрузі на затисках ротора і міняється лінійно із зміною швидкості двигуна;

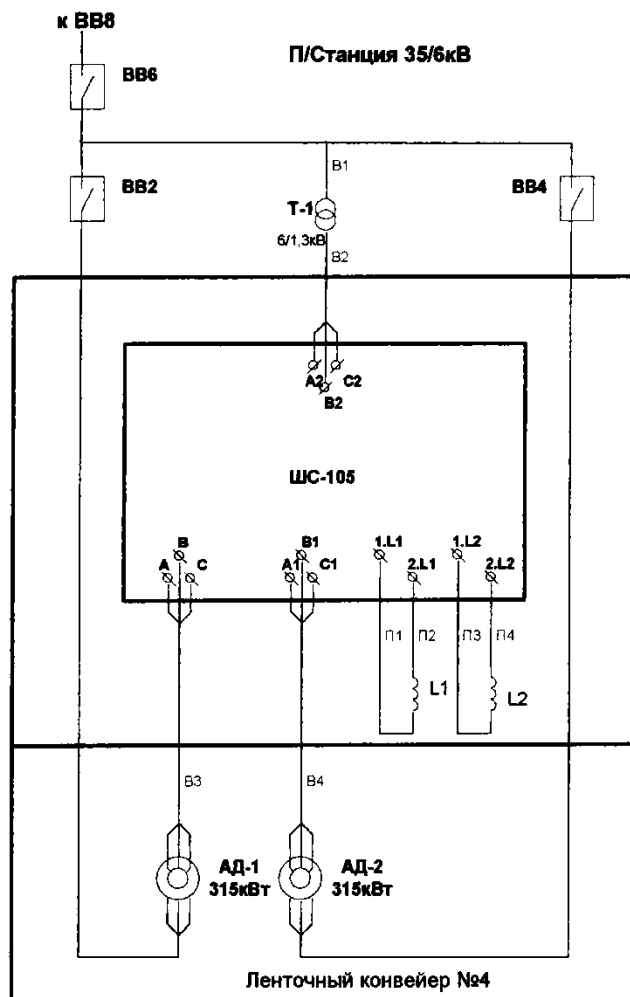


Рис 5.1- Однолінійна схема головних ланцюгів ЕКК-2-315.

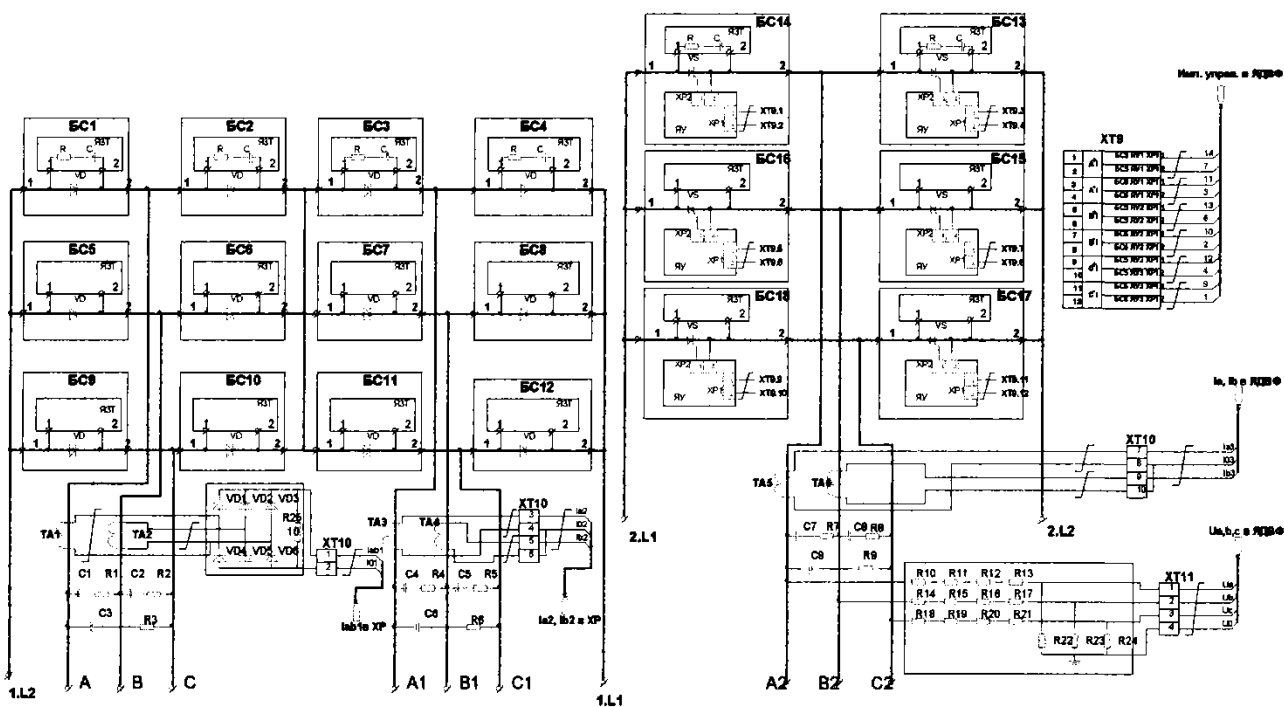


Рис 5.2- Принципова схема роторних ланцюгів ЕКК-2-315.

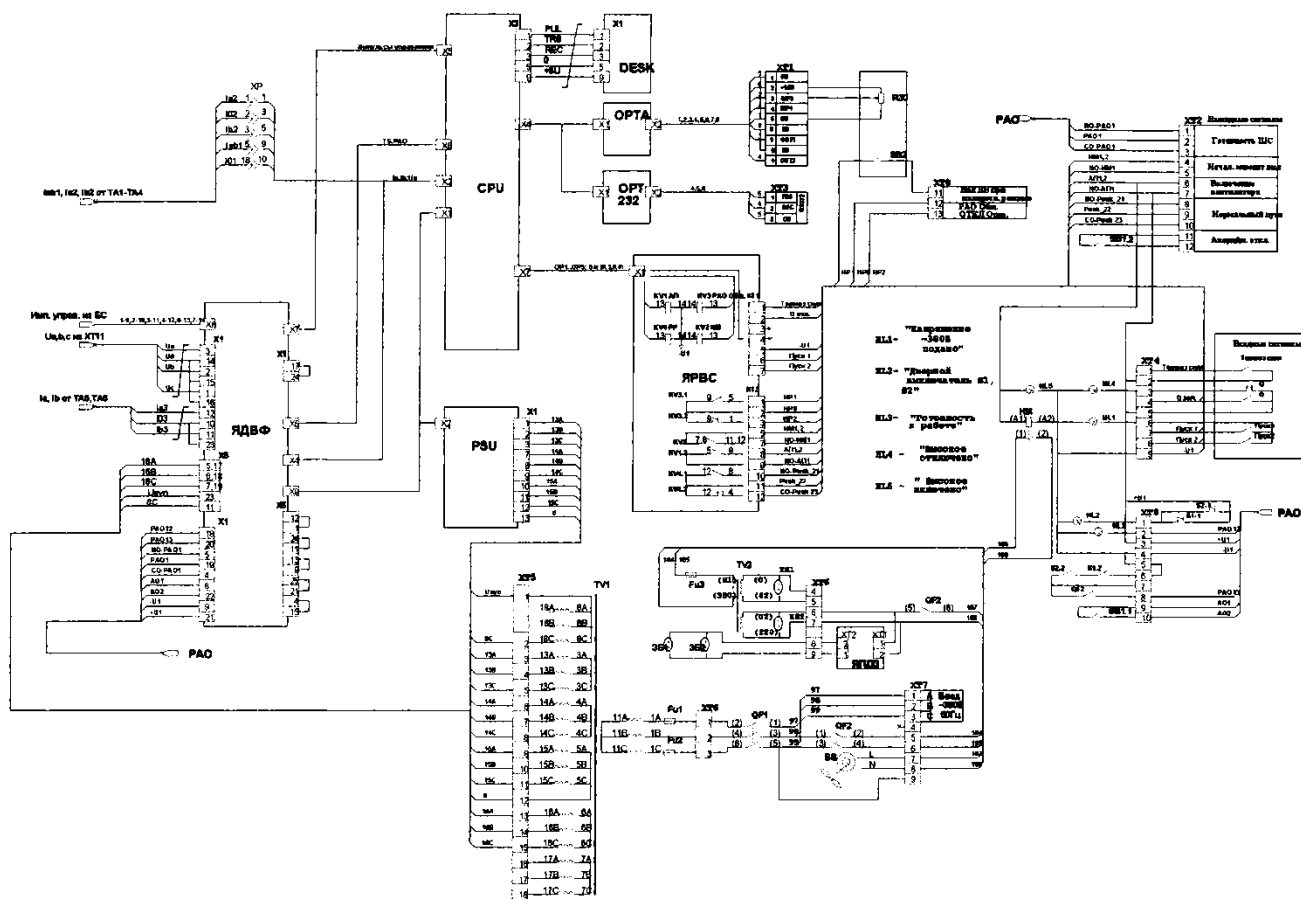


Рис 5.3- Блок-схема мікропроцесорної системи ЭКК.



## 5.3 Розробка мікропроцесорної системи керування ЕП з контролем енергетичних показників.

### 5.3.1. Задачі автоматизації контролю

Завданням автоматизації є контроль параметрів.

### 5.3.2 Математичні рівняння.

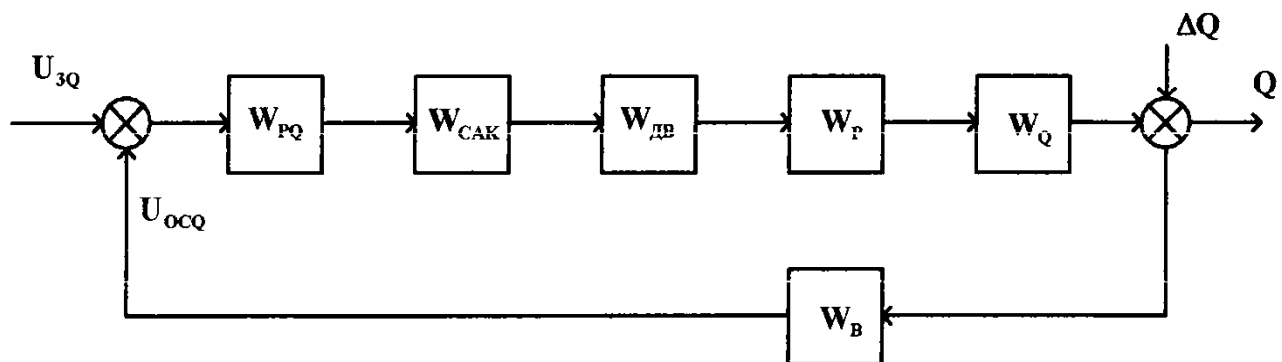


Рис 6.1- Функціональна схема системи автоматичного регулювання завантаження конвеєра.

$$W = K_Q / (T_Q * P + 1) \quad (6.1)$$

$$K_Q = \frac{Q_H}{\omega_H} = \frac{4930}{103.1} = 47.82, \quad (6.2)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по продуктивності

$$K_{oQ} = \frac{10}{Q_H} = \frac{10}{4930} = 0.002 \quad (6.3)$$

Визначимо передавальну функцію регулятора продуктивності, налаштованого на технічний оптимум:

$$W_{PQ} = \frac{1}{8T_\mu P} \times \frac{1}{W_Q} \times \frac{K_{oc}}{K_{oQ}}, \quad (6.4)$$

$$W_{PQ} = \frac{T_Q K_{oc}}{8T_\mu K_Q K_{oQ}} + \frac{K_{oc}}{8T_\mu K_Q K_{oQ} P}, \quad (6.5)$$

Регулятор продуктивності пропорційно-інтегральний пропорційна частина:

$$W_{PQI} = \frac{0.2 \times 0.0969}{8 \times 0.01 \times 47.82 \times 0.002} = 2.53,$$

інтегральна частина:

$$W_{PQI} = \frac{0.0969}{8 \times 0.01 \times 47.82 \times 0.002 \times P} = \frac{12.6}{P}$$

### 5.3.3. Дослідження динаміки

Виконаємо дослідження динаміки.

$$\Delta = \frac{Q_o - Q_1}{Q_o} \times 100 = \frac{3830 - 3800}{3830} \times 100 = 0.78\% \quad (6.6)$$

Час регулювання складає 0.2с.

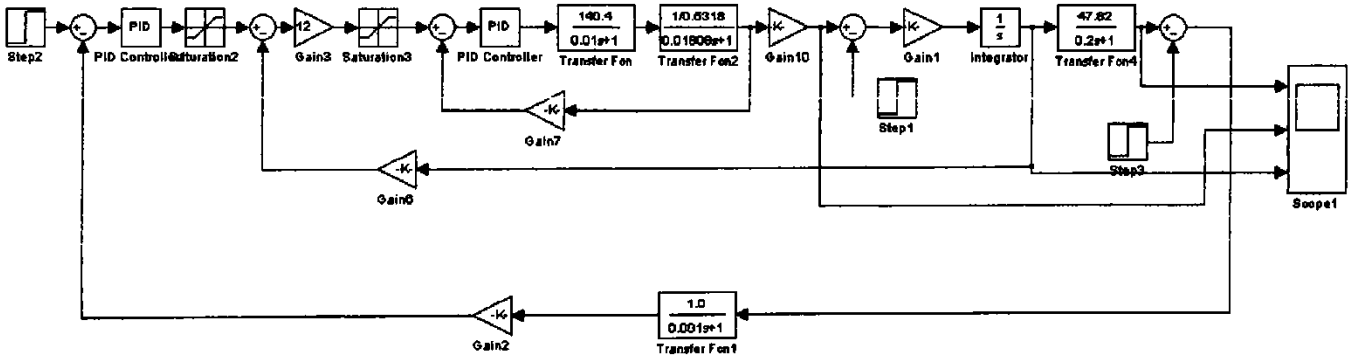


Рис 6.2- Математична модель замкненої САК ЕП по технологічному параметру.



Рис 6.3- Перехідні процеси замкненої САК ЕП по технологічному параметру.

### 5.3.4. Мікропроцесорна система.

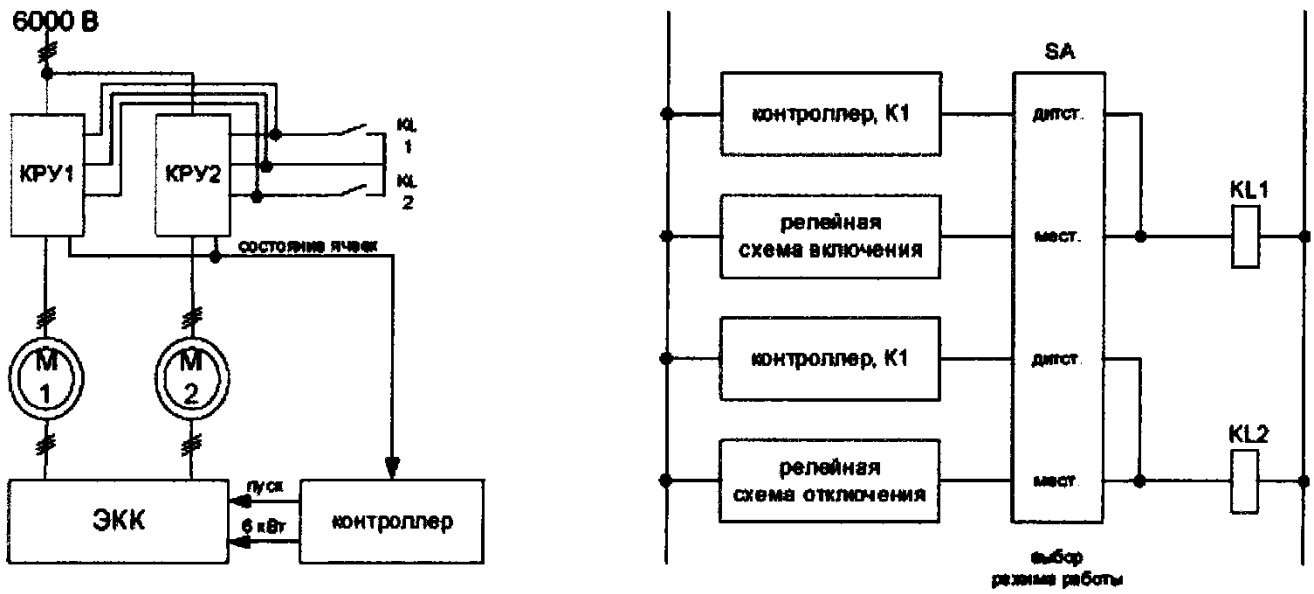


Рис 6.4- Структурна схема управління головним приводом.

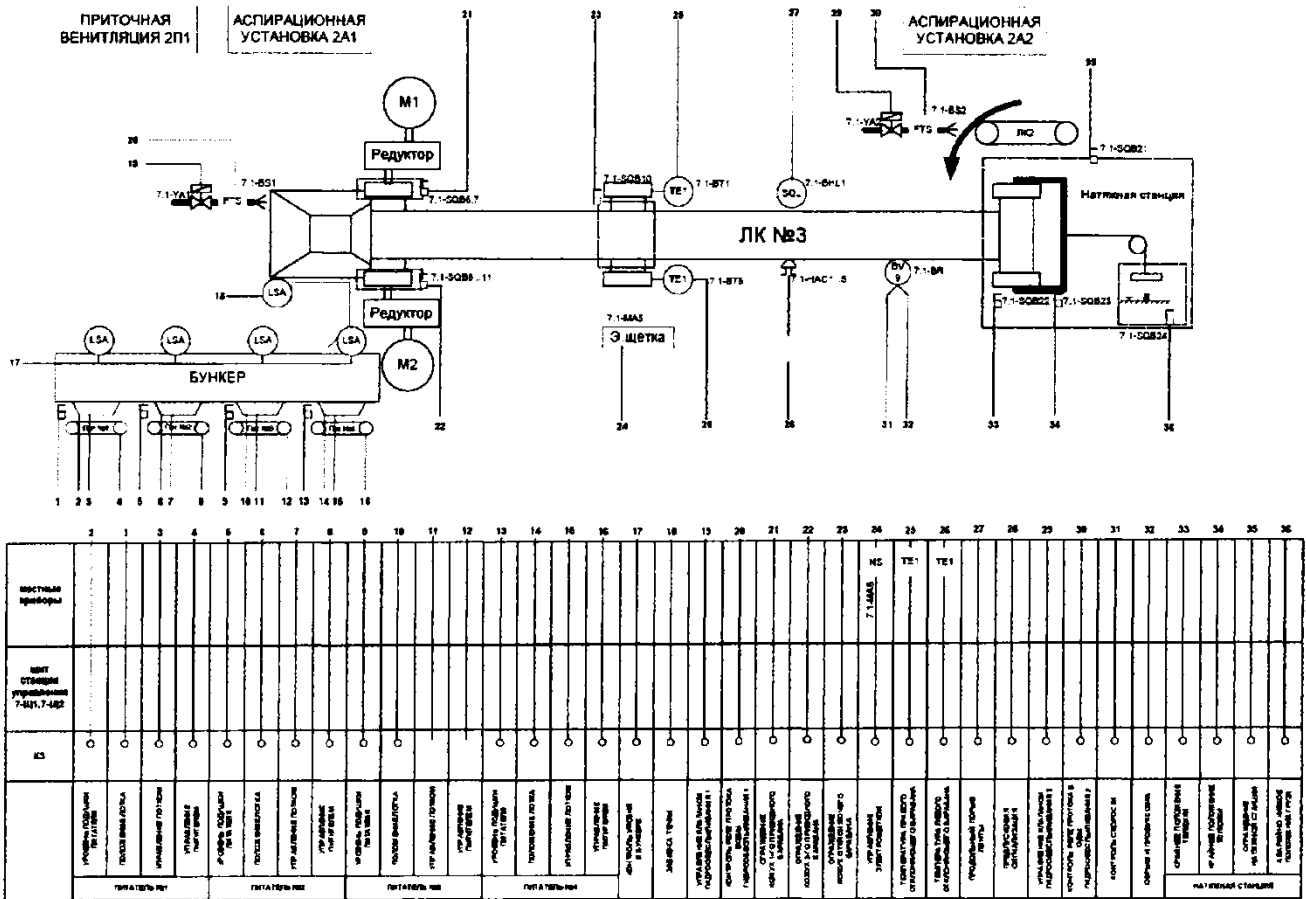


Рис 6.5- Технологічна схема автоматизації конвеєра ЛК-4.

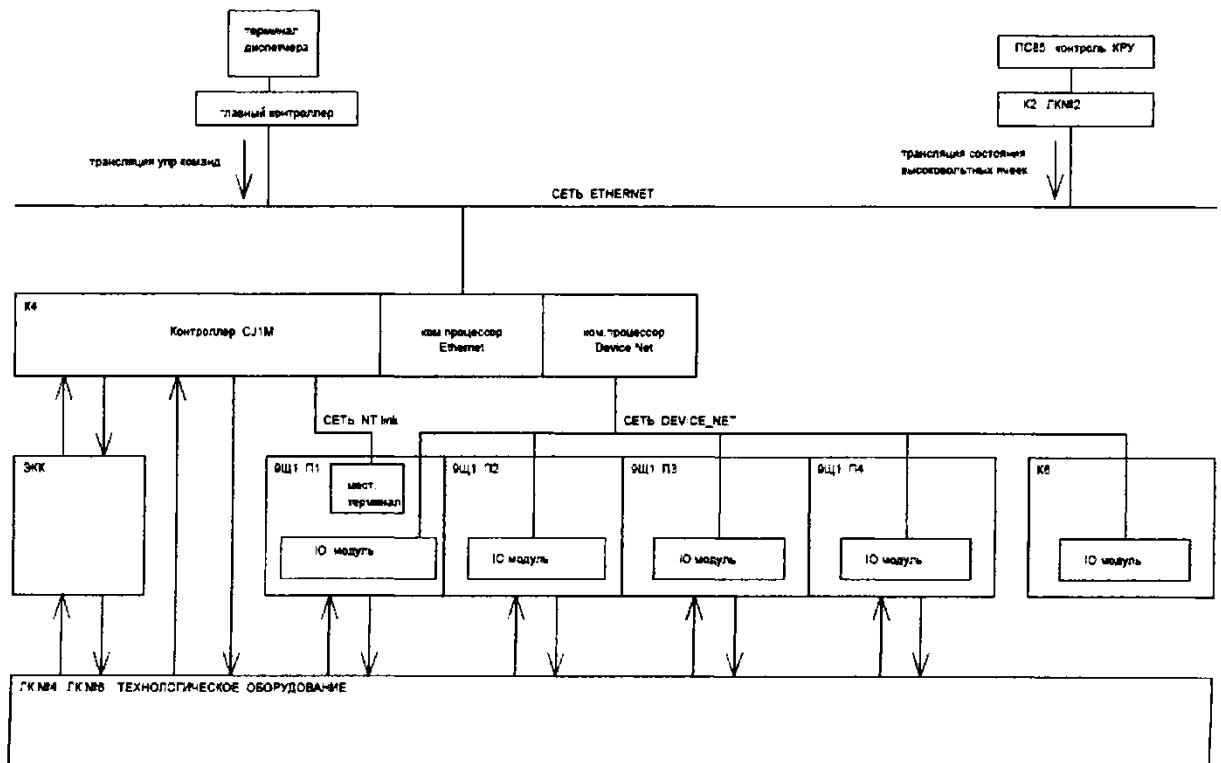


Рис 6.6- Схема управління конвеєра ЛК-4.

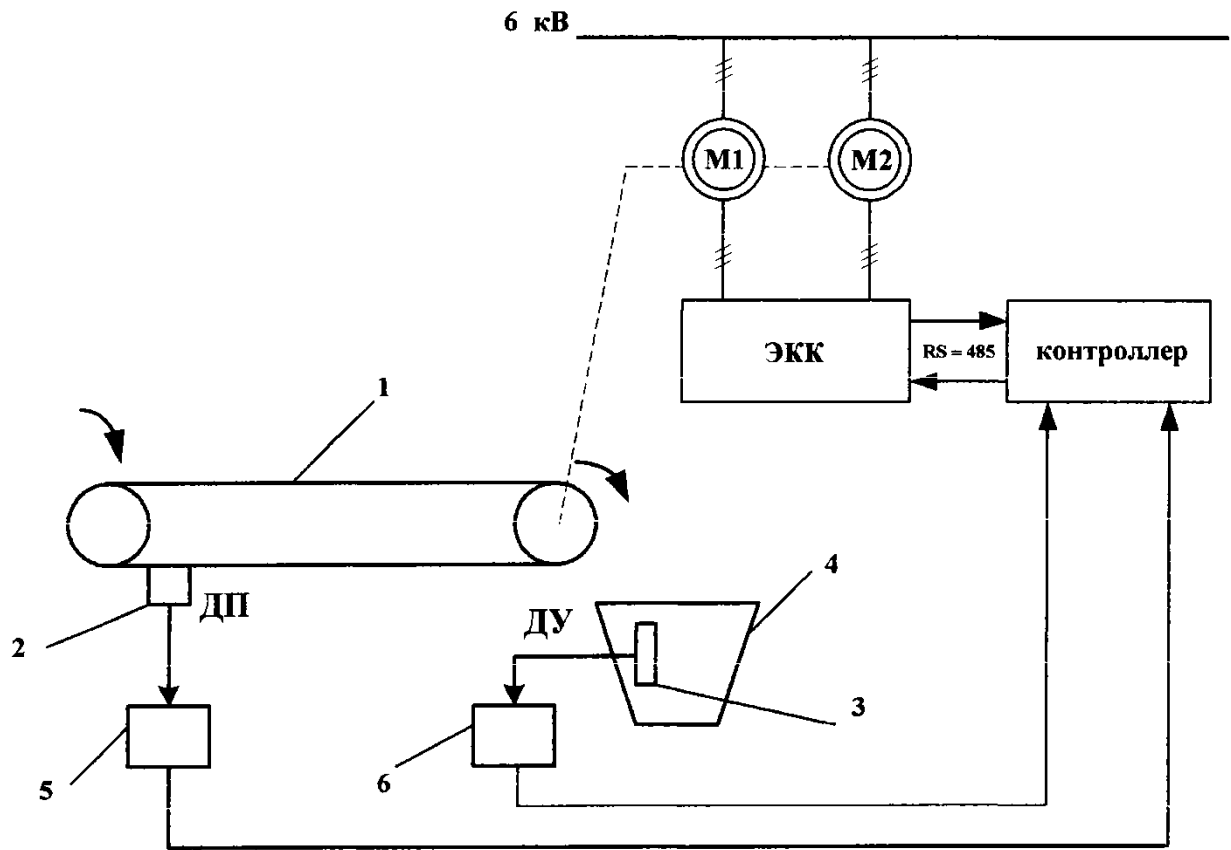


Рис 6.7- Функціональна схема мікропроцесорної системи автоматичного регулювання загрузки конвеєра.

Технические характеристики		
Параметр		
Входы		
Диапазон значений сигнала	Напряжение	1 – 5 В
		0 – 10 В
		0 – 5 В
		-10 – 10 В
	Ток	4 – 20 мА

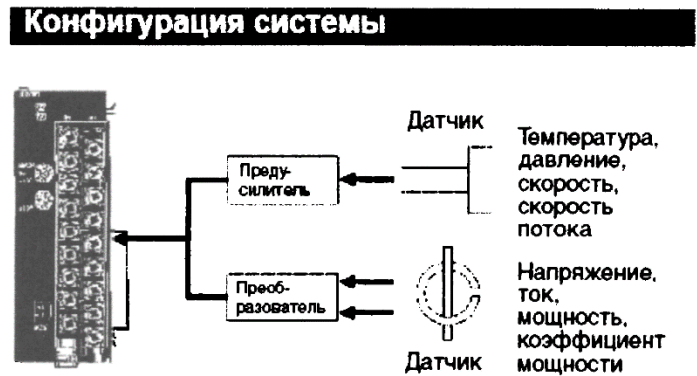


Рис 6.8- Конфігурація модуля CJ1W-AD081-V1.

## 5.4 Энергетичні показники системи АВК.

### 5.4.1. Коефіцієнт корисної дії АВК.

Однією з основних ідей систем АВК є корисне використання енергії ковзання асинхронного двигуна, що визначає збереження достатнє високого К.К.Д. приводу в руховому режимі є відношення корисної потужності на валу до витраченої [3]:

$$\eta_k = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}} - P_{\text{рек}}}; \quad (7.1)$$

Де

$P_{\text{пол}}$  – корисна потужність на валу двигуна;

$P_{\text{затр}}$  – витрачена потужність;

$P_{\text{потр}}$  – вся потужність споживана каскадом;

$P_{\text{рек}}$  – потужність, що віддається в мережу.

Слідуює, що рекуперация енергії відбувається при роботі в руховому режимі тільки до визначеної, правда, вельми високій швидкості обертання, при якій енергія ковзання  $P_{\text{зм}}$  зменшується настільки, що достатня лише для покриття втрат в роторі, вентилях і трансформаторі. Це ковзання визначається по формулі:

$$S_{\text{рек}} = \frac{3r_x i_d + \pi \Delta U}{\pi k_1 E_p - 3x_r (1+q) i_d}; \quad (7.2)$$

Для досягнення ковзань, менших, ніж  $S_{\text{рек}}$ , необхідно трансформаторну групу вентилів перевести з інверторного у випрямний режим, тобто при роботі з ковзанням в межах  $S_H - S_{\text{рек}}$

Енергія ковзання йде тільки на покриття втрат в роторному ланцюзі, причому з мережі при цьому з боку трансформатора забирається частина енергії, бракуюча до повного покриття втрат.

Найбільш простим і достатньо точним методом визначення К.К.Д. вентиляного каскаду є метод розділення втрат. Суть цього методу полягає у визначенні втрат в елементах і підрахунку повних втрат в приводі.

Тоді для двигунного режиму;

$$\eta_k = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P} \quad (7.3)$$

Розглянемо основні положення цього методу стосовно асинхронного приводу з реостатним управлінням і в каскадних схемах.

Втрати потужності в приводі діляться на постійні  $K$  і змінні  $V$ ;

$$\Delta P = K + V \quad (7.4)$$

Під постійним розуміються втрати, не залежні від струму навантаження:



втрати в міді статора від струму  $I_0$ , що намагнічує, втрати сталі статора, в сталі ротора, механічні і додаткові. Із зміною швидкості двигуна при управлінні в ланцюзі ротора (реостатні або каскадні схеми) ці втрати залишаються незмінними, оскільки постійні втрати в статорі не міняються, а ці втрати в сталі ротора і механічні змінюються в протилежних напрямках. Під змінними розуміються втрати, пропорційні квадрату струму навантаження:

$$V = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 (r_2 + R_{\text{доб}}) \quad (7.5)$$

Струм статора її, без особливої помилки, можна визначати як:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2^2} \quad (7.6)$$

Номінальні змінні втрати є втрати в статорі і в роторі, пропорційні номінальному ковзанню:

$$V_H = M_H \omega_1 S_H \left(1 + \frac{r_1'}{r_2}\right)$$

Постійні втрати асинхронного двигуна знаходяться як

$$K_{\text{а.д.н.}} = P_H^k - M_H \omega_1 S_H (1 + \lambda) \quad (7.8)$$

У схемах вентиляного каскаду втрати також доцільно розділяти на постійні і змінні. Постійні втрати в асинхронному двигуні в схемі каскаду лише дещо більше постійних втрат в звичайній схемі включення (приблизно на 5%). Це пояснюється збільшенням втрат в сталі за рахунок вищих гармонік і в струмах статора і ротора. Крім того, в схемі вентиляного каскаду мають місце постійні

втрати холостого ходу трансформатора інвертора. Таким чином, постійні втрати у вентиляному каскаді рівні:

$$K_K = 1.05 K_{\text{а.д.н.}} + \Delta P_{\text{х.х.тр.}} \quad (7.9)$$

Змінні втрати зручно визначати, приводячи всі втрати до роторного ланцюга двигуна:

$$V_K = I_d^2 R'_{\text{екв}} + 3I_d \Delta U \quad (7.10)$$

Де:

$R'_{\text{екв}}$  залежно від схеми з'єднання вентилів трансформаторної групи рівно:

$$R'_{\text{екв}} = 2r_2 + 2r_1' + r_{\text{с.д.}} + 2r_{\text{т.}}$$

Для визначення чисельних значень коефіцієнта корисної дії системи АВК і встановлення його залежності від ковзання, складемо математичну модель. На рисунку 7.1 приведена математична модель розрахунку К.К.Д.. Модель складена відповідно до математичних виразів (7.3 - 7.10) Значення моменту і струму визначаємо відповідно до моделей, приведених в розділі 2. Використання блоку ХУ дозволяє визначити залежність К.К.Д. у функції струму навантаження.

Для отримання сімейства К.К.Д.. каскаду у функції ковзання складена математична модель, для різних кутів інвертування (рис. 7.2), в основу якої покладена математична модель (рис. 7.1).

На рисунку 7.3 представлено сімейство  $\eta = f(s)$  для наступних кутів інвертування:  $\beta_1=90^\circ$ ;  $\beta_2=85^\circ$ ;  $\beta_3=75^\circ$ ;  $\beta_4=65^\circ$ ;  $\beta_5=55^\circ$ ;  $\beta_6=50^\circ$ . Як видно з малюнка із зменшенням кута інвертування, максимальне значення К.К.Д. зміщується в область великих ковзань. Так при куті інвертування  $\beta = 90^\circ$ ,  $\eta=0.93$ ,  $S=0.05$ ; при  $\beta=50^\circ$ ,  $\eta=0.72$ ,  $S=0.07$ . Ковзання  $S$  для всіх кутів інвертування змінювали від 0 до 0.25, тобто в межах робочих навантажень.

На рисунку 7.4 приведена залежність  $\eta = f(I_d)$  для кута інвертування  $\beta=65^\circ$ .

Як видно з рисунка із збільшенням струму К.К.Д. зменшується. Це зменшення викликане зростанням змінних втрат в електроприводі.

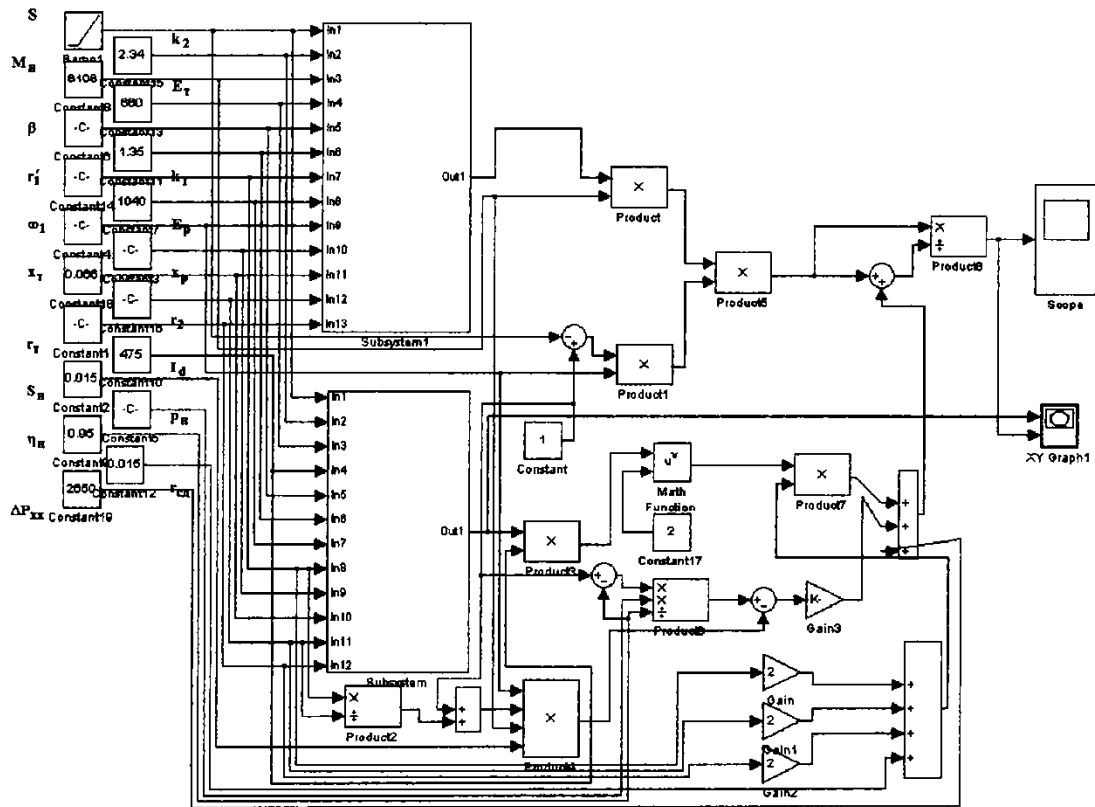


Рис 7.1- математична модель К.К.Д. системи АВК.

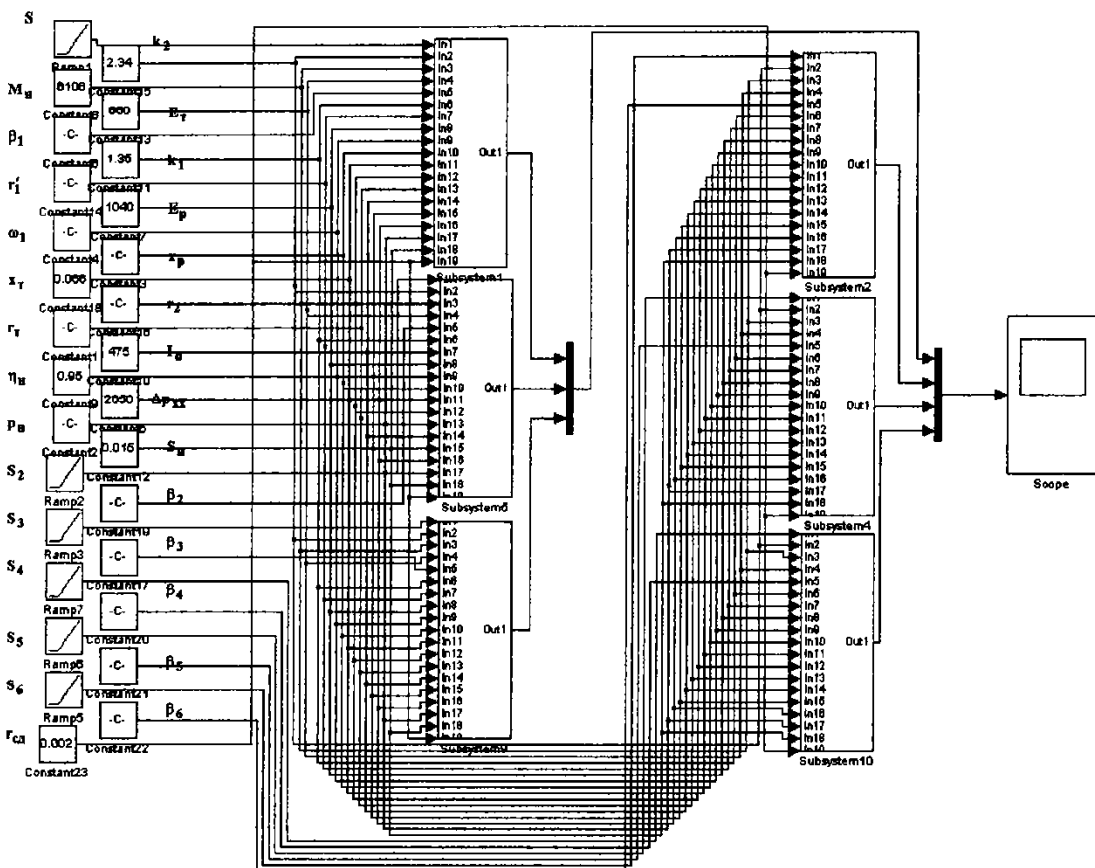


Рис 7.2- Математична модель сімейства К.К.Д. системи АВК.

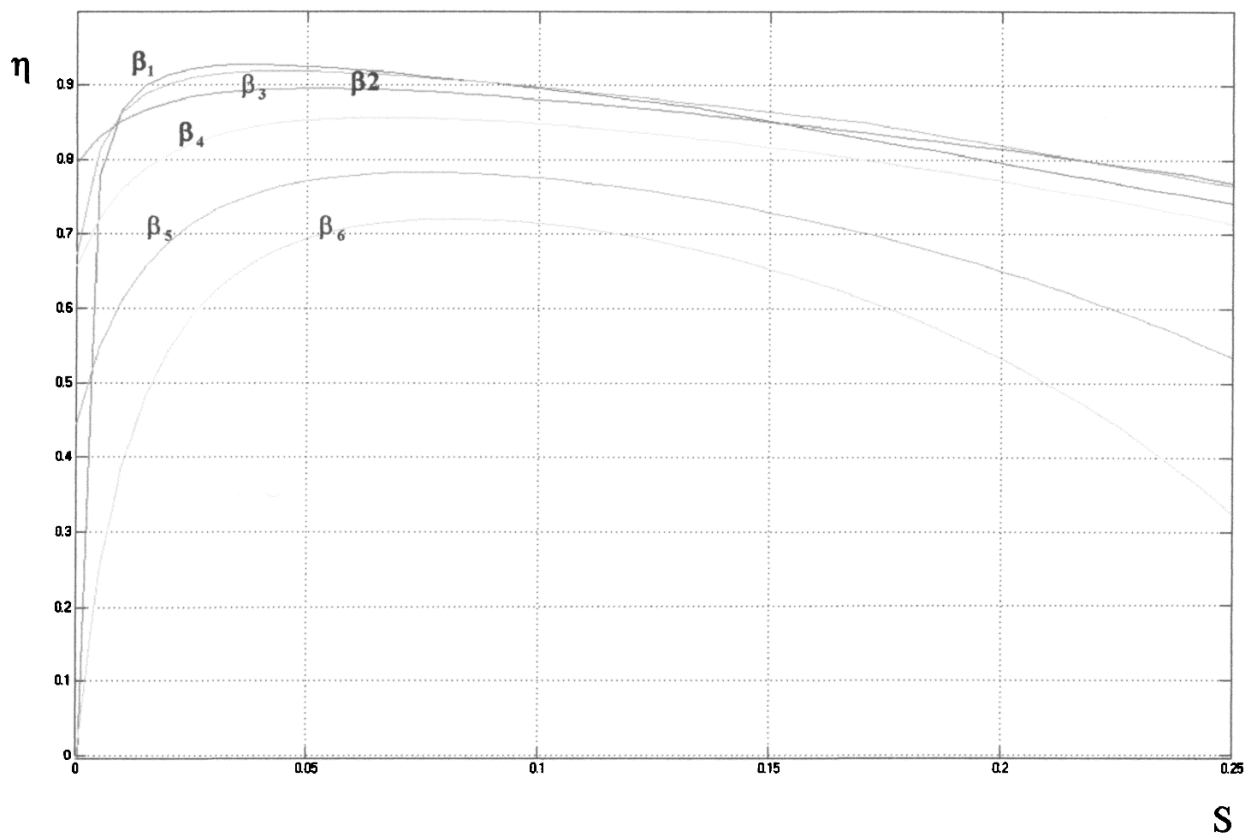


Рис 7.3- Сімейство залежності  $\eta=f(S)$ .

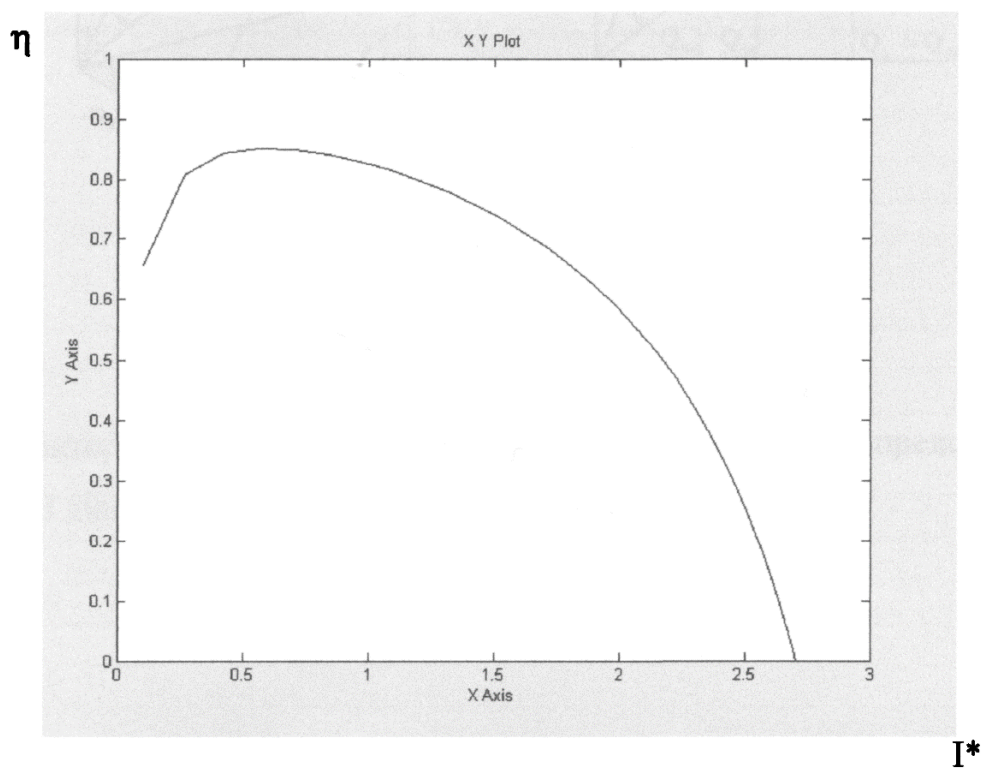


Рис 7.4- залежність  $\eta=f(I)$  для кута інвертування  $\beta = 65^\circ$ .

### 5.4.2. Коефіцієнт потужності вентиляного каскаду.

У схемі вентиляного каскаду підвищується К.К.Д. асинхронного приводу при регулюванні швидкості, але погіршується його коефіцієнт потужності. Зниження потужності відбувається з двох причин [3]:

1) унаслідок збільшення споживання (циркуляції) реактивної потужності (це викликано тим, що реактивна потужність споживається не тільки двигуном, але і інвертором; в той же час активні потужності двигуна і інвертора віднімаються);

2) за рахунок появи потужності спотворення, обумовленої наявністю вищих гармонійних в кривих струмах двигуна і трансформатора.

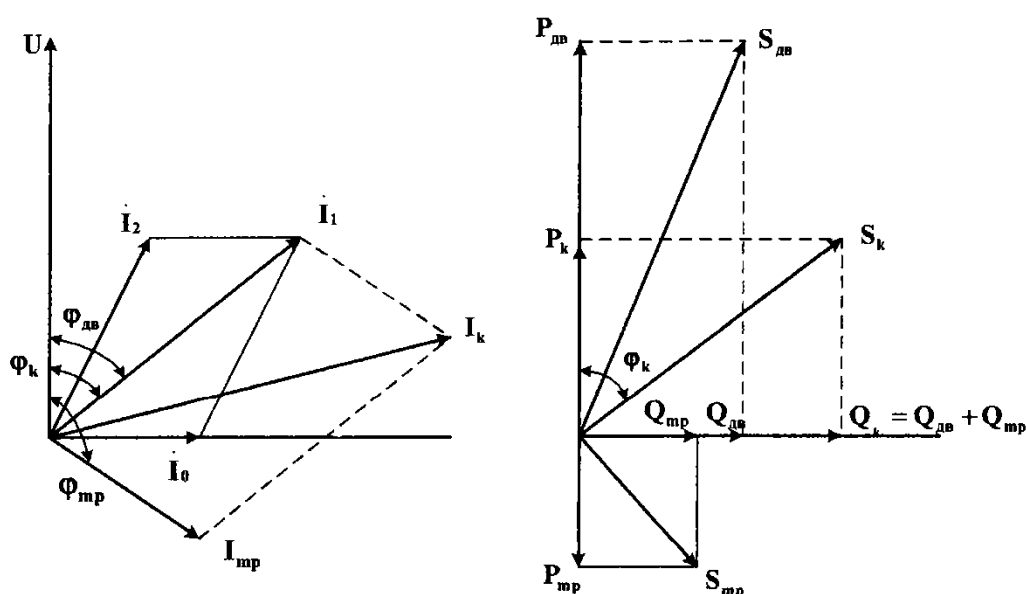


Рис 7.5- Векторні діаграми АВК.

Розглянемо векторні діаграми асинхронного вентильного каскаду, представлені на рисунку 7.5. З діаграми виходить, що

$$\begin{aligned} Q_k &= Q_{дв} + Q_{тр}; \\ P_k &= P_{дв} - P_{тр}; \end{aligned}$$

$$\cos\varphi_k = v \frac{P_{дв} - P_{тр}}{\sqrt{(P_{дв} - P_{тр})^2 + (Q_{дв} + Q_{тр})^2}} \quad (7.11)$$

Де:

$Q_k$ - реактивна потужність вентильного каскаду;

$P_k$  - активна потужність, споживана приводом;

$\cos\varphi_k$  - коефіцієнт потужності приводу;

$v$  - коефіцієнт, що враховує спотворення форми кривих первинних струмів двигуна і трансформатора (зазвичай приймають 0.955).

Розрахунок коефіцієнта потужності вентильного каскаду проводиться таким чином. Коефіцієнт потужності двигуна визначається по формулі:

$$\cos\varphi_{дв} = \cos\varphi_0 \cos\varphi \frac{\gamma}{2} \quad (7.8)$$

Де:

$$\begin{aligned} \cos\varphi_0 &= \frac{0.815I_d}{\sqrt{(0.815I_d)^2 + I_0^2 \kappa^2}} \\ \cos\frac{\gamma}{2} &= \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2}x_p I_d}{2E_p}} \end{aligned} \quad (7.9)$$

тоді

$$\cos\varphi_{дв} = \frac{0.815I_d}{\sqrt{2E_p}} \sqrt{\frac{2E_p^2 - \sqrt{2}x_p E_p I_d}{(0.815I_d)^2 + I_p^2 \kappa^2}} \quad (7.10)$$

Реактивна потужність двигуна рівна:

$$Q_{дв} = P_{дв} \operatorname{tg}\varphi_{дв} \quad (7.11)$$

Де:

$P_{дв}$  - активна потужність, споживана з боку статора двигуна.

$$P_{дв} = \frac{Mn_0}{915} \quad (7.12)$$

Потужність, що витрачається приводом  $P_k$ , рівна:

$$P_k = P_{дв} - P_{тр} = \frac{P_{мех}}{\eta_k} = \frac{Mn}{975\eta_k} \quad (7.13)$$

Звідси активна потужність, що передається через трансформатор (інвертор):

$$P_{тр} = P_{дв} - \frac{Mn}{975\eta_k} = \frac{M}{975} \left( n_0 - \frac{n}{\eta_k} \right) \quad (7.14)$$

Коефіцієнт потужності інвертора:

$$\cos \varphi_{тр} = v \cos \beta \quad (7.15)$$

Реактивна потужність, циркулююча в ланцюзі первинної обмотки трансформатора, може бути визначена з наступних виразів:

$$Q_{тр} = \sqrt{S_{тр}^2 - P_{тр}^2}, \quad (7.16)$$

$$S_{тр} = m_{т} E_{2т} I_d k_{ит} \quad (7.17)$$

Де:

$k_{ит}$  визначається залежно від схеми обмоток трансформатора (для трифазної мостової  $k_{ит} = 0.815$ ). Відповідно до вищенаведених рівнянь складена математична модель залежності коефіцієнта потужності каскаду від ковзання  $\cos \varphi = f(S)$ , яка приведена на рисунку 7.6. Як і у попередньому випадку (розрахунок К.К.Д.) початковими

даними є параметри двигуна, які були розраховані розділі 2.

На рисунку 7.7 приведена математична модель сімейства енергетичних показників каскаду  $\cos\varphi = f(S)$  для різних кутів інвертування, а на рисунку 7.8 результати моделювання. Як видно з приведених кривих коефіцієнт потужності із зменшенням кута інвертування зменшується.

Низький коефіцієнт потужності вентильного каскаду є основним недоліком цієї системи приводу. Деякі можливі способи поліпшення коефіцієнта потужності розглянуті нижче. В більшості випадків для установок великої потужності доводиться застосовувати статичні конденсатори, для компенсації реактивній потужності каскаду.



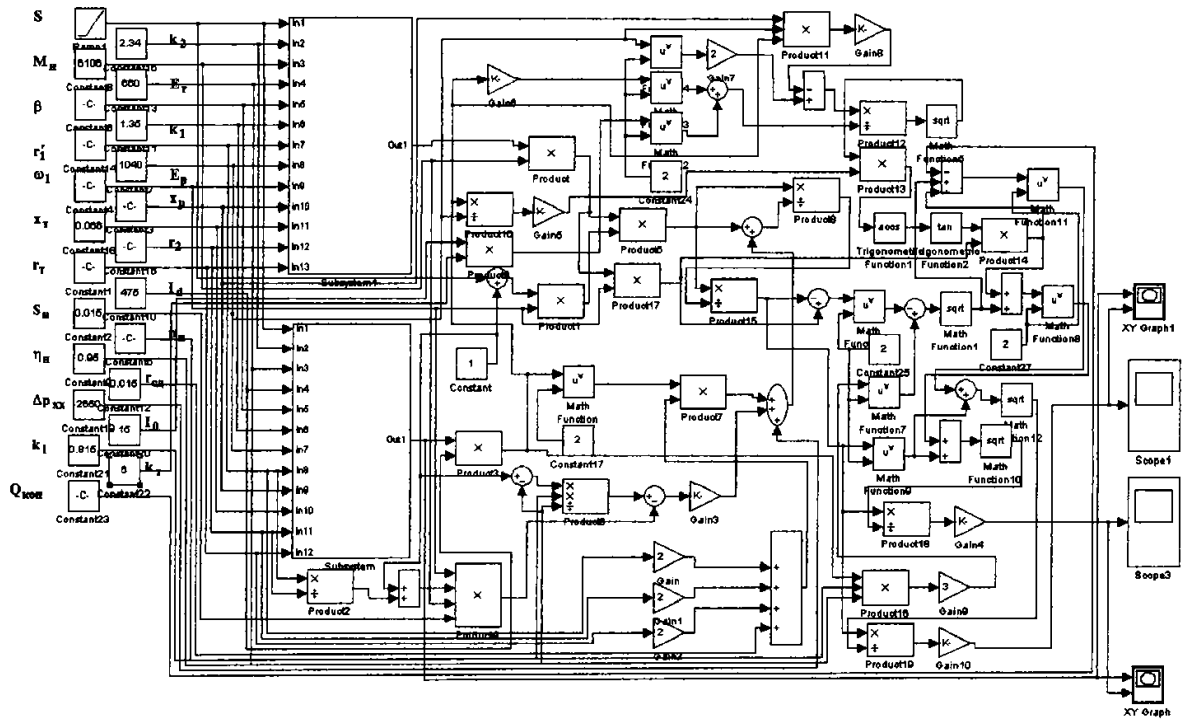


Рис 7.6- Математична модель залежності  $\cos\phi = f(S)$ .

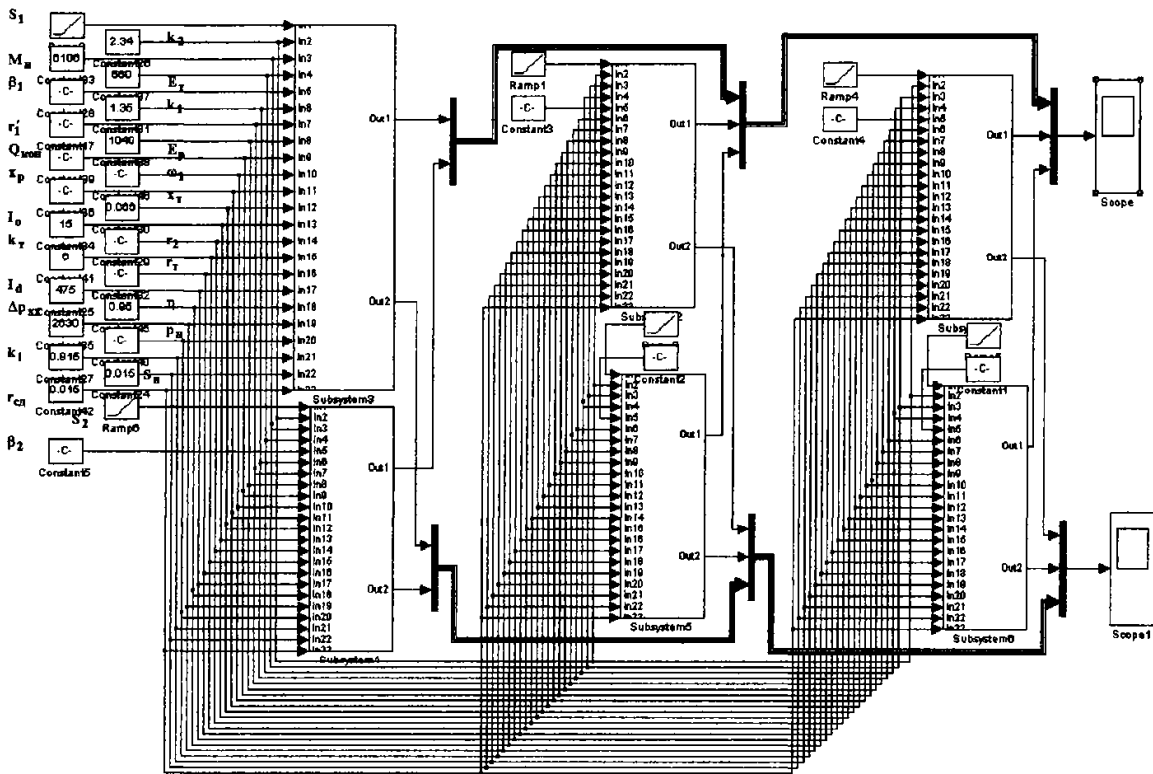
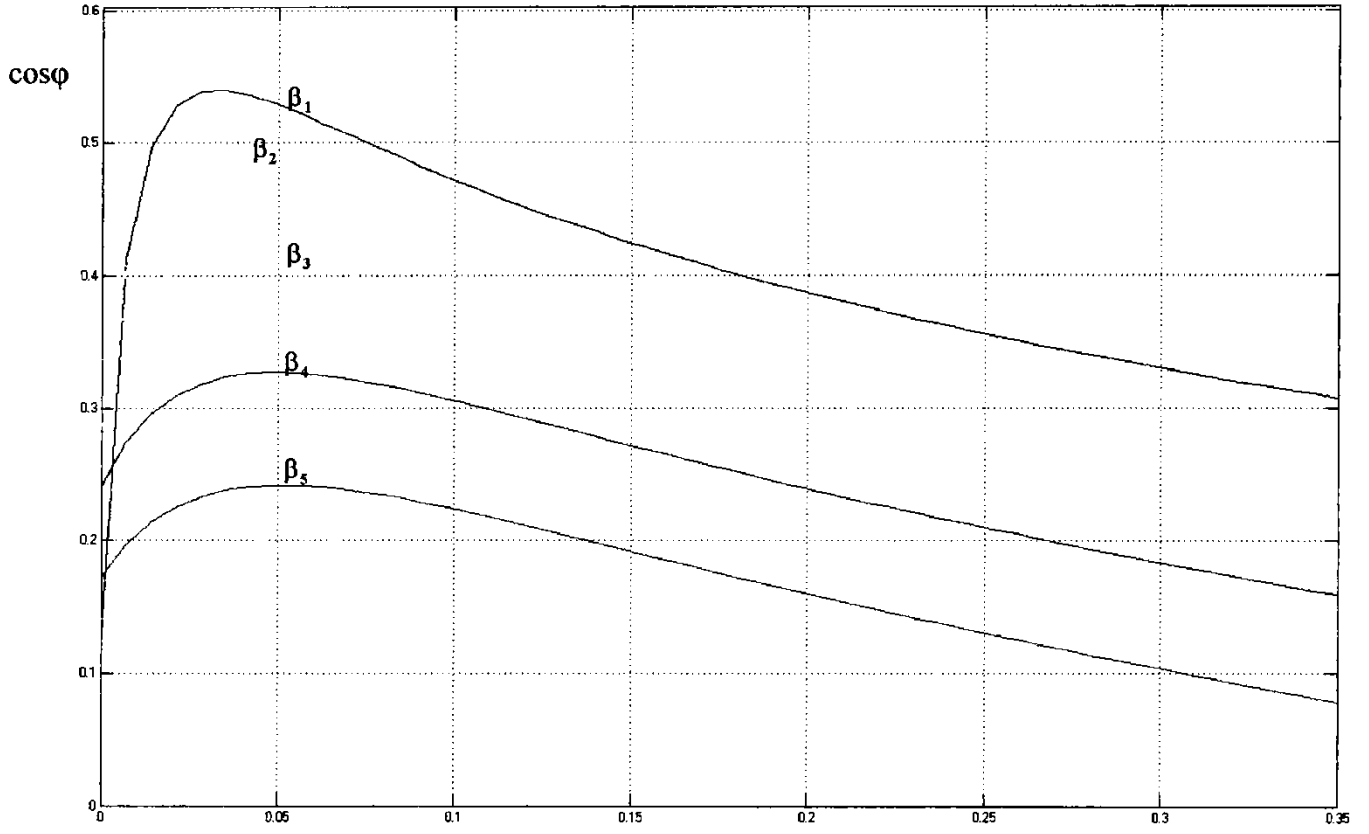


Рис 7.7- Математична модель сімейства енергетичних показників  $\cos\phi = f(S)$ .



S

Рис 7.8- Сімейство енергетичних показників  $\cos\varphi = f(S)$ .

**Висновки:**

1. Розроблено принципові схеми електричних з'єднань системи, що включають:
  - Тахогенератори для контролю швидкості.
  - Датчики струму і напруги для забезпечення зворотного зв'язку.
2. Схеми забезпечують надійну роботу САУ навіть у складних умовах експлуатації (висока запиленість, перепади температур).
3. Проведено вибір усіх компонентів з урахуванням сумісності, ефективності роботи і можливостей модернізації.
4. Сформульовані основні задачі автоматизації:
  - Підвищення точності роботи конвеєра.
  - Зменшення втрат енергії під час перехідних режимів.
  - Оптимізація роботи системи за різних умов навантаження.
5. Розроблено функціональну схему мікропроцесорної системи автоматизації, яка включає комбіновану систему зворотного зв'язку для стабілізації роботи.
6. Виконане моделювання підтвердило, що автоматизована система управління дозволяє забезпечити стабільну роботу конвеєра навіть при нерівномірному навантаженні.
7. Визначені основні енергетичні показники системи:
  - ККД системи становить 92%, що відповідає сучасним стандартам.
  - Коефіцієнт потужності вентильного каскаду – 0,85.
8. Розроблені заходи з енергозбереження, серед яких:
  - Використання рекуперації енергії ковзання, яка повертається у мережу.
  - Оптимізація параметрів роботи силових компонентів для зниження втрат.
9. Запропоновані заходи дозволяють зменшити енергоспоживання, підвищити економічність і надійність роботи системи.

## **Загальні висновки по роботі**

**Робота була розподілена на декілька етапів, і це загальні висновки по кожному з них.**

**Перший етап – Аналіз об'єкта дослідження та формулювання вимог до електропривода.**

Я детально дослідив роботу конвеєра ЛК-4 у складі технологічної системи дробильної фабрики. Основними вимогами до електропривода стали:

- забезпечення плавного пуску для зменшення ударних навантажень;
- узгоджена робота кількох двигунів для рівномірного натягу стрічки;
- запобігання пробуксовці;
- стабільність роботи у тривалому режимі та можливість регулювання швидкості.

На основі аналізу було обрано електропривод із асинхронно-вентильним каскадом (АВК). Ця система дозволяє забезпечити високу надійність, ефективне регулювання швидкості та повернення енергії ковзання в мережу, що знижує енерговитрати.

**Другий етап – Розрахунок і вибір обладнання.**

Я провів детальні розрахунки потужності та натягу стрічки. На основі отриманих даних вибрано два асинхронні двигуни моделі УКРАЇНА 5605-6ФУ5 із фазним ротором. Кожен із двигунів має номінальну потужність 315 кВт та ККД 92%.

Для створення силової частини електропривода вибрано:

- вентильний каскад на базі діодів Д243-800-40;
- тиристри інвертора Т353-800-34-72;
- трансформатор ТСЗП-800/0.7-У3 для стабільного живлення.

Це обладнання відповідає умовам експлуатації конвеєра та дозволяє забезпечити задану продуктивність.

### **Третій етап – Розробка системи автоматичного управління (САУ).**

Аналіз динамічних процесів показав, що запуск двигунів призводить до значних коливань у натягу стрічки, які можуть викликати її зношення та пошкодження. Для усунення цих проблем розроблено замкнуту САУ із підлеглим регулюванням.

Структурна схема САУ включає:

- негативний зворотний зв'язок за швидкістю для стабілізації роботи конвеєра;
- позитивний зворотний зв'язок за струмом для корекції роботи двигунів.

Розраховані передатні функції регуляторів дозволяють мінімізувати статизм системи та забезпечити точність управління в межах 5%.

### **Четвертий етап – Моделювання та дослідження динамічних режимів.**

За допомогою програми Simulink виконано моделювання механічних і швидкісних характеристик системи. Отримані результати підтвердили, що система з замкнутим регулюванням забезпечує:

- зниження динамічних навантажень на стрічку;
- стабільність швидкості роботи навіть за змінних умов навантаження.

### **П'ятий етап – Автоматизація технологічних процесів.**

Я розробив функціональну схему мікропроцесорної системи автоматизації, яка враховує специфіку роботи конвеєра. Вона дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації та забезпечує економію енергії.

### **Шостий етап – Аналіз енергетики системи та заходи з енергозбереження.**

Система АВК забезпечує повернення енергії ковзання у мережу, що значно знижує енерговитрати. Я також розробив заходи з оптимізації параметрів роботи

трансформатора та вентильного каскаду, що додатково підвищує ефективність системи.

Реалізація запропонованих рішень дозволить:

- збільшити строк служби конвеєрної стрічки;
- знизити експлуатаційні витрати;
- підвищити продуктивність дробильної фабрики;
- оптимізувати енергоспоживання, що сприяє екологічній стійкості виробництва.