

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **Сергій КОВБАСА**

(підпис)

« ____ » _____ 2023 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»**

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра»

Виконав: студент IV курсу, групи ЕП-92

(шифр групи)

_____ **Дмитрієв Олександр Сергійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник _____ **професор Печеник М. В.**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____



(підпис)

Київ – 2023 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Назва	Кільк	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.ЕП9203.003.БР	Пояснювальна записка	91	
3	A1	141.ЕП9203.003.БР	Технологічна схема магістрального стрічкового конвеєра	1	
4	A1	141.ЕП9203.003.БР	Структурні схеми електромеханічної схеми магістрального стрічкового конвеєра	1	
5	A1	141.ЕП9203.003.БР	Результати досліджень магістрального стрічкового конвеєра	1	

					141.ЕП9203.003.БР		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>«Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра»</u>		
Розроб.		Дмитрієв О. С.					
Перевір.		Печеник М. В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Печеник М. В.					
Затверд.		Ковбаса С. М.			Літ. Арк. Акрушів 2 91 КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-92		

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Дмитрієв Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра

керівник проекту професор Печеник М. В.

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

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2023 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту: 30.05.2023

3. Вихідні дані до проекту: Довжини окремих ділянок: l_{12} – 3м, l_{34} – 3м, l_{56} – 15м, l_{78} – 780м, l_{910} – 800м; тип стрічки – резинотросова; розрахункова продуктивність – 300 т/год; транспортований матеріал – вугілля; кути нахилу окремих прямолінійних ділянок конвеєра: β_{12} – 42 град, β_{34} – 0 град, β_{56} – 35 град, β_{78} – 3 град, β_{910} – 3 град.

4. Зміст пояснювальної записки: 1 аналітичний огляд науково-технічної літератури; 2 розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи; 3

математичний опис елементів механічної схеми конвеєра; 4 дослідження режимів роботи електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра; 5 оформлення пояснювальної записки та графічної частини.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, презентацій тощо): Технологічна схема магістрального стрічкового конвеєра – А1, Структурні схеми електромеханічної схеми магістрального стрічкового конвеєра – А1, Результати досліджень магістрального стрічкового конвеєра – А1, – А1, Додатки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 08.02.2023

Календарний план виконання бакалаврської роботи
студента групи ЕП-92
Дмитрієва О.С.
на тему: "Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра"

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд наукового–технічної літератури	23.04	
2	Розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи	30.04	
3	Математичний опис елементів механічної схеми конвеєра	08.05	
4	Дослідження режимів роботи електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра	20.05	
5	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	30.05	

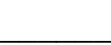
Студент



Олександр ДМИТРИЄВ

(підпис)

Керівник проекту



Микола ПЕЧЕНИК

(підпис)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект, розглянутий на протязі 91 сторінок, представляє докладний аналіз та дослідження в сфері магістрального стрічкового конвеєра. У проекті розглянуті 38 рисунків, 11 таблиць та 3 графічні матеріали у форматі А1, що відображають різні аспекти системи.

В рамках дипломного проекту проведено аналітичний огляд наявної літератури, пов'язаної з магістральним стрічковим конвеєром. Були визначені основні вимоги до електроприводу конвеєра та обрано підхід до керування та систему електроприводу для забезпечення ефективного управління.

На основі проведених розрахунків, в проекті було вибрано оптимальні параметри та характеристики магістрального стрічкового конвеєра.

У рамках програмного забезпечення MATLAB була розроблена математична модель електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра. Ця модель дозволяє детально проаналізувати перехідні процеси, що відбуваються в системі при різних режимах роботи, зокрема при зміні навантажень на систему.

СТРІЧКОВИЙ КОНВЕЄР, СТРІЧКА, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ,
ЕЛЕКТРОПРИВОД, НЕПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ,
АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПІ-РЕГУЛЯТОР, РЕДУКТОР.

					141.ЕП9203.003.БР			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Дмитрієв О.С.			Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра	Лім.	Лист	Листів
Перевір.		Печеник М. В.					6	91
Реценз.						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-92		
Н. Контр.		Печеник М. В.						
Затв.		Ковбаса С.М.						

SUMMARY

This 91-page thesis presents a detailed analysis and research in the field of main belt conveyors. The project includes 38 figures, 11 tables and 3 graphic materials in A1 format, which reflect various aspects of the system.

As part of the diploma project, an analytical review of the available literature related to the main belt conveyor was carried out. The main requirements for the conveyor's electric drive were identified and a control approach and electric drive system were selected to ensure efficient control.

Based on the calculations performed, the project selected the optimal parameters and characteristics of the main belt conveyor.

A mathematical model of the electromechanical system of the main belt conveyor was developed using MATLAB software. This model allows for a detailed analysis of the transient processes occurring in the system under different operating conditions, in particular, when the system loads change.

BELT CONVEYOR, BELT, CONTROL ALGORITHM, ELECTRIC DRIVE, INDIRECT VECTOR CONTROL, INDUCTION MOTOR, PI-CONTROLLER, GEARBOX.

					141.ЕП9203.003.БР			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Дмитрієв О.С.						7	91
Перевір.	Печеник М. В.							
Реценз.								
Н. Контр.	Печеник М. В.							
Затв.	Ковбаса С.М.					НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-92		

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1 Аналіз конструкції та режимів роботи стрічкового конвеєра	10
1.2 Основні вимоги до електроприводів	22
1.3 Огляд наукових досліджень	23
1.4 Аналіз систем електроприводів	28
2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	35
2.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	35
2.2 Розрахунок та вибір редуктора	42
2.3 Вибір перетворювача частоти	45
2.4 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна	46
3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОЇ СХЕМИ КОНВЕЙЕРА	52
3.1 Функціональна схема	52
3.2 Математична модель асинхронного двигуна	55
3.3 Алгоритм векторного керування	56
3.4 Застосування ПІ-регулятора в алгоритмі керування	59
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МАГІСТРАЛЬНОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА	62
4.1 Розробка моделі для дослідження статичних і динамічних характеристик механізму	62
4.2 Програма досліджень	70
4.3 Моделювання роботи двигуна в номінальному режимі і при зміні моменту навантаження	71
ВИСНОВКИ	89
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	91

ВСТУП

Дипломна робота присвячена дослідженню та проектуванню електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра. Сучасні промислові умови вимагають ефективних та надійних систем транспортування, зокрема для перевезення великого обсягу товарів і матеріалів на виробничих підприємствах. Стрічкові конвеєри є одними з найпоширеніших та найефективніших засобів перевезення великих мас, але їхній розвиток вимагає постійного удосконалення.

Метою цієї дипломної роботи є детальне вивчення принципів роботи магістрального стрічкового конвеєра, аналіз існуючих рішень та розробка оптимальної електромеханічної системи для забезпечення надійності та ефективності процесу транспортування.

У рамках дослідження будуть розглянуті основні компоненти та структурні елементи магістрального стрічкового конвеєра, включаючи приводи, редуктори, стрічки, направляючі системи, керуючі пристрої. Для визначення оптимальних параметрів системи будуть враховані такі фактори, як швидкість руху стрічки, максимальне навантаження, величина підйому та інші.

Очікується, що результати цієї дипломної роботи допоможуть вдосконалити електромеханічну систему магістрального стрічкового конвеєра, забезпечуючи його надійну та ефективну роботу. Подальші дослідження та розробки в цій області можуть сприяти підвищенню продуктивності та зниженню витрат на транспортування, що має велике значення для розвитку промисловості та покращення конкурентоспроможності підприємств.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Аналіз конструкції та режимів роботи стрічкового конвеєра

Головним видом транспорту, який працює безперервно, є стрічкові конвеєри. Вони широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як гірництво, вугільна промисловість, енергетичні комплекси і так далі. Довжина цих конвеєрів може досягати 4 кілометрів в одному з'єднанні, а приводні станції можуть мати потужність до 5 мегаватт. Як і в будь-якого іншого виду машин, стрічкові конвеєри мають свої позитивні та негативні аспекти. Серед переваг можна виділити такі: можливість перевозити сировину на великі відстані, висока продуктивність, надійність і невелика вага в порівнянні з іншими видами транспорту.

Стрічкові конвеєри використовуються переважно для переміщення різних видів матеріалів, таких як сипучі, розсипчасті або штучні гірські матеріали. Транспортування сировини може відбуватись по горизонтальній поверхні або з нахилом – вниз або вгору.

Стрічкові конвеєри мають декілька переваг порівняно з іншими методами транспортування матеріалів. Перш за все, вони здатні працювати на значній відстані від початку до кінця транспортного маршруту. Крім того, вони легкі в обслуговуванні, мають низький рівень шуму, дозволяють автоматизувати процеси і забезпечують низькі втрати енергії.

Стрічкові конвеєри мають кілька недоліків порівняно з іншими способами транспортування матеріалів. Вони відзначаються високою вартістю, мають обмежену тривалість експлуатації стрічки і обмежений кут нахилу. Існують ситуації, коли застосування стрічкових конвеєрів є нераціональним або неможливим. Деякі фактори, які впливають на це, включають:

1. Абразивні або грубі матеріали, які не підходять для транспортування по стрічкових конвеєрах.

2. Потреба у значному куті нахилу, який обмежений для стрічкових конвеєрів (залежно від їх конструкції та властивостей матеріалу, можливий нахил до 16-18°).

3. Неможливість встановлення стрічкових конвеєрів на кривих маршрутах, оскільки конвеєрні стрічки мають прямий характер. Використання кількох стрічкових конвеєрів, які працюють спільно для зміни напрямку маршруту, значно ускладнює конструкцію та підвищує вартість.

Стаціонарні магістральні конвеєри мають свої особливості, такі як:

- Комплексний підхід до проектування зв'язуючих вузлів.
- Прив'язка до поверхні технологічного комплексу.

Магістральні стрічкові конвеєри [1] складаються з різних компонентів, серед яких варто виділити:

- Приводну секцію, яка забезпечує передачу руху на стрічку.
- Приводний блок, що містить електродвигун та механізм передачі.
- Секції проміжного приводу, які розташовані між приводною секцією та натяжним пристроєм, щоб підтримувати і приводити в рух стрічку.
- Натяжний пристрій, який підтримує необхідну напругу стрічки та контролює її натяження.
- Перехідні та лінійні стави, які з'єднуються з секціями приводу та натяження, забезпечуючи плавний рух стрічки.
- Вузол сполучення, який дозволяє з'єднати дві стрічки разом, якщо потрібно.
- Кінцева та завантажувальна секції, що відповідають за кінцевий пункт призначення та навантаження матеріалів на стрічку відповідно.

На рис. 1.1 наведена схема стрічкового конвеєра і його основних елементів:

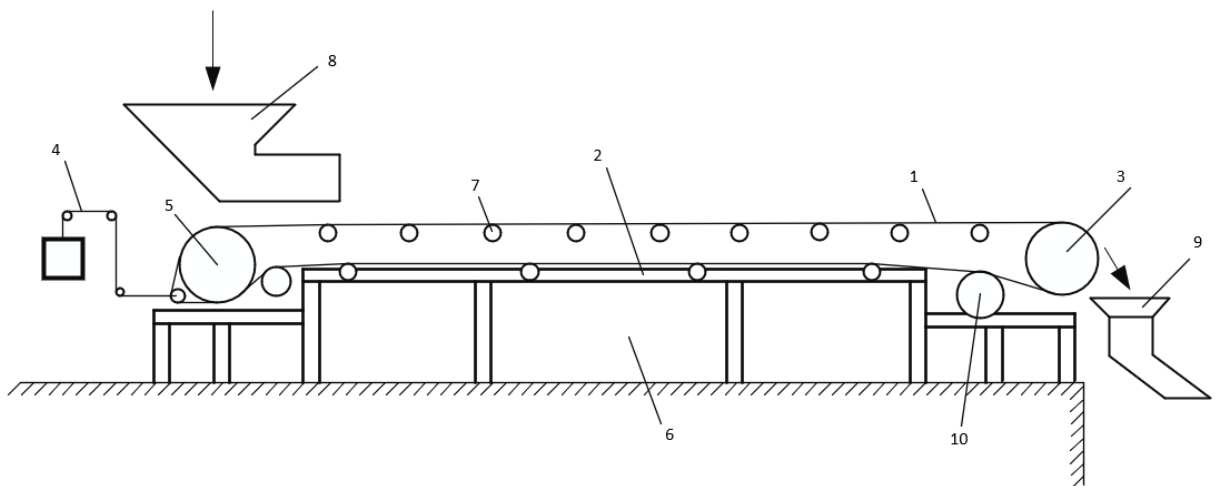


Рисунок 1.1 – Схема стрічкового конвеєра

- 1 – стрічка конвеєра;
- 2 – роликовий став;
- 3 – приводний барабан;
- 4 – натяжний пристрій;
- 5 – натяжний барабан;
- 6 – конвеєрний став;
- 7 – ролики з роликоопорами робочої гілки;
- 8 – завантажувальний пристрій;
- 9 – розвантажувальний пристрій;
- 10 – відхиляючий барабан.

Стрічка конвеєра виконує кілька функцій одночасно: вона переносить вантаж і служить як тяговий елемент. Рух стрічки здійснюється за допомогою фрикційного зчеплення з приводним барабаном. Під час переміщення вантажу стрічка витримує значні навантаження, які виникають від самого вантажу, натягу стрічки, тертя між матеріалом і стрічкою, а також між стрічкою і іншими елементами. Також важливими факторами є температура, вологість та інші умови навколишнього середовища. Під вагою вантажу стрічка прогинається між роликовими опорами і барабанами. Вона зазвичай

виготовляється з бавовняних або синтетичних матеріалів, а також може містити внутрішні троси для більшої міцності.

У гумовотканинних стрічках використовуються прокладки з різних тканин, розташованих паралельно одна одній вздовж стрічки і з'єднаних гарячою вулканізацією. Додатково над першою прокладкою розміщується захисна (брекерна) тканина, яка захищає прокладку від пошкоджень.

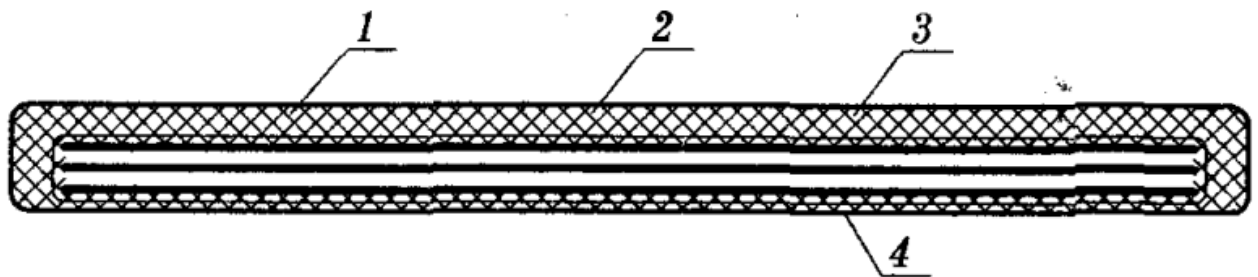


Рисунок 1.2 – Гумовотканинна стрічка. 1, 4 – верхня і нижня обкладки, 2 – захисна тканина, 3 – прокладки

Верхня 1 і нижня 4 обкладки служать для захисту тягового каркаса від пошкоджень і зношування.

В залежності від умов експлуатації та призначення, стрічки конвеєра виготовляються в трьох типах і кількох варіантах. Існують загальні стрічки, які використовуються в різних умовах, а також спеціальні типи, такі як морозостійкі, теплостійкі, важкогорючі (для вугільних і сланцевих шахт), важкогорючі морозостійкі і харчові стрічки.

При розрахунку товщини каркаса для загальних стрічок типу 1 також враховують товщину захисної прокладки з гумовим покриттям, яка становить $3,2 + 0,4$ мм.

Гумовотканинні стрічки, які випускаються, мають обмежену довжину до 300 метрів. На місці експлуатації проводиться з'єднання кінців стрічок, при цьому важливо мати високу міцність, гнучкість і довговічність з'єднання, щоб

забезпечити безперешкодний прохід по роликах, барабанах і розвантажувальних пристроях.

Гумотканинні стрічки з'єднують за допомогою гарячої або холодної вулканізації, дотримуючись інструкцій виробників стрічок. З'єднання і монтаж стрічок типу 2Т2 проводяться при температурі навколишнього повітря не нижче 0°C. Стрічки з тканинною основою міцністю до 100 Н/мм і шириною до 1 200 мм можуть бути з'єднані механічними методами відповідно до технічної документації, яка затверджена виробником стрічок.

Плоскі ремені, які використовуються у стрічкових ковшових елеваторах як тягові елементи, існують у трьох видах: загального призначення, морозостійкі та антистатичні. Ремені загального призначення та антистатичні придатні для роботи в температурному діапазоні від -20 до +60 °С, тоді як морозостійкі ремені працюють від -45 до +60 °С. Товщина зовнішніх обкладок ременів може бути 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 мм, а для антистатичних ременів - не менше 2,0 мм.

Гумотросові стрічки мають тяговий каркас, що складається зі сталевих канатів, які мають латунізовану поверхню для кращого зчеплення з гумою. Канати розташовані в одному ряду паралельно один одному уздовж стрічки, і з'єднані кількома тканинними прокладками. Верхня прокладка покрита гумою, а нижня також має гумову обкладку.

Довжина випускаємих стрічок не перевищує 300 метрів. Гумовотканинні стрічки мають перевагу великого вибору за міцністю, високої стійкості до поздовжніх поривів та великої амортизаційної здатності при динамічних навантаженнях. Однак, недоліком є значне подовження (до 4%) при робочих навантаженнях.

Гумотросові стрічки мають переваги високої міцності, малого подовження під час робочих навантажень (до 0,25%) та тривалого терміну служби. Однак, серед недоліків можна відзначити велику масу, складність з'єднання кінців стрічки та меншу стійкість до поздовжніх поривів.

Термін служби конвеєрних гумовотканинних стрічок залежить від умов експлуатації, характеристик перевезеного вантажу, типу стрічки, її довжини та швидкості. Для загальних стрічок і морозостійких стрічок можна знайти рекомендаційні значення середнього терміну служби в таблиці 3.25. Проте, ці дані є лише орієнтовними, оскільки не враховуються ряд важливих факторів.

Конвеєрний став - це середня частина стрічкових транспортерів, яка складається з коротких проміжних секцій, з'єднаних між собою. Загальний вигляд конвеєрного ставу без стрічки показаний на рисунку 1.2.



Рисунок 1.3 – Схема стрічкового конвеєра

Роликоопора. (рис. 1.3) Складається з роликоопор , і стійок. Стрічка рухається по роликоопорам конвеєрного ставу.

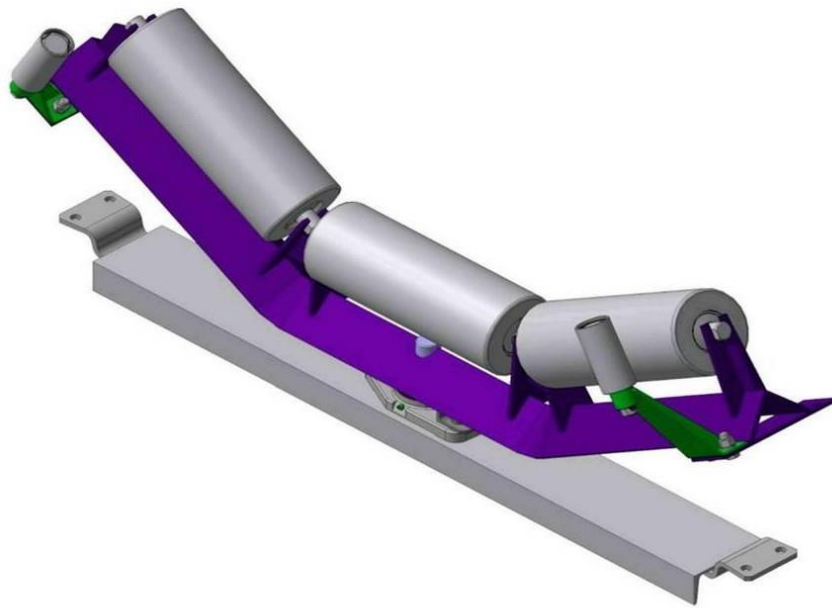


Рисунок 1.3 – Секція роlikоопори конвеєрного става

Передача сили на стрічку транспортера здійснюється за допомогою приводного механізму. Основними компонентами приводу є приводні барабани, натяжні барабани, відхиляючі барабани і силові агрегати.

Приводні барабани відіграють роль у передачі сили від барабана до стрічки за допомогою фрикційного зчеплення. Діаметр приводного барабана залежить від довжини конвеєра, типу матеріалу стрічки і кількості прокладок у стрічці. Ширина приводного барабана зазвичай перевищує ширину стрічки на 150-200 мм. Кількість приводних барабанів у конструкції стрічкового транспортера може варіюватись від одного до трьох, залежно від продуктивності, довжини і кута нахилу транспортера. За допомогою відхиляючих барабанів і збільшенням кута обхвату стрічкою приводного барабана можна досягти максимальної передачі сили на стрічку.

Барабани для стрічкових конвеєрів поділяють на приводні, натяжні і відхиляючі. Вони можуть бути виготовлені з чавуну або звареної листової сталі, зовнішню поверхню обробляють для поліпшення характеристик. Приводні барабани часто мають гумове покриття, що забезпечує краще

зчеплення зі стрічкою. Існує ряд номінальних діаметрів для приводних і не приводних барабанів без гумового покриття.

Барабани зазвичай кріпляться на підшипниках кочення, приводні барабани закріплюються на валу за допомогою шпонки. Натяжні і відхиляючі барабани можуть бути розміщені на обертових або нерухомих осях.

Натяжний пристрій необхідний для підтримки натягу стрічки, запобігання проскальзування приводних барабанів, контролю провисання стрічки та компенсації її розтягнення під час роботи. Натяг стрічки, швидкість руху натяжного барабана і довжина його ходу є основними параметрами натяжного пристрою. Хід натяжного барабана потрібний для компенсації розтягнення стрічки і дозволяє скоротити її при з'єднанні після обриву. Існує багато різновидів завантажувальних пристроїв, які забезпечують рівномірне розподілення матеріалу по ширині стрічки без втрат та розпилювання.

Для запобігання наклеювання матеріалу на стрічку використовуються очисні пристрої. Ці пристрої зазвичай представляють собою шкребки, армовані резиновими полосами, і розташовуються на нижній гілці стрічки близько до приводного механізму, щоб надійно притискуватися до поверхні стрічки без пошкоджень.

Режими роботи конвеєра визначаються навантаженнями, тривалістю їх дії і відповідають різним класам використання залежно від часу, продуктивності та натягу тягового елемента. Вони використовуються для розрахунку міцності та довговічності елементів конвеєра і служать показниками фактичного використання машини протягом робочого періоду.

Класи використання конвеєра за часом відображаються коефіцієнтами, що відносять плановий робочий час конвеєра за добу до загального часу доби $k_{\text{доб}}$ і року $k_{\text{річ}}$.

$$\begin{aligned} k_{\text{доб}} &= t_{\text{доб}} / t'_{\text{доб}}, \\ k_{\text{річ}} &= t_{\text{річ}} / t'_{\text{річ}}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $k_{\text{доб}}, k_{\text{річ}}$ – плановий час роботи конвеєра за добу та рік відповідно; $t'_{\text{доб}}, t'_{\text{річ}}$ – календарний час роботи конвеєра за добу та рік відповідно.

Розподіл класів використання за часом наведено у табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Класи використання конвеєрів за часом

Клас по часу	Доба		Рік	
	$t'_{\text{доб}}, \text{год}$	$k_{\text{доб}}$	$t'_{\text{річ}}$	$k_{\text{річ}}$
1	2	3	4	5
Ч1	< 5	< 0.20	< 1600	< 0.20
Ч2	5...7	0.20...0.32	1600...2500	0.20...0.32
1	2	3	4	5
Ч4	16...24	0.63...1.00	4000...6300	0.50...0.80
Ч5	24	1.0	6300...8000	0.80...1.00

Класи використання конвеєра за продуктивністю характеризуються коефіцієнтом k_n , значення якого визначається за такою формулою:

$$k_n = Q_{\text{сер}} / Q_{\text{max}} = Z_{\text{сер}} / Z_{\text{max}}. \quad (1.2)$$

де $Q_{\text{сер}}, Q_{\text{max}}$ – середня і максимальна масові продуктивності конвеєра відповідно, т/рік;

$Z_{\text{сер}}, Z_{\text{max}}$ – середня і максимальна штучні продуктивності конвеєра.

Основними визначниками режиму є класи їх використання за часом (Ч) та продуктивності (П), вони придатні для конвеєрів з тяговим елементом без нього.

Класи використання конвеєра за вантажопідйомністю (З) і за натягом тягового елемента (Ц) є додатковими ознаками та враховуються у перевірочних розрахунках та порівняльному аналізі експлуатованих конвеєрів, а також у розрахунках довговічності елементів конвеєра.

Використання конвеєра по вантажопідйомності вантажонесучого елемента (візок, підвіски, каретки, платформи тощо) при транспортуванні штучних вантажів характеризуються коефіцієнтами максимальної $k_{\max}$ та еквівалентної $k_{\text{екв}}$ завантаження вантажонесучого елемента конвеєра (табл. 1.2).

$$k_{\max} = F_{\max} / F_{\text{ном}}. \quad (1.3)$$

де $F_{\max}$ – максимальне фактичне завантаження одного візка на робочій гілці;

$F_{\text{ном}}$ – номінальна вантажопідйомність візка.

Таблиця 1.2 – Класи використання конвеєрів по вантажопідйомності вантажонесучого елемента

Клас завантаження	Коефіцієнт завантаження	
	$k_{\max}$	$k_{\text{екв}}$
31	< 0.50	< 0.25
32	0.50...0.63	0.25...0.50
33	0.63...1.00	0.50...0.80

Класи використання конвеєра за натягом тягового елемента характеризуються коефіцієнтами максимального $k'_{\max}$ еквівалентного $k'_{\text{екв}}$ натягу (табл. 1.3).

$$k'_{\max} = S_{\max} / S_{\text{доп}}. \quad (1.4)$$

де $S_{\max}$, $S_{\text{доп}}$ – відповідно максимальне та допустиме натягування тягового елемента.

Таблиця 1.3 – Класи використання конвеєрів з натягу тягового елемента

Клас натягу	Коефіцієнт натягу	
	$k'_{\max}$	$k'_{\text{екв}}$
Ц1	< 0.63	< 0.16
Ц2	$0.63 \dots 0.80$	$0.16 \dots 0.32$
Ц3	$0.80 \dots 1.00$	$0.32 \dots 0.63$

Встановлені класи використання регламентують п'ять режимів роботи конвеєрів (табл. 1.4 і табл. 1.5).

Наведену класифікацію режимів роботи конвеєрів офіційно не регламентовано. Використовують для оцінки втомної міцності елементів конвеєра.

Таблиця 1.4 – Режими роботи конвеєра за класами використання

Клас за часом	Клас використання								
	за продуктивністю			по вантажопідйомності			за натягом		
	П1	П2	П3	З1	З2	З3	Ц1	Ц2	Ц3
Ч1	ДЛ	ДЛ	Л	ДЛ	ДЛ	Л	ДЛ	Л	С
Ч2	Л	Л	С	Л	Л	С	Л	Л	С
Ч3	С	С	В	С	С	В	С	С	В
Ч4	В	В	ДВ	В	В	ДВ	В	В	ДВ
Ч5	В	ДВ	ДВ	В	ДВ	ДВ	В	ДВ	ДВ

де ДЛ – дуже легкий, Л – легкий, С – середній, В – важкий, ДВ – дуже важкий

Таблиця 1.5 – Режими роботи та приклади використання конвеєрів

Час роботи на добу	Клас використання за часом	Режими роботи	Приклад використання
Менше однієї зміни	B1	ВЛ	Конвеєри на окремих секціях складу; для прибирання стружки або землі
Одна зміна Дві зміни Три зміни	B2 B3 B4	Л С Т	Конвеєри транспортні на підприємствах різних галузей промисловості
Цілодобово	B5	ВТ	Конвеєри, що обслуговують безперервні технологічні процеси

Основні режими роботи стрічкових конвеєрів включають:

1. Автоматичний режим: В цьому режимі конвеєр працює повністю автоматично без необхідності втручання людини. Його можна налаштувати для регулювання швидкості руху стрічки, завантаження та розвантаження матеріалів, а також для виявлення аварійних ситуацій, таких як перевантаження, затори або відсутність матеріалів на стрічці.
2. Ручний режим: В цьому режимі оператор керує роботою конвеєра вручну, встановлює необхідну швидкість руху стрічки, вмикає та вимикає завантаження та розвантаження матеріалів, контролює процес роботи та втручається за потреби.
3. Реверсивний режим: Конвеєр може працювати в реверсивному режимі, коли напрямок руху стрічки може змінюватися в залежності від виробничих або обслуговувальних потреб конвеєра.

4. Режим регулювання швидкості: Конвейер може бути налаштований на регулювання швидкості руху стрічки відповідно до вимог виробництва, розміру та ваги матеріалів, а також інших факторів.

5. Режим зупинки: Конвейер може бути зупинений у випадку потреби, наприклад, для виконання ремонтних робіт, очищення стрічки від залишків матеріалів або для інших цілей.

1.2 Основні вимоги до електроприводів

Можна виділити вимоги до електроприводу, які будуть задовольняти правильну, коректну, ефективну і надійну роботи системи [5]:

1. Ефективність: електропривід повинен мати достатню потужність для руху конвеєрної стрічки з вантажем при необхідній швидкості і з мінімальним енергоспоживанням.

2. Надійність: електропривід повинен бути надійним і безперебійно працювати тривалий період часу, надійність роботи в забрудненій атмосфері і агресивному середовищі при широкому діапазоні коливання температур і навантаження.

3. Простота в експлуатації: електропривід повинен бути простим у використанні та обслуговуванні, з легким доступом до всіх необхідних компонентів.

4. Керованість: електропривід повинен мати можливість контролювати швидкість і напругу для ефективного та безпечного руху конвеєрної стрічки.

5. Безпека: електропривід повинен відповідати вимогам безпеки та мати захисні пристрої для запобігання небезпечним ситуаціям на конвеєрі. Наявність всіх необхідних захистів в електромеханічній системі (максимально струмовий захист, тепловий захист двигуна, захист при зповзанні та обриві стрічки, захист при від перевищень та падінь напруги).

6. Мінімальний рівень шуму: електропривід повинен бути тихим, щоб зменшити шум на робочому місці.
7. Екологічність: електропривід повинен задовольняти вимоги екологічної безпеки та мінімізувати негативний вплив на довкілля.
8. Вартість: електропривід повинен бути доступним за ціною та забезпечувати економічну рентабельність виробництва.
9. Підтримання сталої швидкості в режимі компенсації навантаження (усталений режим).
10. Плавність розгону і гальмування (обмежений ривок, траєкторія прискорення 1-го порядку).
11. Обмеження максимального моменту на валу електродвигуна;
12. Наявність екстреного гальмування за рахунок електродвигуна

1.3 Огляд наукових досліджень

В одному з наукових патентів [2] розглянуто стрічковий конвеєр.

Стрічковий конвеєр може включати безліч сегментів або зон, кожна з яких включає безперервну стрічку, прокладену навколо безлічі роликів. Кожна із зон конвеєра містить приводний ролик і щонайменше один натяжний ролик і може працювати незалежно для переміщення виробів уздовж стрічкового конвеєра або для накопичення виробів на одній або декількох з зон стрічкового конвеєра. Цей винахід також передбачає кутову секцію стрічкового стрічкового роликового конвеєра, яка може бути розміщена на конвеєрі або транспортному шляху або системі, такій як стрічковий конвеєр або роликовий конвеєр, для подачі або вивантаження виробів на транспортну систему або з транспортної системи. Кутова ділянка конвеєра містить безліч роликів різної довжини, розташованих таким чином, щоб визначити кутовий спряжений кінець кутової ділянки конвеєра, і безліч стрічкових смуг різної довжини,

намотаних або прокладених або розміщених навколо роликів і моторизованого ролика.

Відповідно до одного з аспектів цього винаходу, стрічковий конвеєр містить приводний ролик і принаймні один натяжний ролик, розташований уздовж і між протилежними боковими стінками конвеєра, а також безперервну стрічку з рифленням навколо приводного ролика і натяжного ролика.

Приводний ролик приводить у рух стрічку навколо роликів для переміщення виробів вздовж стрічкового конвеєра. Стрічка має низьку модульну характеристику. Початкове розтягнення стрічки може становити щонайменше приблизно 0,75% у поздовжньому напрямку стрічки, коли стрічка намотується або розташовується навколо роликів. Низькомодульна характеристика стрічки може забезпечити приблизно від 2% до 4% або більше здатності до розтягування або характеристики стрічки.

Стрічковий конвеєр може складатися з двох або більше зон, які можуть працювати незалежно, що дозволяє накопичувати вироби в одній або більше зонах вздовж стрічкового конвеєра. Кожна зона може містити датчик виробів, який працює для виявлення виробів на стрічці відповідної зони, при цьому моторизований ролик кожної зони працює у відповідь на датчик і конкретне застосування сегментованого стрічкового конвеєра.

За бажанням, стрічковий конвеєр може бути виконаний під нахилом або під ухилом, і може бути придатним для накопичення виробів на нахилі або під ухилом.

Стрічковий конвеєр містить протилежні бокові стінки, приводний ролик і принаймні один натяжний ролик, встановлений з можливістю обертання на протилежних бокових стінках і між ними, безперервну стрічку, намотану на приводний ролик і натяжний ролик або ролики, і принаймні один датчик виробів, придатний для виявлення виробів на стрічці. Ролик з електродвигуном містить внутрішній двигун, який може обертатися для приведення в рух роlikової частини ролика відносно осі ролика. Ролик з

електродвигуном може приводити в рух стрічку для транспортування виробів вздовж стрічкового конвеєра. Моторизований ролик може вибірково спрацьовувати у відповідь на датчик або датчики виробу.

Стрічковий конвеєр може складатися щонайменше з двох тандемних зон. Моторизований ролик кожної з тандемних зон може працювати незалежно від інших моторизованих роликів інших тандемних зон, щоб забезпечити накопичення виробів в одній або декількох тандемних зонах. Моторизований ролик може вибірково та незалежно працювати у відповідь на спрацьовування датчика виробів у кожній зоні, щоб забезпечити накопичення виробів у зонах стрічкового конвеєра.

Безперервна стрічка може мати низькомодульну характеристику, яка забезпечує розтягнення стрічки приблизно на 1,5% або більше, а також може забезпечувати розтягнення стрічки приблизно на 2% або 4% або більше. Стрічка може мати принаймні приблизно 0,75% початкового розтягування в поздовжньому напрямку стрічки, коли стрічка намотана або розташована навколо роликів.

Згідно з іншим аспектом цього винаходу, кутова ділянка конвеєра сконфігурована таким чином, щоб розташовуватися вздовж основного транспортного шляху для транспортування виробів, які вивантажуються з транспортного шляху, в сторону від транспортного шляху. Кутова ділянка конвеєра розташована під кутом відносно транспортного шляху і містить протилежні бокові стінки та кутову рамну частину, що визначає кутову сполучну кромку кутового конвеєра для позиціонування поруч з боковою стороною транспортного шляху. Секція кутового конвеєра також містить безліч роликів, включаючи приводний ролик і безліч натяжних роликів.

Принаймні деякі з натяжних роликів мають довжину, відмінну від довжини інших роликів. Навколо деяких роликів намотано безліч стрічкових смуг. Ролики різної довжини встановлені на кутовій частині рами та одній з боковин і розташовані в порядку зростання довжини вздовж кутового

конвеєра, щоб визначити поверхню транспортування кутового роликового конвеєра. Принаймні деякі стрічкові смуги мають довжину, відмінну від довжини інших стрічкових смуг, і намотані навколо моторизованого ролика та різних роликів різної довжини. Стрічкові смуги та ролики визначають поверхню транспортування стрічки вздовж кутової секції конвеєра з кутовим сполучним краєм, розташованим поруч із транспортною траєкторією.

Моторизований ролик може бути розташований на кінці кутової секції конвеєра, протилежному до кутової частини рами. Моторизований ролик або один чи декілька інших роликів можуть включати в себе множину пристроїв відстеження, придатних для відстеження множини стрічкових смуг на моторизованому ролику. Принаймні деякі з роликів різної довжини можуть містити відповідні пристрої відстеження, які можуть відстежувати відповідні смуги стрічки з множини смуг стрічки на роликах різної довжини. Пристрої відстеження можуть містити смуги або коронки навколо відповідних роликів.

Таким чином, стрічковий конвеєр може мати безліч незалежно працюючих зон або сегментів, кожен з яких включає безперервну конвеєрну стрічку, що приводиться в рух моторизованим роликом. Зони можуть працювати разом як стрічковий конвеєр, що загалом працює безперервно, або можуть працювати окремо як накопичувальний конвеєр з керуванням зонами та фотоелементами або датчиками. Стрічковий конвеєр із зонним керуванням працює подібно до роликового конвеєра із зонним керуванням, але з конвеєрною стрічкою, намотаною навколо приводного ролика та натяжних роликів, а не з кількома кільцевими ущільнювачами або подібними пристроями, що з'єднують натяжні ролики з приводним роликом кожної зони. Таким чином, стрічковий конвеєр за цим винаходом здатний накопичувати вироби під нахилом або на спуску. Оскільки приводний ролик кожної зони може керувати або приводити в рух лише невелику ділянку стрічки або зону, навантаження і знос приводного ролика зводяться до мінімуму, що забезпечує більш тривалий термін служби приводного ролика.

Кутова ділянка конвеєра за цим винаходом забезпечує по суті безперервну стрічкову транспортувальну поверхню під кутом для прилягання або сполучення з конвеєрним або транспортним шляхом. Кутова ділянка конвеєра містить моторизований ролик, який може приводити в дію ролики різної довжини кутової ділянки конвеєра через безліч стрічкових смуг різної довжини, натягнутих навколо моторизованого ролика і роликів різної довжини ділянки конвеєра. Таким чином, кутова ділянка конвеєра за цим винаходом має приводний або моторизований ролик і поверхню для транспортування стрічки, яка не потребує спеціального прокладання стрічки під кутовою ділянкою для вирівнювання стрічки з кутовою сполученою поверхнею або краєм.

В одному з патентів [3] розглянуто зменшення витрат електроенергії при роботі конвеєра. Найбільш близьким за технічною сутністю і ефектом, що досягається, є конвеєр, що містить головний і хвостовий барабани, стрічку і роликкоопори з центральними роликами на вантажному вітві стрічки, встановлені на пружних елементах.

Недоліками даного конвеєра є нерівномірні прогини стрічки між роликкоопорами, і, як наслідок цього, підвищені енерговитрати. Крім того, відбувається відрив вантажу від стрічки під час проходження через роликкоопори, що перешкоджає збільшенню швидкості руху стрічки. Зменшення прогинів стрічки з вантажем шляхом збільшення її попереднього натягу веде до збільшення кількості прокладок стрічки, а зменшення прогинів за рахунок зменшення кроку роликкоопор – до збільшення кількості роликкоопор на ставі конвеєра.

Мета винаходу – зменшення енерговитрат транспортування шляхом зміщення роликкоопор у вертикальній площині відносно площини дотичної до барабанів за навантаженої стрічки.

Зазначена мета досягається тим, що в стрічковому конвеєрі, який містить головний і хвостовий барабани, стрічку та роликкоопори з центральними

роликами на вантажній гілці стрічки, що встановлені на пружних елементах, пружні елементи встановлені зі зростаючою їхньою жорсткістю від хвостового барабана до головного з можливістю зменшення відстані між осями центральних роликів та площиною, дотичною до головного та хвостового барабанів.

1.4 Аналіз систем електроприводів

Конвеєри розділяються на різні типи залежно від їх області застосування [1], способу передачі рушійної сили, застосування рушійної сили, роду переміщуваних вантажів, призначення та становища на виробничій місцевості.

Один з способів класифікації полягає в розрізненні конвеєрів загального призначення та спеціалізованих. Конвеєри загального призначення використовуються в різних галузях економіки, тоді як спеціалізовані конвеєри можуть бути застосовані в будь-якій конкретній галузі.

Інший аспект класифікації визначається способом передачі рушійної сили для переміщення вантажу. Це можуть бути механічні конвеєри, де рушійною силою є стрічка, ланцюг, канат або інші елементи, або самопливні пристрої, де переміщення вантажу відбувається за рахунок сили тяжіння. Також існують пневматичні конвеєри, де рушійною силою є потік повітря.

За характером застосування рушійної сили можна виділити конвеєри з тяговим елементом (стрічкою, ланцюгом, канатом тощо) та без нього (інерційні, роликові та інші типи).

Конвеєри також класифікуються за родом переміщуваних вантажів. Це можуть бути конвеєри для транспортування насипних матеріалів (застосовуються стрічкові, пластинчасті, ковшові, скребкові, гвинтові конвеєри), для штучних вантажів (застосовуються стрічкові, пластинчасті, візкові, люлечні, підвісні, роликові конвеєри) або для транспортування людей.

Також важливим фактором при виборі стрічкового конвеєра є: характеристики вантажу, необхідна продуктивність, довжина та конфігурація траси транспортування, способи завантаження та розвантаження вантажів, а також продуктивні та кліматичні умови навколишнього середовища.

Привід конвеєра забезпечує постійну або змінну швидкість руху тягового елемента. Зміна швидкості може бути здійснюватися плавно або ступінчасто. Плавна зміна швидкості, необхідна для виконання технологічного процесу на конвеєрі або для оптимального використання конвеєра при завантаженні, досягається за допомогою варіатора, встановленого в приводному механізмі, або спеціальних муфт, що з'єднують електродвигун приводу з редуктором. Також можуть використовуватися гідроприводи, частотні перетворювачі або електродвигуни постійного струму.

Ступінчаста зміна швидкості досягається за допомогою коробки передач, набору змінних передач або багатошвидкісних електродвигунів. Існують два типи приводів для передачі тягового зусилля: приводи з передачею зусилля зачепленням і фрикційні приводи, що передають тягове зусилля тертям. Фрикційні приводи застосовуються для стрічкових конвеєрів, а приводи з передачею зусилля зачепленням - для ланцюгових конвеєрів.

Приводи можуть бути кутовими (встановлюються на повороті), прямолінійними зі звичайною зіркою або гусеничними. Гусеничний привід має менший діаметр приводної зірки порівняно з кутовим, що призводить до меншого крутильного моменту і компактніших розмірів механізмів при однаковому тяговому зусиллі і швидкості конвеєра. Крім того, гусеничний привід може бути встановлений на будь-якій горизонтальній ділянці траси конвеєра, що надає більше можливостей для оптимального розташування приводу.

У нових конструкціях ланцюгових конвеєрів використовують гусеничні приводи з плоскими електромагнітами, які прикріплені до приводного ланцюга. Електромагніти притягують ланки тягового ланцюга конвеєра і

передають їм рушійну силу від приводного ланцюга гусеничного приводу. Живлення магнітів електричним струмом здійснюється за допомогою тролей і струмознімачів таким чином, що струм надходить у магніти тільки під час їхнього руху на прямолінійній ділянці, а на поворотних зірках і зворотній гілці магніти знеструмлюються.

Фрикційні гусеничні приводи, що передають рух тяговому елементу за допомогою сил тертя, не є широко застосовуваними через необхідність значної загальної довжини фрикційного гусеничного приводу для отримання достатнього тягового зусилля, особливо на похилих конвеєрах. Вони також мають більшу складність устрою і вищу вартість через наявність двох візочків і приводного ланцюга.

Залежно від кількості приводів, розташованих на трасі, конвеєри поділяються на однопривідні і багатопривідні. Багатопривідний конвеєр має кілька проміжних приводних механізмів з окремими електродвигунами, розташованими на трасі. Використання проміжних приводів дозволяє значно зменшити натяг і використовувати тягові елементи меншої міцності на великих конвеєрах.

Привод конвеєра може мати один, два або три окремі електродвигуни. Встановлення двох двигунів на один приводний вал використовується для заміни одного великого двигуна і редукторів меншої потужності, а також для компактнішого планування приводу. Три двигуни застосовуються в двобарабанному приводі стрічкового конвеєра. Об'єднані приводи дозволяють одному двигуну одночасно приводити у рух дві або навіть три приводні зірочки конвеєра за допомогою передавального механізму.

Електроприводи, які широко використовуються, використовують асинхронні електродвигуни з трьохфазним струмом. Для багатопривідних конвеєрів використовують двигуни з підвищеним ковзанням або з фазним ротором із додатковим опором для збільшення ковзання, а також для конвеєрів

важкого типу з підвищеним пусковим моментом. Електродвигуни постійного струму рідко використовуються.

Гідравлічний привід у конвеєрах застосовується обмежено, переважно в умовах вибухонебезпечного середовища, таких як вугільні шахти, або в конвеєрах, що вбудовані у складні машини з гідравлічним приводом. Його перевагами є компактність, можливість плавного регулювання швидкості і вибухобезпечність, але недоліками є низька ефективність та обмежений термін служби.

Для сучасних конвеєрів перспективним є використання лінійних асинхронних двигунів поступального руху, що дозволяє уникнути складних редукторів.

Приводи барабанів широко використовують одноредукторні приводи з циліндричними або конічно-циліндричними редукторами. Для невеликих потужностей привід може бути вбудованим у барабан і називається мотор-барабан.

У приводах ланцюгових конвеєрів низькі кутові швидкості приводних зірочок вимагають більшого передавального числа приводу. Зазвичай застосовують одноредукторний привід з відкритою зубчастою передачею або дворедукторний привід.

Для визначення вимог до електроприводів і систем управління, потрібно врахувати особливості статичних і динамічних властивостей конвеєрних установок.

Електричні приводи конвеєрів повинні працювати без перевертання напрямку руху [4] в тривалих режимах при змінному навантаженні. В деяких випадках, наприклад, коли конвеєр працює під нахилом, електропривод повинен працювати як у динамічному, так і в гальмівному режимах. Послідовне включення і відключення конвеєрів має бути забезпечено, якщо вони встановлені послідовно і виконують перевантаження матеріалу з одного конвеєра на інший.

Включення конвеєрів повинно відбуватися в напрямку, що протилежний напрямку руху вантажу, а відключення повинно здійснюватися в напрямку руху вантажу для уникнення накопичення матеріалу в точках перевантаження. Для конвеєрів зі змінним навантаженням на магістральних конвеєрах регулювання швидкості тягового органу вважається доцільним для забезпечення постійного навантаження. Це підвищує енергоефективність використання конвеєрів, скорочує пробіг тягового органу і продовжує ресурс дорогоцінної конвеєрної стрічки.

Для багатопровідних конвеєрів електричний привід повинен забезпечувати розподіл навантаження і уникати ковзання стрічки. При великій довжині конвеєра особливо важливо обмежити прискорення при пуску, забезпечити надійне зчеплення стрічки з барабаном та вантажем, і уникнути динамічних коливальних навантажень.

При використанні електроприводів з регульованою швидкістю на конвеєрних системах, що забезпечують плавний пуск, контроль швидкості стрічки конвеєра, обмеження динамічних навантажень і вирівнювання між приводами, найменший діапазон регулювання швидкості складає 10:1.

А даному проєкті буде використовуватись одноприводний конвеєр, так як він має деякі переваги, які можуть робити його привабливим в деяких випадках. Ось кілька причин, чому варто розглянути одноприводний тип приводу:

1. Економічність: Одноприводні конвеєри зазвичай потребують менше енергії для роботи, оскільки їх можна приводити в рух всього одним електродвигуном. Це може призвести до зниження витрат на споживання електроенергії.
2. Простота управління: За допомогою одного приводного механізму можна керувати всім конвеєром. Це спрощує систему управління та зменшує кількість необхідного обладнання.

3. Висока надійність: Одноприводні конвеєри мають менше рухомих частин та з'єднань, що може знизити ризик поломок та витрат на підтримку. Крім того, вони зазвичай потребують менше обслуговування.

4. Простота монтажу: Одноприводні конвеєри зазвичай мають просту конструкцію, що полегшує їх монтаж та встановлення. Це може призвести до скорочення часу встановлення та зниження витрат на робочу силу.

Важливо враховувати, що вибір типу приводу залежить від конкретних вимог та умов роботи конвеєра. У деяких випадках, де потрібна більша сила або точність, може бути доцільнішим використання багатопроводових систем.

В даній роботі буде розглядатись система ПЧ-АД. Ця система відноситься до систем приводу, що складаються з перетворювача частоти (ПЧ) та асинхронного двигуна (АД). Система ПЧ-АД з векторно-керованими АД (Vector Control) є покращеною версією системи ПЧ-АД, яка надає ще більшу точність та контроль над роботою двигуна. Ось кілька причин, чому варто обрати систему ПЧ-АД з векторно-керованими АД:

1. Висока точність контролю: Система векторного керування дозволяє отримати максимально точний контроль над моментом, швидкістю та позиціонуванням двигуна. Вона враховує електричні та механічні параметри двигуна, що дозволяє забезпечити точність та стабільність роботи навіть при зміні навантаження або зміні умов роботи.

2. Висока динаміка: Система векторного керування дозволяє забезпечити високу динаміку роботи двигуна. Вона дозволяє швидко реагувати на зміни навантаження та змінювати швидкість та момент обертання з високою точністю. Це особливо важливо в додатках, де потрібна швидка реакція на зміну умов або точне позиціонування.

3. Висока ефективність: Система векторного керування дозволяє забезпечити високу енергоефективність. Вона оптимізує споживання енергії

та зменшує втрати, що дозволяє економити електроенергію та знижувати витрати на електроживлення.

4. **Можливість роботи при низьких швидкостях:** Система векторного керування дозволяє двигунам працювати при низьких швидкостях з високою точністю. Це особливо важливо в додатках, де потрібне плавне рухоме обладнання або точне позиціонування.

Висновки до розділу 1

На основі аналізу режимів роботи і конструкції стрічкових конвеєрів сформовано вимоги до електроприводу. В результаті аналізу важливих систем електроприводів обрано як найбільш перспективна система перетворювача частоти-електродвигун з використанням векторно-керованого асинхронного електродвигуна. Отримані результати дозволяють виконати розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи транспортного механізму безперервної дії.

2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна

Задана варіантом роботи структурна схема стрічкового конвеєра показана на рис. 2.1.

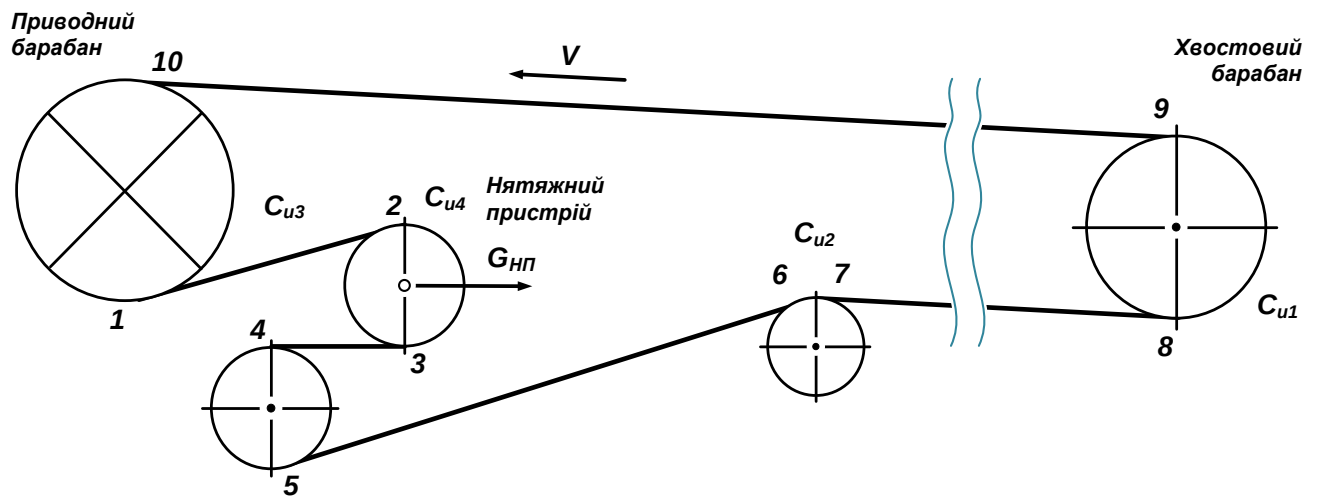


Рисунок 2.1 – Задана структурна схема стрічкового конвеєра

Задані варіантом параметри конвеєра представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 2.1 – Задані параметри конвеєра

Параметри конвеєра		Значення
Назва	Позначення	
1	2	3
Продуктивність	Π , кг/год	300 000
Швидкість руху стрічки (обрано самотійно)	v , м/с	1,5
Погонна маса стрічки (визначено самотійно)	m_0^* , кг/м	33,6
Кут обхвату приводного барабану (визначено самотійно)	α_{Π} , град	210

1	2	3
Кут обхвату натяжного барабану (визначено самотійно)	α_H , град	180
Довжини прямолінійних ділянок конвеєра	l_{12} , м	3
	l_{34} , м	3
	l_{56} , м	15
	l_{78} , м	780
	l_{910} , м	800
Кути нахилу прямолінійних ділянок конвеєра	β_{12} , град	42
	β_{34} , град	0
	β_{56} , град	35
	β_{78} , град	3
	β_{910} , град	3
Допустиме прискорення (обрано самотійно)	$\alpha_{дон}$, м/с ²	1
Діаметр приводного барабана (визначено самотійно)	D_n , м	1,25

Розрахунки виконано у відповідності до методики наведеної в [1] оберемо резинотросову стрічку РТЛ-1500 шириною $d_{cm} = 1,2$ м. Даний тип стрічки має міцність 1500 Н/мм, товщину 18 ± 2 мм, масу $m_{cm} = 28$ кг/м². Визначимо погонну масу стрічки й запишемо її до таблиці 3.1

$$m_0^* = d_{cm} \cdot m_{cm} = 1,2 \cdot 28 = 33,6 \text{ кг / м.} \quad (2.1)$$

Основними етапами розрахунку є: визначення сил опору руху на окремих прямолінійних ділянках і результуючої сили, визначення натягу тягового органу у точках набігання і збігання приводного барабана; розрахунок потужності приводної станції.

Визначимо погонну масу вантажу на конвеєрі (вага вантажу на 1 м довжини вантажний гілки конвеєра).

$$m_{\epsilon}^* = \frac{\Pi}{3600 \cdot V} = \frac{300000}{3600 \cdot 1,5} = 55,56 \text{ кг / м.} \quad (2.2)$$

Визначимо маси прямолінійних ділянок конвеєру:

$$m_{12} = m_0^* \cdot l_{12} = 33,6 \cdot 3 = 100,8 \text{ кг}, \quad (2.3)$$

$$m_{34} = m_0^* \cdot l_{34} = 33,6 \cdot 3 = 100,8 \text{ кг}, \quad (2.4)$$

$$m_{56} = m_0^* \cdot l_{56} = 33,6 \cdot 15 = 504 \text{ кг}, \quad (2.5)$$

$$m_{78} = m_0^* \cdot l_{78} = 33,6 \cdot 780 = 23520 \text{ кг}, \quad (2.6)$$

$$m_{910} = (m_0^* + m_{\epsilon}^*) l_{910} = (33,6 + 55,56) \cdot 800 = 71324 \text{ кг}. \quad (2.7)$$

Загальна маса, приведена до точки набігання на приводний барабан:

$$\begin{aligned} m_{\Sigma}' &= m_{910} + m_{78} \cdot K_{u1} + m_{56} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2} + m_{34} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} + \\ &+ m_{12} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \cdot K_{u4} = 71324 + 23520 \cdot 1,04 + 504 \cdot 1,04 \cdot 1,02 + \\ &+ 100,8 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 + 100,8 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1,04 = 96547 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $C_{u1} = 0,04$; $C_{u2} = 0,02$; $C_{u3} = 0,04$; $C_{u4} = 0,04$ – коефіцієнти опору на ділянках вигину (див. рис. 2.1);

K_{u1} , K_{u2} , K_{u3} , K_{u4} – коефіцієнти приращення натягу на ділянках вигину,

$$K_{u1} = 1 + C_{u1} = 1,04; K_{u1} = K_{u3} = K_{u4}; K_{u2} = 1 + C_{u2} = 1 + 0,02 = 1,02. \quad (2.9)$$

Визначаємо сили опору руху стрічки на прямолінійних ділянках конвеєру:

$$\Delta F_{12} = (C_n \cos(\beta_{12}) + \sin(\beta_{12})) g m_{12} = \quad (2.10)$$

$$= (0,022 \cdot \cos(42^\circ) + \sin(42^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 100,8 = 677,8 \text{ H},$$

$$\Delta F_{34} = C_n g m_{34} = 0,022 \cdot 9,81 \cdot 100,8 = 21,75 \text{ H}, \quad (2.11)$$

$$\Delta F_{56} = (C_n \cos(\beta_{56}) + \sin(\beta_{56})) g m_{56} = \quad (2.12)$$

$$= (0,022 \cdot \cos(35^\circ) + \sin(35^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 504 = 2925 \text{ H},$$

$$\Delta F_{78} = (C_n \cos(\beta_{78}) - \sin(\beta_{78})) g m_{78} = \quad (2.13)$$

$$= (0,022 \cdot \cos(3^\circ) - \sin(3^\circ)) \cdot 9,8 \cdot 23520 = -7006,4 \text{ H},$$

$$\Delta F_{910} = (C_n \cos(\beta_{910}) + \sin(\beta_{910})) g m_{910} = \quad (2.14)$$

$$= (0,022 \cdot \cos(3^\circ) + \sin(3^\circ)) \cdot 9,8 \cdot 71324 = 51991 \text{ H}.$$

де $C_n = 0,022$ – коефіцієнт опору на прямолінійних ділянках стрічкового конвеєра.

Розрахуємо результуюче зусилля опору на прямолінійних ділянках, приведене до точки набігання на приводний барабан:

$$\begin{aligned} \Delta F_{\Sigma}' &= \Delta F_{910} + \Delta F_{78} \cdot K_{u1} + \Delta F_{56} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2} + \Delta F_{34} \cdot K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} + \Delta F_{12} \cdot K_{u1} \cdot \\ &\cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \cdot K_{u4} = 51991 - 7006,4 \cdot 1,04 + 2925 \cdot 1,04 \cdot 1,02 + \\ &+ 21,75 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 + 677,8 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1,04 = 48609 \text{ Н}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

За розрахованими значеннями зусиль опору побудуємо діаграму натягу стрічкового конвеєра (рис. 2.2).

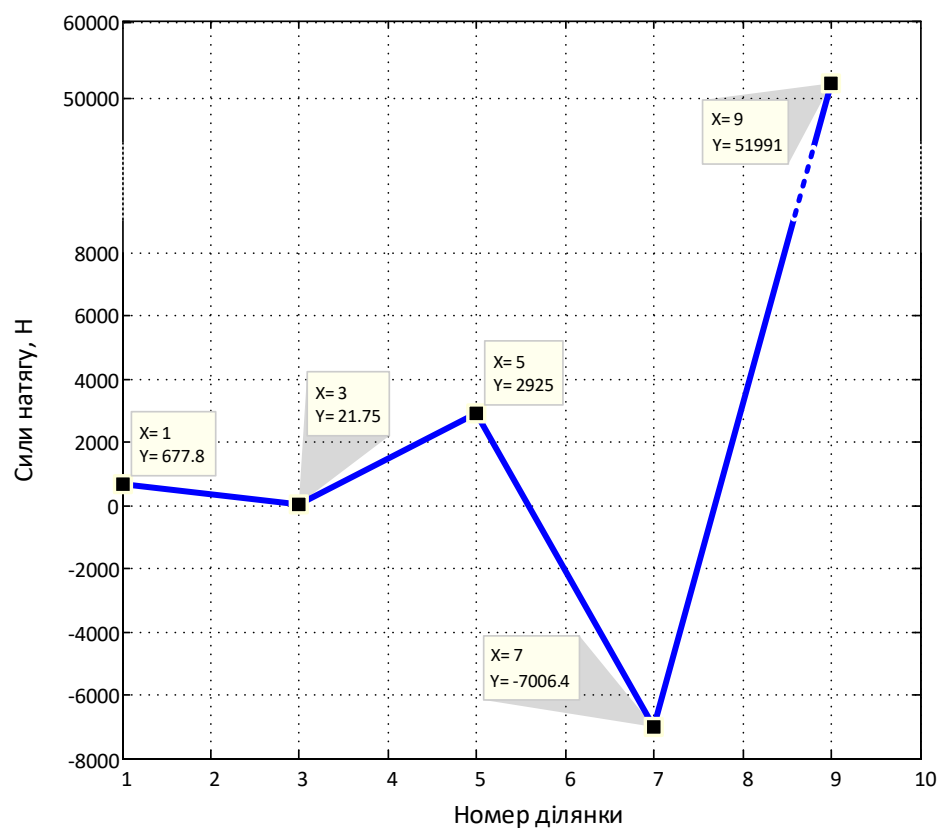


Рисунок 2.2 – Діаграма натягу конвеєра

Для розрахунку статичного зусилля на приводному барабані необхідно визначити необхідну, за умовами відсутності проковзання стрічки відносно приводного барабана, мінімально допустимий натяг в точці збігання з приводного барабана ($T_{сб \min}$) (Умова Ейлера) при пуску конвеєра з урахуванням динамічної складової.

$$T_{зб. \min} = \frac{\Delta F_{\Sigma}' + m_{\Sigma}' \cdot \alpha_{дон}}{e^{\mu \alpha_n} - K_{\Sigma}} = \frac{48609 + 96547 \cdot 1}{e^{0,2 \cdot 3,66} - 1,15} = 155410 \text{ Н.} \quad (2.16)$$

де $K_{\Sigma} = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \cdot K_{u4} = 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1,04 = 1,15$; $\mu = 0,2$ – коефіцієнт опору між стрічкою і приводним барабаном; α_n у виразі задається в радіанах.

З урахуванням похибки в розрахунку, викликаною низкою припущень введемо поправочний коефіцієнт:

$$T_{зб.} = 1,1 \cdot T_{зб. \min} = 1,1 \cdot 155410 = 186490 \text{ Н.} \quad (2.17)$$

З урахуванням динамічних навантажень, обумовлених рухомими масами конвеєра, визначимо натяг в точці набігання на приводний барабан:

$$T_{нб} = K_{\Sigma} T_{зб} + \Delta F_{\Sigma}' + m_{\Sigma}' \cdot \alpha_{дон} = 1,15 \cdot 186490 + 48609 + 96547 \cdot 1 = 359130 \text{ Н.} \quad (2.18)$$

Розраховуємо необхідну потужність електродвигуна:

$$P = K_3 \frac{(T_{нб} - T_{зб})V}{\eta} = 1,2 \frac{(359130 - 186490) \cdot 1,5}{0,8} = 388,4 \text{ кВт.} \quad (2.19)$$

Відповідно до розрахованої потужності обираємо електродвигун типу 4АН355М4УЗ [6]. У таблиці 3.2 приведено основні параметри цього двигуна при з'єднанні обмоток статора у зірку.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані електродвигуна 4АН355М4УЗ

Параметр	Значення
Номінальна потужність	$P_{2н} = 400 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1н} = 6000 \text{ В } (f = 50 \text{ Гц})$
Синхронна частота обертання	$n_0 = 1500 \text{ об/хв}$
Режим роботи	S1
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 94,5 \%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0,91$
Перевантажувальна здатність за моментом	$\lambda = 2$
Відношення пускового струму до номінального	$I_{пуск}/I_{ном} = 7$
Момент інерції	$J = 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Номінальне ковзання	$s_n = 1 \%$
Критичне ковзання	$s_k = 4 \%$
Номінальна частота напруги	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{x'_1} = 0,11$
Активний опір статора	$\overline{R'_1} = 0,019$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\overline{x''_2} = 0,14$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R''_2} = 0,013$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu} = 5,4$

2.2 Розрахунок та вибір редуктора

За довідником [1] оберемо діаметр приводного барабана 1250 мм для резинотросової стрічки РТЛ-1500 й запишемо цей діаметр в табл. 3.1.

Розрахуємо деякі інші параметри двигуна, які знадобляться для вибору редуктора.

Номінальна частота обертання

$$n_n = n_0 \left(1 - \frac{s_n}{100} \right) = 1500 \cdot \left(1 - \frac{1}{100} \right) = 1485 \text{ об / хв.} \quad (2.20).$$

Визначимо номінальну швидкість електродвигуна

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1485}{30} = 155,5 \text{ рад / с.} \quad (2.21)$$

Номінальний момент:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{400 \cdot 10^3}{155,5} = 2572,2 \text{ Нм.} \quad (2.22)$$

Необхідне передаточне число редуктора визначається за формулою:

$$i_p = \frac{\omega_n D_n}{2v} = \frac{155,5 \cdot 1,25}{2 \cdot 1,5} = 64,8. \quad (2.23)$$

Із ряду номінальних передаточних чисел обираємо найближче значення передаточного числа $i_p = 64,8 \rightarrow 63$.

Перераховуємо дійсне значення швидкості отримане при передаточному числі редуктора 31

$$v_\partial = \frac{\omega_n D_\partial}{2i_p} = \frac{155,5 \cdot 1,25}{2 \cdot 63} = 1,54 \text{ м / с}. \quad (2.24)$$

Як бачимо із розрахунку, відносна похибка між заданим і дійсним значенням швидкості не перевищує 3 %, що є достатньою точністю.

$$\tilde{v} = \frac{v_\partial - v}{v} \cdot 100\% = \frac{1,54 - 1,5}{1,5} \cdot 100\% = 2,85 \%. \quad (2.25)$$

За розрахованими даними передаточного числа та максимальною швидкістю двигуна обираємо редуктора типу ЦТНД-500-63 [7], параметри якого занесені до таблиці 3.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики редуктора ЦТНД-500-63

Параметр	Значення
1	2
Типорозмір	ЦТНД-500
Передаточне число	63

1	2
Номінальний крутний момент на тихохідному валу	28500 Нм
Максимальна швидкість на вході	1500 об/хв
ККД	0,96
Маса	1448 кг

Виконаємо перевірку двигуна по перевантажувальній здатності. Момент інерції редуктора та момент інерції барабана будемо розглядати такими самими, як і момент інерції двигуна $J_{\delta} = J_p = J_d = 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Розрахуємо сумарний момент інерції механізму приведенного до валу двигуна

$$J_{\Sigma} = J_d + J_p + \frac{J_{\delta}}{i_p^2} + m'_{\Sigma} \cdot \frac{D_{\delta}^2}{4i_p^2} = 7 + 7 + \frac{7}{63^2} + 96547 \frac{1,25^2}{4 \cdot 63^2} = \quad (3.26)$$

$$= 23,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розрахуємо значення кутового прискорення, яке досягається при розгоні з максимальним допустимим прискоренням $0,35 \text{ м/с}^2$

$$\varepsilon = \alpha_{\text{дон}} \cdot \frac{2i_p}{D_{\delta}} = 1 \cdot \frac{2 \cdot 63}{1,25} = 151,2 \text{ рад} / \text{с}^2. \quad (2.27)$$

Динамічний момент при розгоні конвеєра становитиме

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = 23,5 \cdot 151,2 = 3553,8 \text{ Нм}. \quad (2.28)$$

Максимальний момент двигуна

$$M_{\max} = \lambda M_n = 2 \cdot 2572,2 = 5144,4 \text{ Нм.} \quad (2.29)$$

Отже, умова $M_{\max} \geq M_{\text{дин}}$ виконується з великим запасом. Отже, двигун проходить перевірку по перевантажувальній здатності.

2.3 Вибір перетворювача частоти

Відповідно до потужності двигуна, оберемо перетворювач частоти типу АСQ580-04-820А-4 від виробника АВВ [8]. Параметри даного перетворювача частоти (ПЧ) занесено до табл. 3.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики ПЧ АСQ580-04-820А-4

Параметр	Значення
Модель	АСQ580
Напруга живлення	380 В
Номінальна потужність	450 кВт
Номінальний струм	820 А
Максимальна вихідна частота	50 Гц
Фільтр ЕМС	Наявний
Гальмівний модуль	Зовнішній
ПІД регулятор	Вбудований
Пульт керування	Вбудований
Скалярний закон керування U/f	Наявний
Векторний закон керування без енкодера	наявний
Векторний закон керування з енкодером	відсутній
Ступінь захисту	IP00

Основними перевагами даного ПЧ є:

- вбудований пульт управління має асистенти налаштування для швидкої та зручної конфігурації приводу;
- вбудовані спеціальні функції для насосів та насосних станцій;
- оптимізатор та лічильник енергоспоживання безперервно відстежують витрати на електроенергію;
- підтримка різних типів двигуна: асинхронні двигуни, двигуни з постійними магнітами та синхронні двигуни з реактивним ротором;
- довговічний та надійний. Вбудований фільтр ЕМС, дросель ланки постійного струму, протокол Modbus RTU та функція безпечного відключення моменту (STO);
- частотні перетворювачі ACQ580 можуть бути доповнені різними протоколами зв'язку та платами розширення входів/виходів.

2.4 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Визначимо номінальні дані двигуна. Кутова частота напруги статора буде дорівнювати:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад / с)}. \quad (2.30)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ (рад / с)}. \quad (2.31)$$

Номінальна швидкість двигуна

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0,01) = 155,5 (\text{рад} / \text{с}). \quad (2.32)$$

Номинальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{400000}{155,5} = 2572,2 (\text{Нм}). \quad (2.33)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності з каталогу)

$$M_k = \lambda M_n = 2 \cdot 2572,2 = 5144,4 (\text{Нм}). \quad (2.34)$$

Номинальні діючі значення фазного струму та напруги статора

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 (\text{В}),. \quad (2.35)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{400000}{3 \cdot 220 \cdot 0,945 \cdot 0,91} = 704,8 (\text{А}). \quad (2.36)$$

Амплітудні значення фазного струму та напруги статора

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 (\text{В}), \quad (2.37)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 704,8 = 996,7 (\text{А}). \quad (2.38)$$

В режимі холостого ходу амплітудне значення потокозчеплення статора при $R_1 = 0$

$$\psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0,99(B\delta). \quad (2.39)$$

Виконаємо розрахунок Т-подібної схеми заміщення двигуна. При цьому коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{5,4 + \sqrt{5,4^2 + 4 \cdot 0,11 \cdot 5,4}}{2 \cdot 5,4} = 1,02. \quad (2.40)$$

На рис. 2.3 приведено Т-подібну схему заміщення, а на рис. 2.4 – Г-подібну.

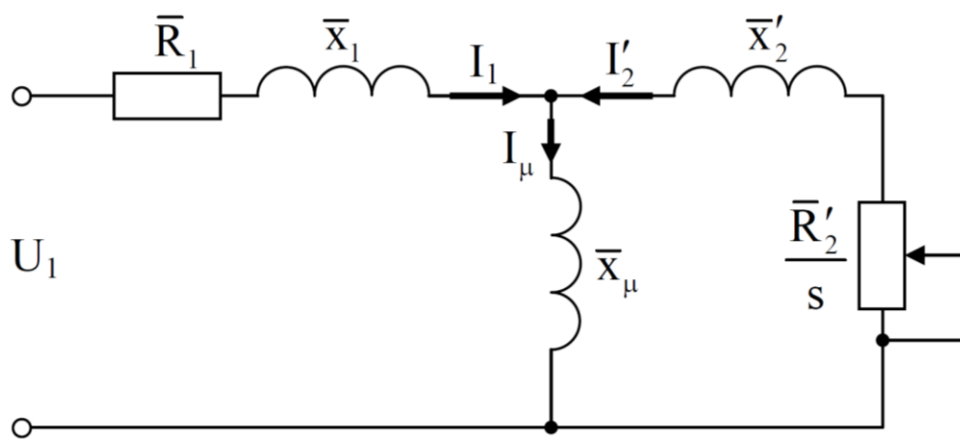


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення

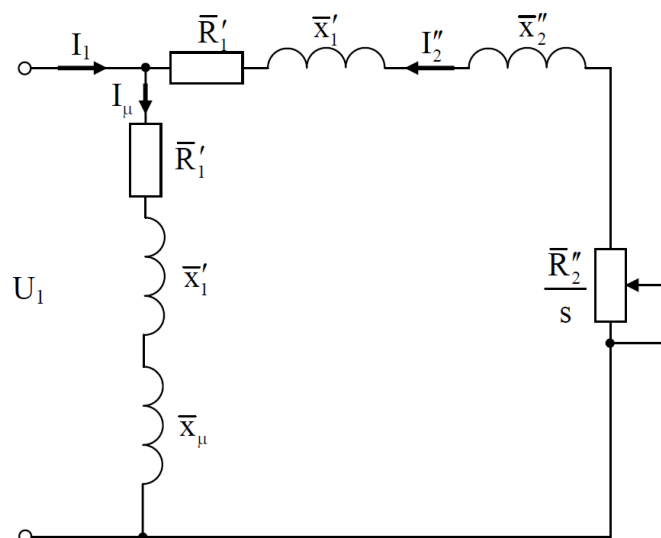


Рисунок 2.4 – Г-подібна схема заміщення

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях

$$\overline{x_1} = \frac{\overline{x'_1}}{c_1} = \frac{0,11}{1,02} = 0,1078; \quad \overline{R_1} = \frac{\overline{R'_1}}{c_1} = \frac{0,019}{1,02} = 0,0186, \quad (2.41)$$

$$\overline{x_2}' = \frac{\overline{x''_2}}{c_1^2} = \frac{0,14}{1,02^2} = 0,1346; \quad \overline{R_2}' = \frac{\overline{R''_2}}{c_1^2} = \frac{0,013}{1,02^2} = 0,0125. \quad (2.42)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться

$$x_1 = \overline{x_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,1078 \cdot \frac{220}{704,8} = 0,0337(Ом), \quad (2.43)$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,0186 \cdot \frac{220}{704,8} = 0,0058(Ом), \quad (2.44)$$

$$x_2 = \overline{x_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,1346 \cdot \frac{220}{704,8} = 0,042(Ом), \quad (2.45)$$

$$R_2 = \overline{R_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,0125 \cdot \frac{220}{704,8} = 0,0039(Ом), \quad (2.46)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 5,4 \cdot \frac{220}{704,8} = 1,6857(Ом). \quad (2.47)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{0n}} = \frac{0,0337}{314} = 10,722(мГн), \quad (2.48)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_{0n}} = \frac{0,042}{314} = 13,378(мГн). \quad (2.49)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{1,6857}{314} = 0,0054(\Gamma H). \quad (2.50)$$

Індуктивності статора і ротора

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,0054 + 10,722 \cdot 10^{-3} = 0,005476(\Gamma H), \quad (2.51)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0,0054 + 13,378 \cdot 10^{-3} = 0,005502(\Gamma H). \quad (2.52)$$

Обчислення значень параметрів α , α_1 , β , γ , σ

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0,0039}{0,005502} = 0,7089, \quad (2.53)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,0058}{0,005476} = 1,0620, \quad (2.54)$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0,005476 - \frac{0,0054^2}{0,005502} = 0,000238, \quad (2.55)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0,0054}{0,005502 \cdot 0,000238} = 4103,9, \quad (2.56)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m = \frac{0,0058}{0,000238} + 0,7089 \cdot 4103,9 \cdot 0,0054 = 40,08. \quad (2.57)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна 4АН355М4У3 зведені до табл. 3.5.

Таблиця 2.5 – Розраховані параметри двигуна 4АН355М4УЗ

Параметр	Значення	Параметр	Значення
P_{2n} , кВт	400	p_n	2
ω_{xx} , рад / с	157	R_1 , Ом	0,0058
ω_n , рад / с	155,5	R_2 , Ом	0,0039
M_n , Нм	2572,2	L_1 , Гн	0,005476
M_k , Нм	5144,4	L_2 , Гн	0,005502
λ	2	L_m , Гн	0,0054
I_{na} , А	704,8	α_1 , Ом / Гн	1,062
ψ_{1xx} , Вб	0,99	α , Ом / Гн	0,7089
η	0,945	β , 1 / Гн	4103,9
$\cos(\varphi)$	0,91	γ , Ом / Гн	40,08
J_d , кг · м ²	7	σ , Гн	0,000238

Висновки до розділу 2

На основі заданої структурно схеми рис. 3.1 а також заданих параметрів конвеєра, було розраховану потужність і вибір асинхронного електродвигуна 4АН355М4УЗ, яка необхідна щоб задовольнити задані умови роботи системи. Було обрано редуктор ЦТНД-500-63 і перетворювач частоти АСQ580-04-820А-4, розраховано параметри електродвигуна а також параметри Т-подібної схеми заміщення. Це дозволить в наступних розділах скласти модель системи за допомогою програмного забезпечення MATLAB Simulink.

3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОЇ СХЕМИ КОНВЕЙЕРА

3.1 Функціональна схема

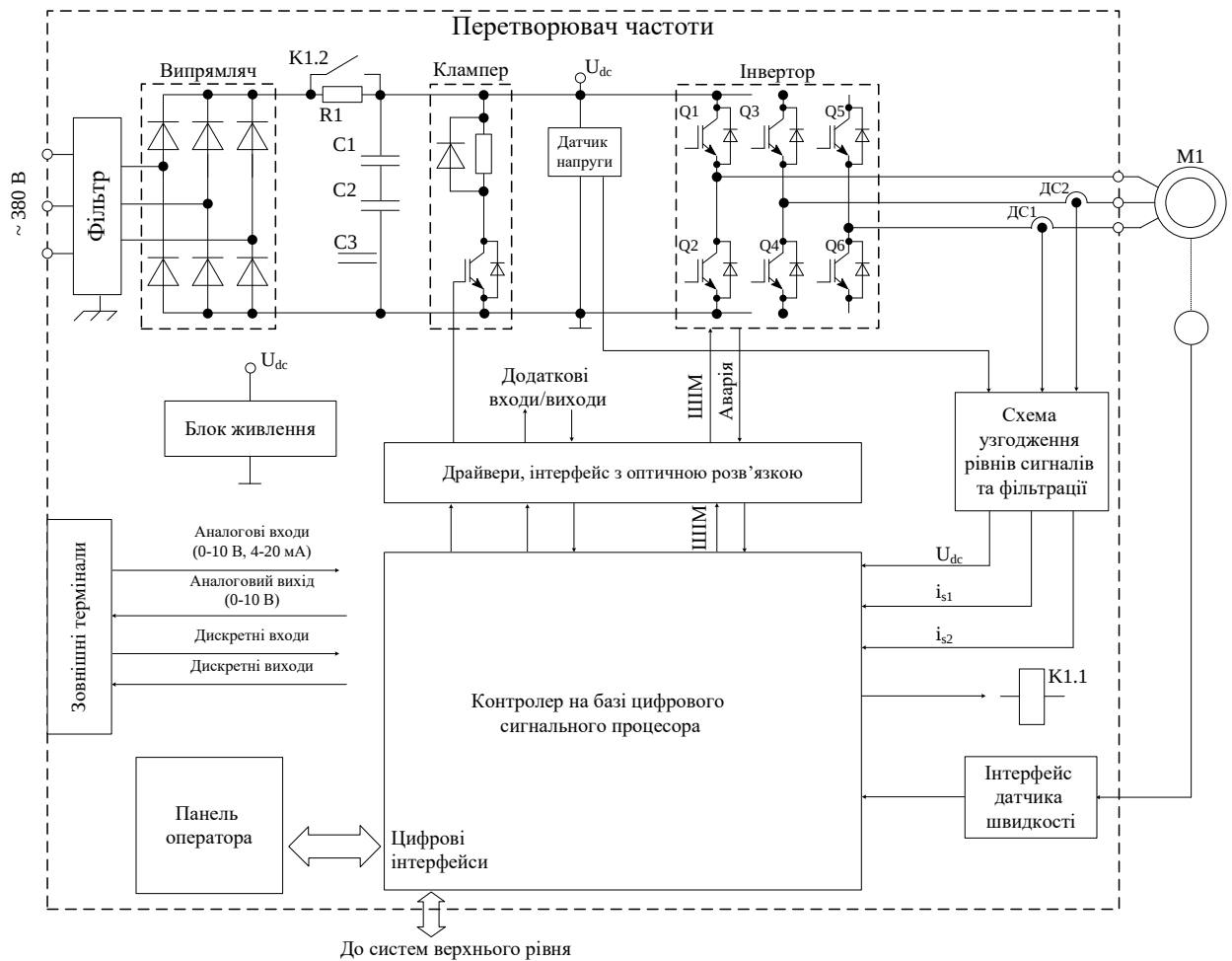


Рисунок 3.1 – Функціональна схема

На рисунку Х.Х показана схема системи, яка включає класичну структуру перетворювача частоти, який має підключений асинхронний двигун і датчик швидкості. Перетворювач частоти складається з двох основних частин: силової частини і частини керування.

У силовій частині знаходяться такі елементи: мережевий фільтр, випрямляч на діодному мості, ланка постійного струму з конденсатором С1,

ключем K1.2 та резистором R1, клампер, датчик напруги ланки постійного струму та інвертор на силових IGBT транзисторах.

У частині керування знаходяться: внутрішній блок живлення керування, схема узгодження рівнів сигналів та фільтрації, інтерфейс датчика швидкості, панель оператора, драйвери та оптророзв'язок, призначені для керування силовими IGBT транзисторами, а також контролер на базі цифрового сигнального процесора, який керує всіма процесами в перетворювачі частоти.

Давайте детальніше розглянемо призначення основних модулів та елементів, які показані на рисунку Х.Х.

Вхідний фільтр використовується для запобігання перевищення напруги ланки постійного струму і високочастотних перешкод, що виникають при комутації ключів інвертора.

Випрямляч перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму U_{dc} .

Ємність C використовується для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

Зарядне коло (резистор R3 та реле K1) забезпечує плавний заряд ємності фільтру випрямляча C при.

Клампер використовується для стабілізації напруги на виході випрямляча та захисту від перенапруги.

Датчик напруги ланки постійного струму вимірює значення струму в ланці та передає цю інформацію до контролера.

Силові IGBT транзистори використовуються для керування живленням асинхронного двигуна. Вони працюють як комутатори, які відкриваються та закриваються з високою частотою, створюючи змінну напругу та струм для живлення двигуна.

Внутрішній блок живлення керування забезпечує живлення всіх елементів керуючої системи.

Схема узгодження рівнів сигналів та фільтрації відповідає за правильну передачу сигналів та фільтрацію шумів в системі керування.

Інтерфейс датчика швидкості отримує інформацію про швидкість обертання двигуна та передає її до контролера.

Панель оператора забезпечує можливість оператору взаємодіяти з системою, налаштовувати параметри та спостерігати за її роботою.

Драйвери та оптрозв'язки використовуються для керування силовими IGBT транзисторами, перетворюючи сигнали з контролера в сигнали, зрозумілі для силових елементів.

Контролер на базі цифрового сигнального процесора виконує основну функцію управління всіма процесами в перетворювачі частоти. Він отримує дані від датчиків, обробляє їх, приймає рішення щодо керування силовими елементами та забезпечує взаємодію з панеллю оператора.

Система охолодження: Цей модуль відповідає за охолодження всіх елементів перетворювача частоти, таких як силові транзистори та інші компоненти, які можуть нагріватися під час роботи. Він може включати вентилятори, радіатори та системи розподіленого охолодження.

Блок живлення: Цей модуль забезпечує стабільне живлення всіх елементів перетворювача частоти. Він може включати трансформатори, преобразувачі напруги, регулятори та фільтри для забезпечення потрібних рівнів напруги та струму.

Інтерфейси комунікації: Ці елементи дозволяють перетворювачу частоти взаємодіяти з іншими системами або контролерами. Це можуть бути різні типи інтерфейсів, такі як RS-485, Ethernet, USB або бездротові зв'язки, які дозволяють передавати дані, налаштовувати параметри та контролювати роботу перетворювача.

Захист та діагностика: Ці модулі відповідають за захист перетворювача частоти від різних непередбачених ситуацій, таких як перевантаження, коротке замикання або перенапруга. Вони можуть включати захисні реле, датчики

струму та напруги, а також алгоритми діагностики для виявлення проблем та автоматичного відключення системи у разі несправності.

3.2 Математична модель асинхронного двигуна

Математична модель АД через струми статора та потокозчеплення ротора у стаціонарній системі координат запишеться у наступному вигляді:

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \quad (3.2)$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \quad (3.3)$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \quad (3.4)$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \quad (3.5)$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}. \quad (3.6)$$

де ω – кутова швидкість ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (a-b), $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M – електромагнітний момент двигуна, M_c – момент навантаження, v – коефіцієнт в'язкого тертя, p_n – кількість пар полюсів, θ – кутове положення.

Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad (3.7)$$

де L_1, L_2 – власні індуктивності статорної і роторної обмоток, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, R_1, R_2 – опори статора й ротора, J – повний момент інерції ротора.

Для перетворення змінних із стаціонарної системи координат (a-b) в синхронну систему координат (d-q) застосовують перетворення

$$\begin{aligned} x^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0} x^{(a-b)}, \\ x^{(a-b)} &= e^{J\varepsilon_0} x^{(d-q)}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

де $e^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $x^{(y-z)}$ – двовірний вектор.

3.3 Алгоритм векторного керування

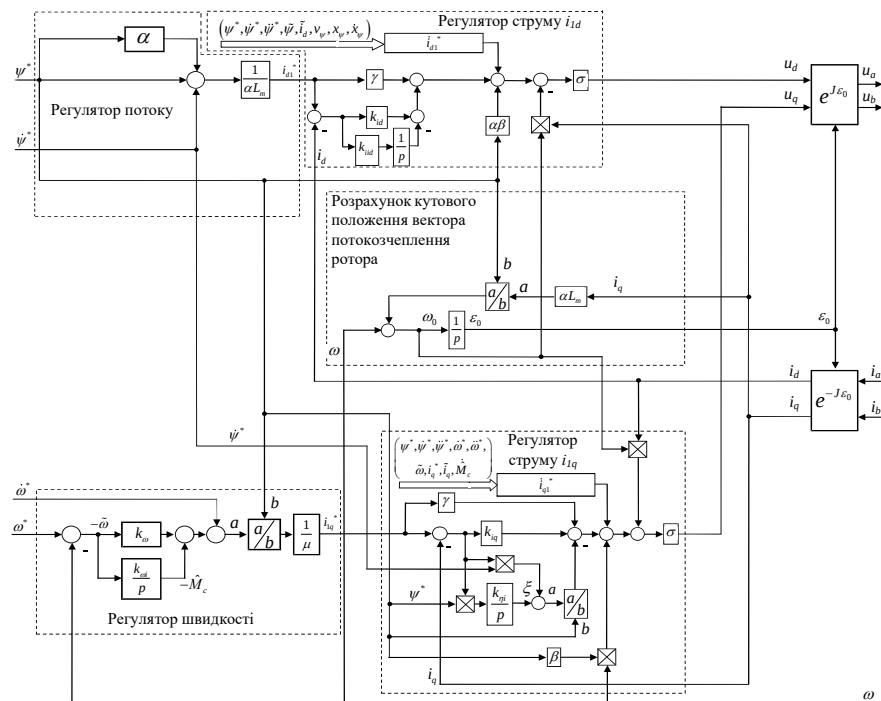


Рисунок 3.2 – Структурна схема непрямого векторного керування

Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування швидкістю представлена на рис. 3.2 і описується наступними компонентами:

1. Регулятор потокозчеплення: цей блок відповідає за генерацію сигналу, який задає бажане значення потокозчеплення.
2. Регулятор швидкості: цей елемент керує швидкістю руху і генерує сигнал для управління швидкістю.
3. Рівняння розрахунку кутового положення вектора потокозчеплення ротора: це рівняння, яке визначає кутове положення вектора потокозчеплення ротора відповідно до заданого значення потокозчеплення.
4. Регулятори струмів i_d , i_q : ці блоки контролюють струми i_d і i_q , які впливають на ротор двигуна.
5. Блоки перетворення координат Парка-Горєва: ці блоки здійснюють перетворення координат струмів i_d і i_q у керуючі напруги u_a і u_b , які подаються на двигун.

Вхідними сигналами для алгоритму є задане значення потокозчеплення та його похідна, а також задана траєкторія швидкості та її похідна. Сигнали зворотних зв'язків включають струми i_a , i_b та кутову швидкість ротора двигуна. Струми вимірюються за допомогою датчиків струму, які розташовані в принаймні двох фазах. Кутова швидкість ротора може бути виміряна за допомогою енкодера або сенсора обертання.

Вихідними сигналами алгоритму є керуючі напруги u_a та u_b , які подаються на двигун для досягнення заданої швидкості та потокозчеплення.

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

– розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.9)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (3.10)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi. \quad (3.11)$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ задане значення модуля вектору потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, ϕ – робастифікуючий зв’язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку $\phi = 0$;

- регулятор струму по осі d (польової складової струму статора) визначається:

$$u_{1d} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d), \quad (3.12)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_{1d}. \quad (3.13)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d, u_{1d} компонента вектору напруги статора по осі d, $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнт пропорційної складової регулятора струму.

- регулятор кутової швидкості визначається:

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega} + \nu \omega^*), \quad (3.14)$$

$$\hat{M}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \quad (3.15)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} (-k \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \hat{M}_c + \ddot{\omega}^* + \nu \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}. \quad (3.16)$$

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ –

коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості.

- регулятор струму по осі q (моментної складової струму статора) визначається:

$$u_{1q} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \omega p_n \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q), \quad (3.17)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q. \quad (3.18)$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d , u_{1q} компонента вектора напруги статора по осі q .

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

3.4 Застосування ПІ-регулятора в алгоритмі керування

Для контурів регулювання швидкості й струмів буде використовуватись ПІ-регулятор. Даний тип регулятора поєднує у собі високу швидкодію пропорційного регулятора та повну компенсацію статичної похибки інтегрального регулятора. Саме тому в алгоритмі керування буде вирисовуватись ПІ-регулятор. Визначимося із коефіцієнтами налаштування ПІ-регуляторів. Дана система непрямого векторного керування являє собою систему підпорядкованого керування із зовнішнім контуром регулювання швидкості та внутрішнім контуром регулювання струму. З основних положень теорії автоматичного керування відомо, що зовнішній контур повинен бути повільнішим за внутрішній мінімум в 2-3 рази. Враховуючи реальні фізичні

обмеження, зумовлені швидкодією роботи мікропроцесора ПЧ оберемо коефіцієнт пропорційної складової регуляторів струму рівним $k_i = 700$. Тоді враховуючи обмеження, зумовлені неточностями механічних передач обираємо пропорційний коефіцієнт регулятора швидкості рівним $k_\omega = 150$.

ПІ-регулятор можемо розглядати як лінійну систему другого порядку з характеристичним рівнянням

$$p^2 + k_p p + k_i = 0. \quad (3.20)$$

Або через фізичні змінні можемо записати вираз

Ошибка! Источник ссылки не найден. у формі

$$p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 = 0. \quad (3.21)$$

де $k_i = \omega_0^2$, $k_p = 2\xi\omega_0$, ω_0 – власна частота недемпфованих коливань системи, ξ – коефіцієнт демпфування..

Звідси можемо записати

$$\omega_0 = \sqrt{k_i} \quad \text{та} \quad \omega_0 = \frac{k_p}{2\xi}. \quad (3.22)$$

Тоді з рівнянь **Ошибка! Источник ссылки не найден.** маємо

$$\sqrt{k_i} = \frac{k_p}{2\xi} \Rightarrow \xi = \frac{k_p}{2\sqrt{k_i}}. \quad (3.23)$$

Отже, отримали наступні стандартні залежності для пропорційного та інтегрального коефіцієнтів ПІ-регулятора

- при $k_i = \frac{k_p^2}{2}$ маємо $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ – перехідний процес з невеликим перерегулюванням та більшою швидкістю;

- при $k_i = \frac{k_p^2}{4}$ маємо $\xi = 1$ – аперіодичний перехідний процес;

При моделюванні роботи електропривода використано наступні значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів:

для регулятора швидкості – $k_\omega = 150$; $k_{i\omega} = \frac{k_\omega^2}{2}$;

для регуляторів струму – $k_i = 700$; $k_{ii} = \frac{k_i^2}{2}$.

Висновки до розділу 3

На основі обраної системи ПЧ-АД і векторно-керованого асинхронного електродвигуна, було побудовано функціональну схему системи рис. 3.1. Описано математичну модель асинхронного двигуна в 2-фазній системі координат, а також алгоритм непрямого векторного керування для асинхронного двигуна. На основі цих схем і отриманих рівнянь в наступному розділі буде побудована модель системи в програмному забезпеченні MATLAB Simulink.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МАГІСТРАЛЬНОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

4.1 Розробка моделі для дослідження статичних і динамічних характеристик механізму

Моделювання асинхронного двигуна 4АН355М4УЗ буде проводитись для стандартного алгоритму непрямого векторного керування, який приведено в попередньому розділі. Моделююча програма в MATLAB Simulink приведена на рис. 4.1-4.15.

Моделююча програма складається із трьох підсистем формування завдання швидкості, потокозчеплення й моменту навантаження (*w reference*, *PSI reference*, *Mc*), підсистеми алгоритму керування *Control block*, підсистеми моделі самого АД *Model IM (a-b)*, підсистеми розрахунку кутового положення вектора потокозчеплення машини (*Flux calculator*) та підсистем перетворення системи координат ($((d-q) \Rightarrow (a-b), (a-b) \Rightarrow (d-q))$).

Всі моделі, побудовані далі, були розроблені на базі пакета прикладних програм MATLAB Simulink з використанням отриманих математичних моделей елементів електромеханічної системи та алгоритмів керування.

Розглядаючи формули розімкненого регулятора осі потокозчеплення (3.9), (3.10), можемо вивести рівняння в модель, виклавши їх на рис. 4.1

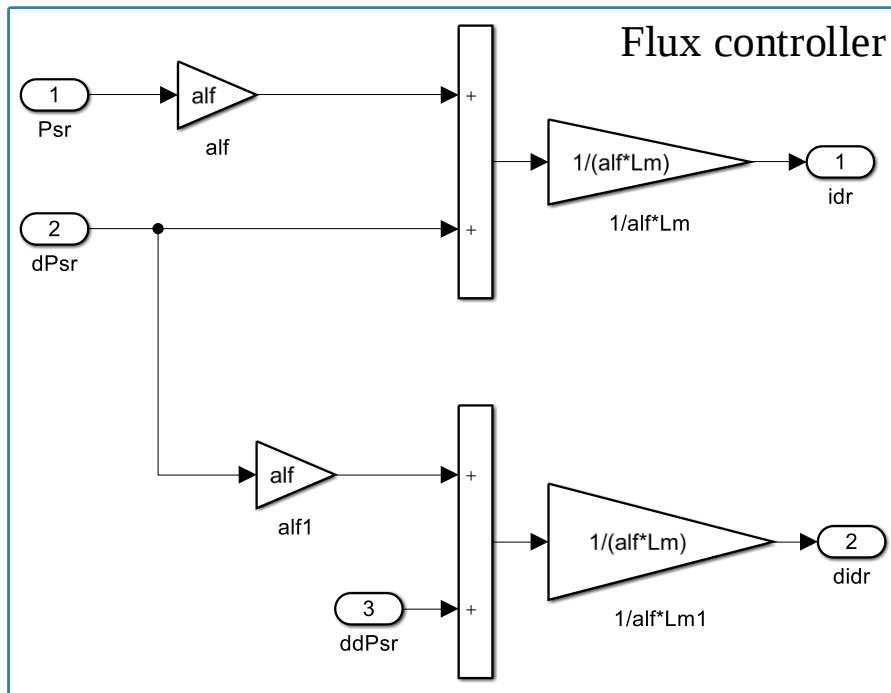


Рисунок 4.1 – Модель розімкнутого регулятора

Розглядаючи формули розімкненого регулятора осі d (3.12), (3.13), можемо вивести рівняння в модель, виклавши їх на рис. 4.2.

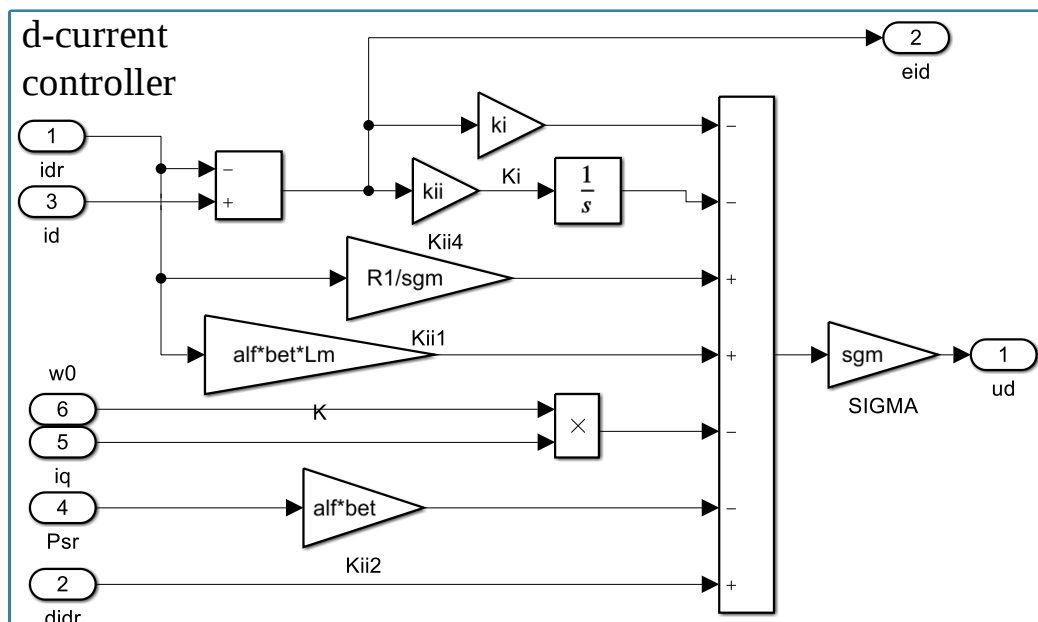


Рисунок 4.2 – Модель розімкненого регулятора по осі d

Розглядаючи формули розімкненого регулятора осі q (3.17), (3.18), можемо вивести рівняння в модель, виклавши їх на рис. 4.3

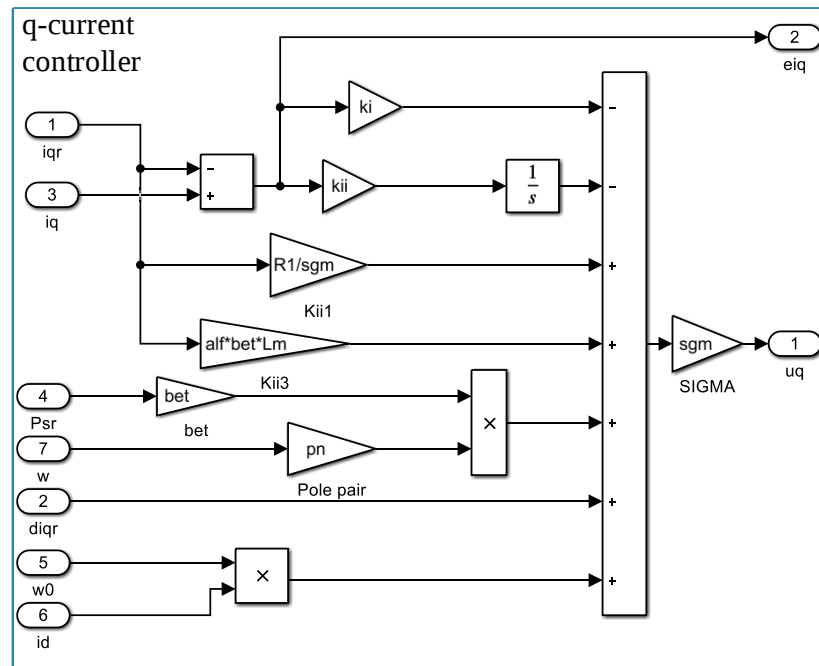


Рисунок 4.3 – Модель розімкненого регулятора по осі q

Розглядаючи формули регулятора кутової швидкості (3.14), (3.15), можемо вивести рівняння в модель, виклавши їх на рис. 4.4.

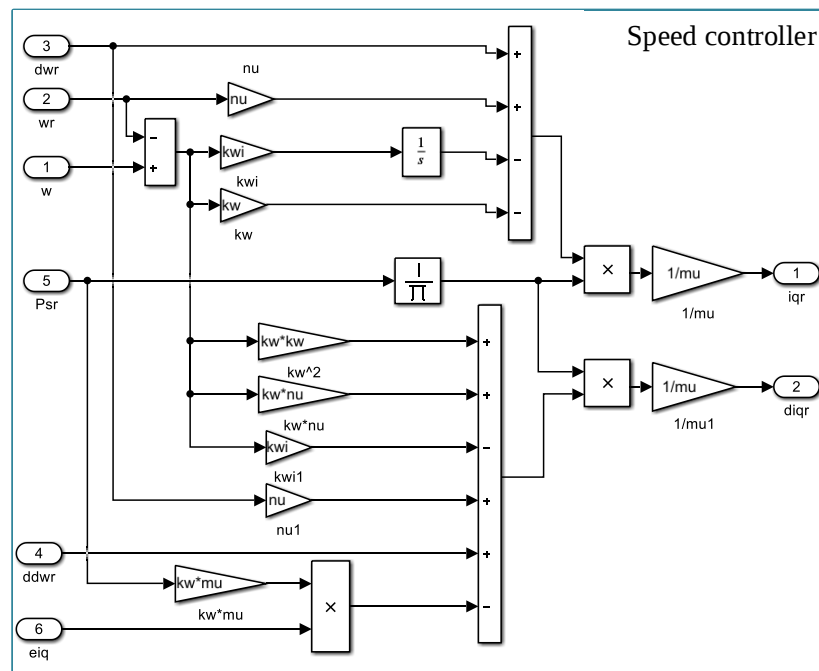


Рисунок 4.4 – Регулятор кутової швидкості

Скомпонувавши всі формули механізму отримаємо структуру алгоритму непрямого векторного керування на рис. 4.5.

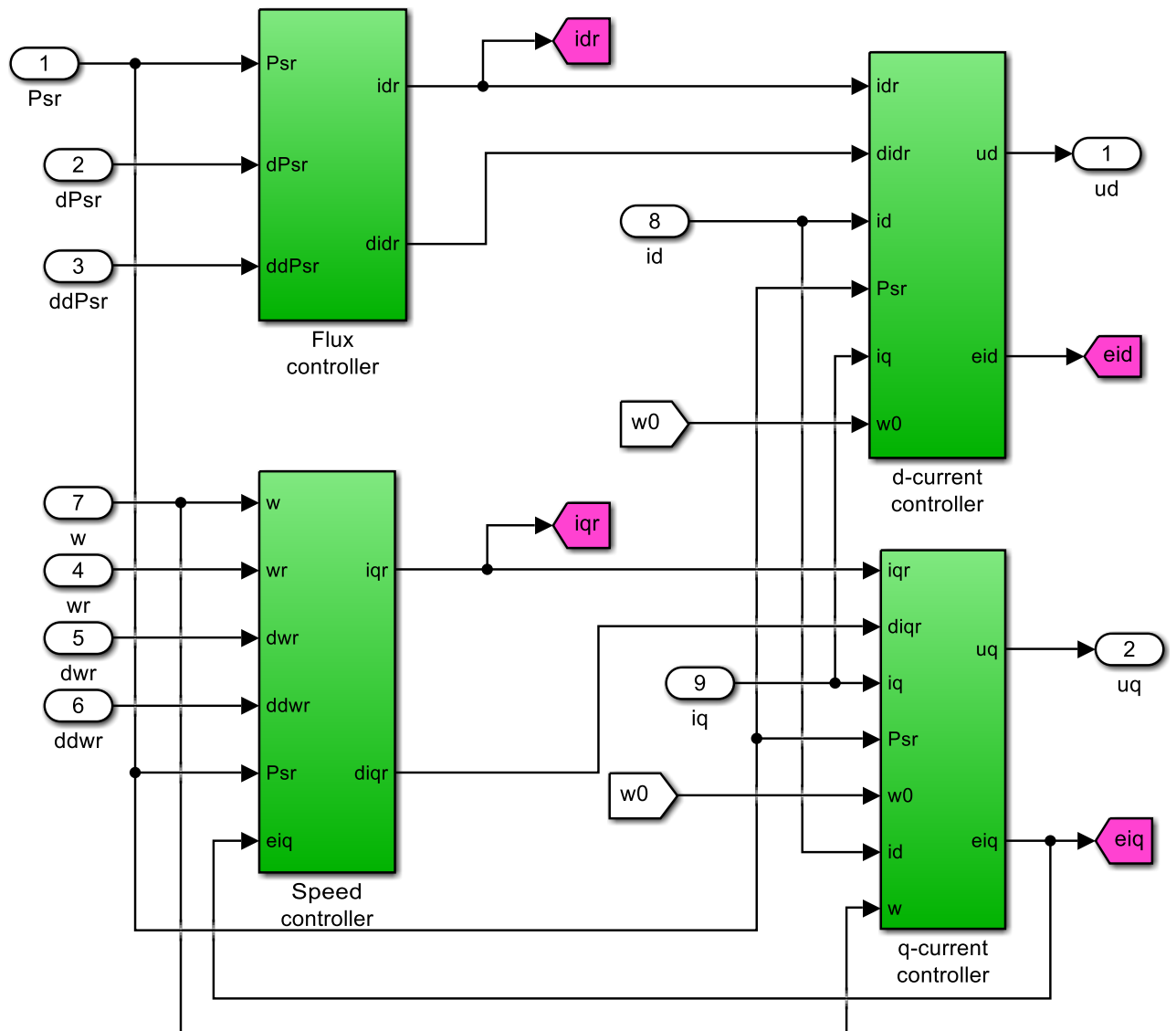


Рисунок 4.5 – Структура алгоритму непрямого векторного керування електродвигуном

На рис. 4.6-4.7 зображено математична модель компоненти струму статора за рівняннями (3.3 - 3.4).

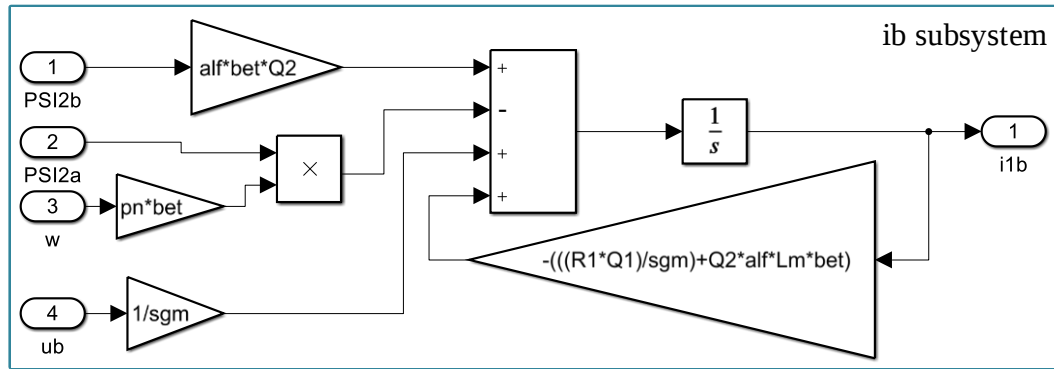


Рисунок 4.6 – Компонента струму статора в АД

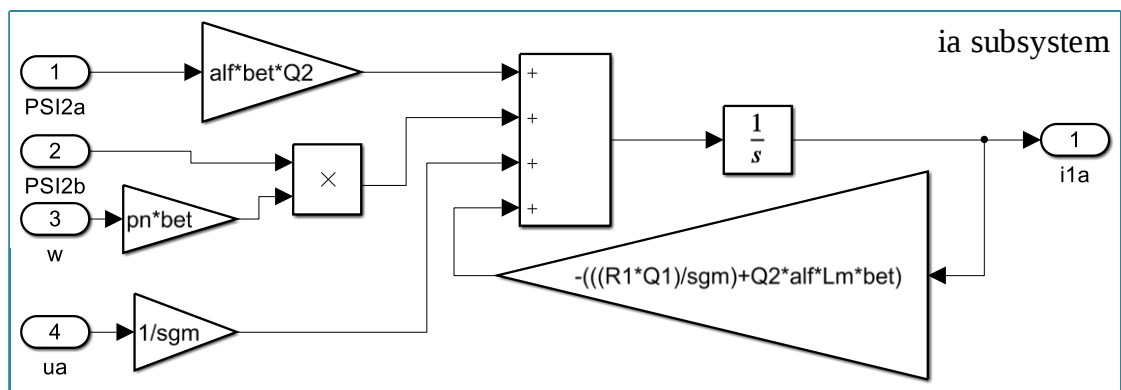


Рисунок 4.7 – Компонента струму статора в АД

Математична модель для компоненти вектора потокозчеплення виконана по формулам (3.5 – 3.6) та зображена на рис. 4.8

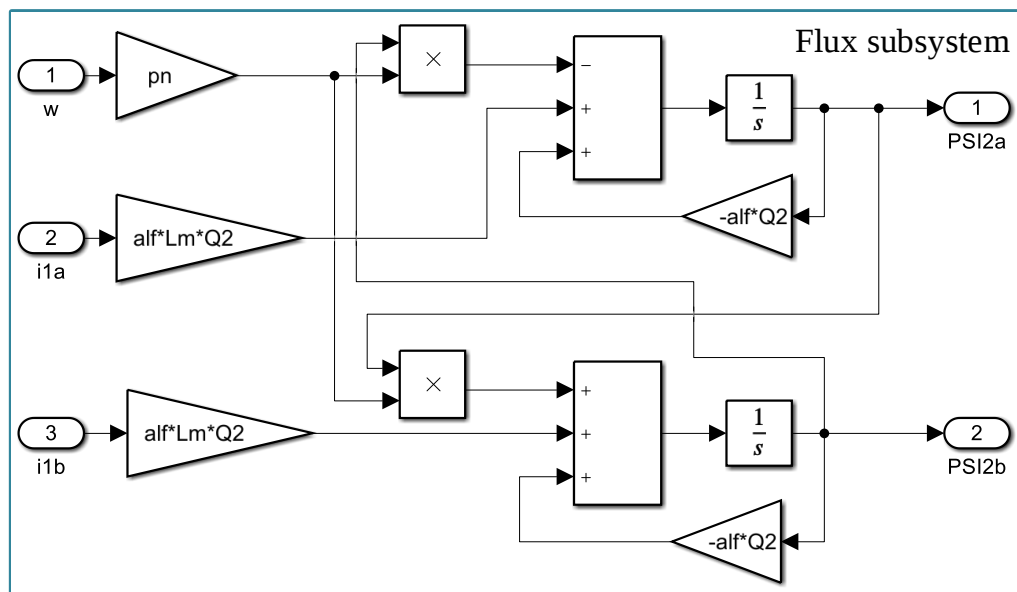


Рисунок 4.8 – Математична модель вектора потокозчеплення статора

Побудуємо механічну частину системи керування асинхронним двигуном, подавши на вхід потік і струм та отримавши на виході момент та кутову швидкість ротора за рівнянням (3.2).

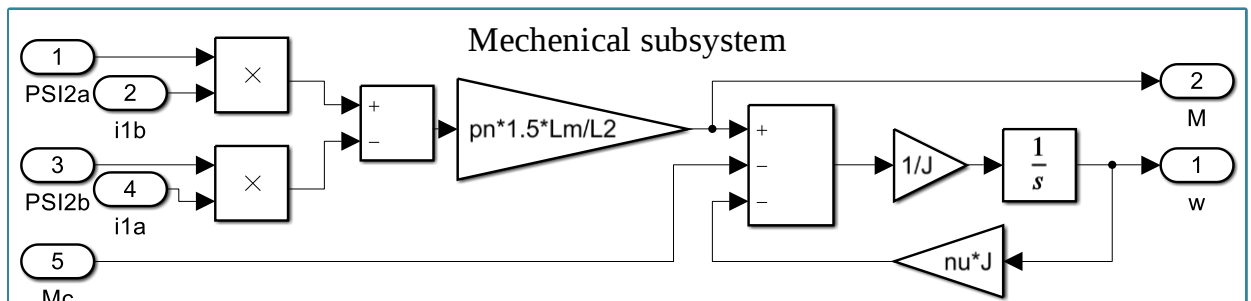


Рисунок 4.9 – Математична модель моменту на валу двигуна та кутової швидкості ротора

Відобразимо модель, яка керує двигуном, записана рівняннями (3.1 - 3.6) та показана на рис. 4.10.

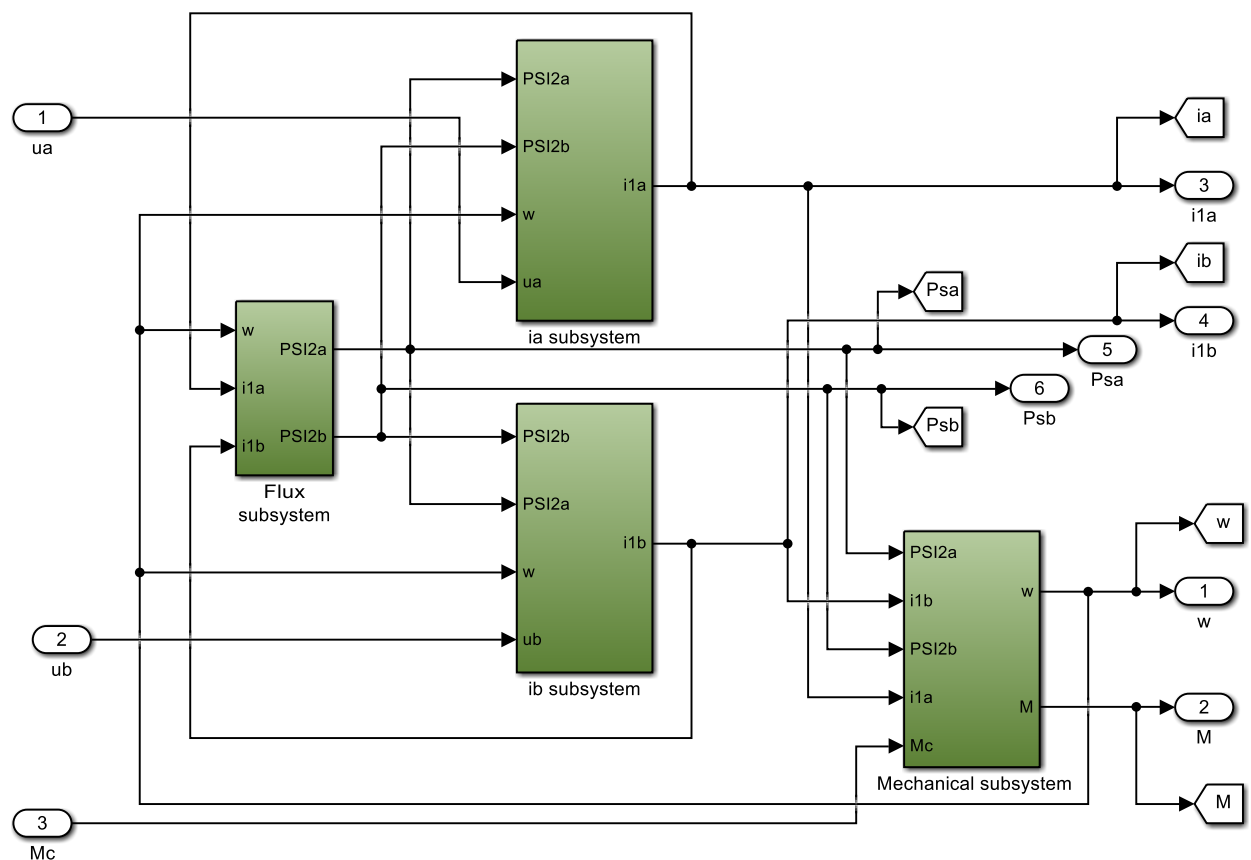


Рисунок 4.10 – Модель асинхронного електроприводу

Зобразимо систему перетворення координат з (d-q) в (a-b) на рисунку 4.11 та оборотньо цій системі на рисунку 4.12.

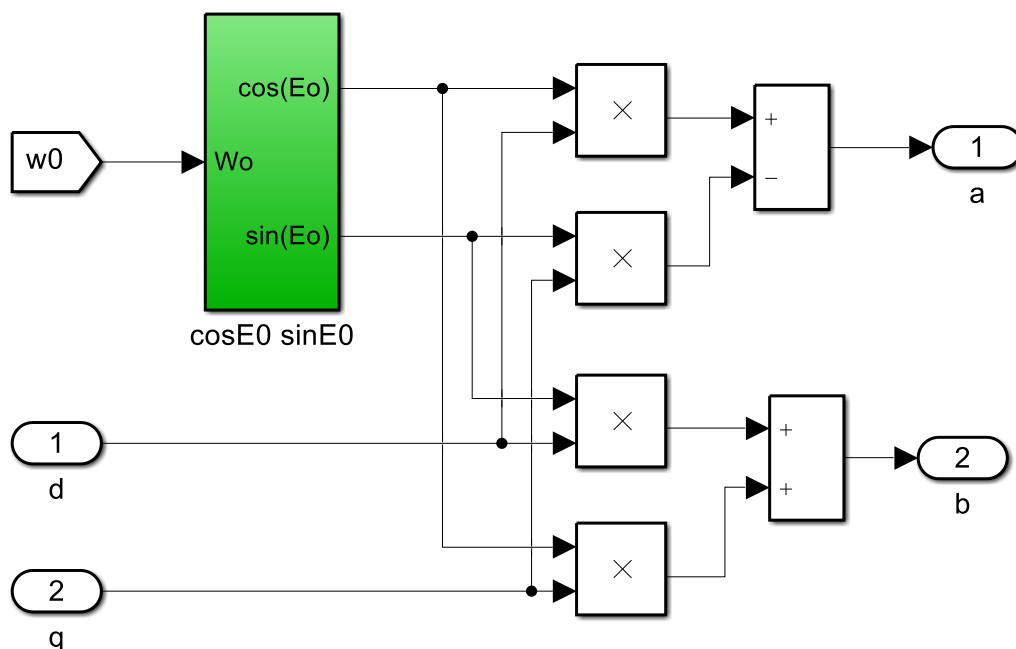


Рисунок 4.11 – Перетворення системи координат з (d-q) в (a-b)

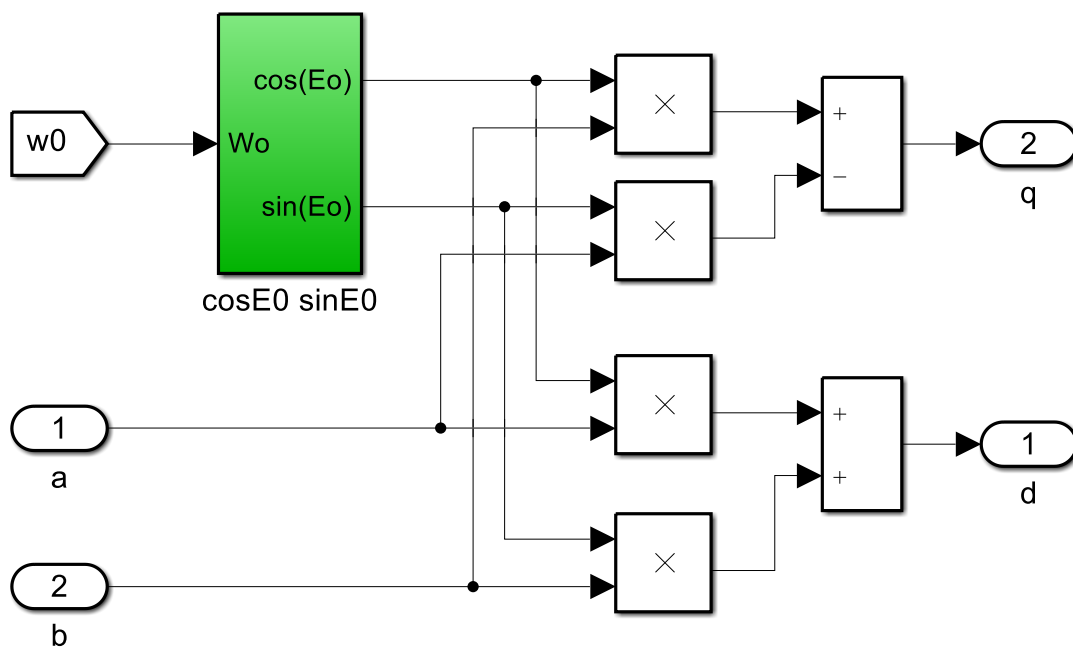


Рисунок 4.12 – Перетворення системи координат з (a-b) в (d-q)

Блок для перетворення сигналу в косинусоїду та синусоїду знаходиться на рис. 4.13.

Підсистема визначення кутової швидкості вектора потокзчеплення ротора показана на рис. 4.14.

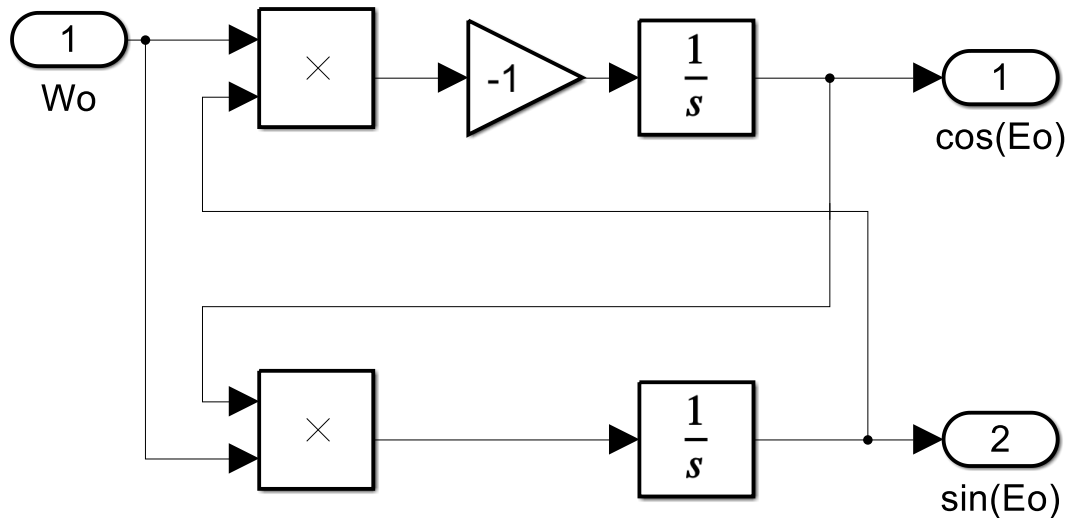


Рисунок 4.13 – Синусоїдний та косинусоїдний сигнали

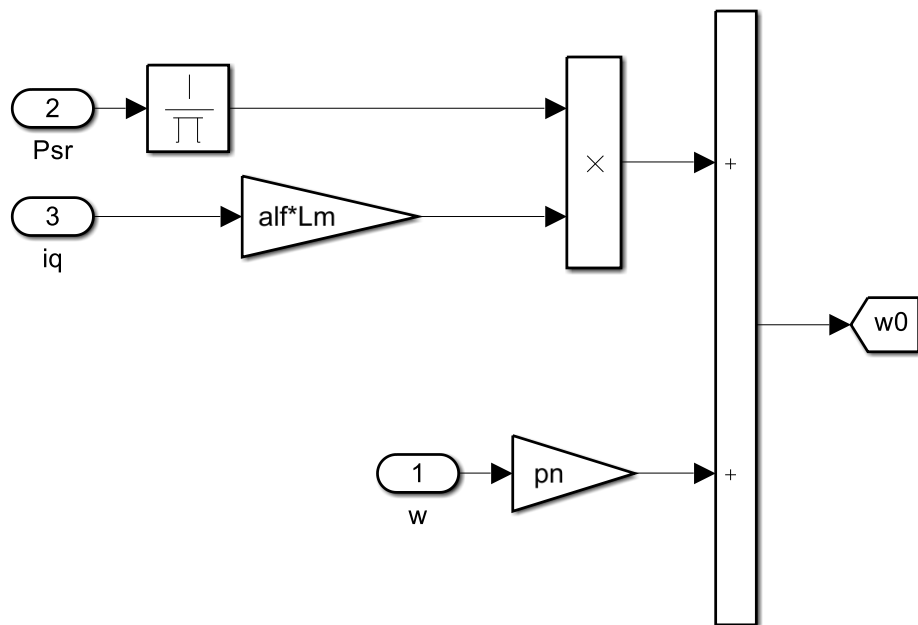


Рисунок 4.14 – Кутова швидкість вектора потокозчеплення

Так як наявні всі компоненти моделі, можемо скласти її та показати на загальному фоні, прикриваючи інші блоки підсистемами, зображено на рис. 4.15.

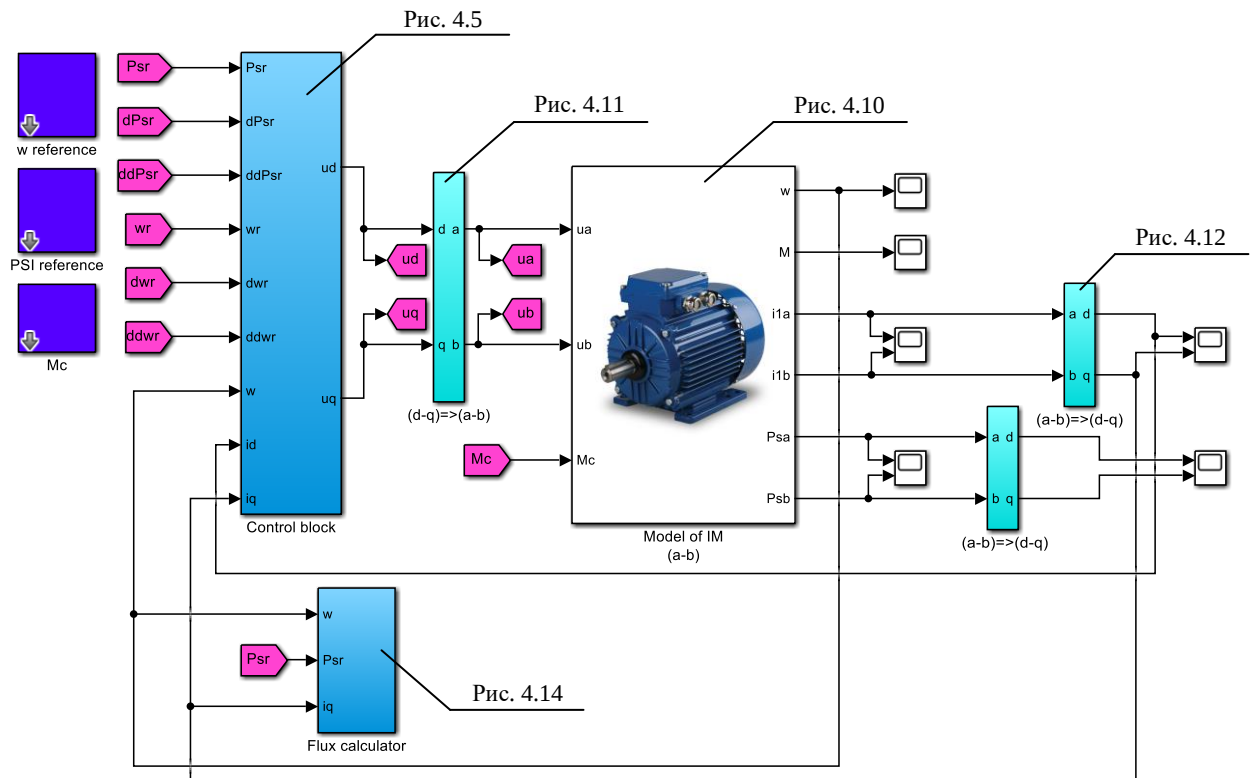


Рисунок 4.15 – Система керування рухом стрічкового конвеєру

Для алгоритмів частотного та векторного керування необхідно сформувати оптимальне завдання потокозчеплення ψ^* . Для визначення заданого оптимального потокозчеплення скористаємось виразом

$$\psi^* = \frac{L_m}{L_2} \psi_{1XX} = 0,9757 \cdot 0,9899 = 0,9659 \text{ Вб}. \quad (4.1)$$

4.2 Програма досліджень

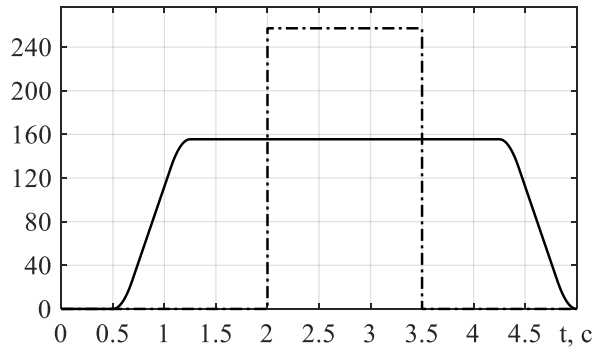
За допомогою складеної моделі буде проводитись дослідження системи за наступною програмою:

1. Побудова тестових перехідних процесів (швидкості, статичного моменту, потокозчеплення, величину моменту, струму, напруги, активної і механічної потужності, втрат, динамічної похибка по швидкості) при $M_c = M_n$;
 2. Побудова перехідних при різних моментах навантаження: $M_c = 0.3M_n$, $M_c = 0.5M_n$, $M_c = 0.7M_n$, $M_c = 1.2M_n$.
 3. Побудувати графіки залежності амплітуди динамічної похибки, активної і механічної потужності, втрат активної потужності від навантаження.
 4. Скласти таблицю з даними залежності динамічної похибки, активної і механічної потужності, втрат активної потужності від навантаження.
- Збудження відбувається за час 0,4 с з обмеженою другою похідною. Розгін двигуна буде починатись в момент часу 0,5 с по траєкторії 2-го порядку й триватиме протягом 0,75 с, що майже відповідає двократному динамічному моменту. Розганятись двигун буде до номінальної швидкості. З постійною номінальною швидкістю двигун працюватиме 3 с. В час 2 с буде стрибком прикладатися статичний момент навантаження й зніматиметься в час 3,5 с.

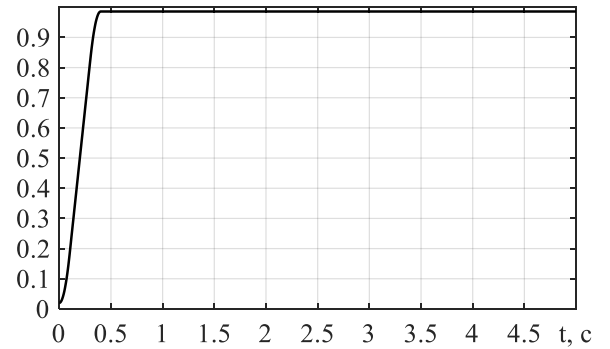
4.3 Моделювання роботи двигуна в номінальному режимі і при зміні моменту навантаження

Проводяться дослідження в номінальному режимі при навантаженні $M_c = M_n$. Результати представлені на рис. 4.16 та 4.17

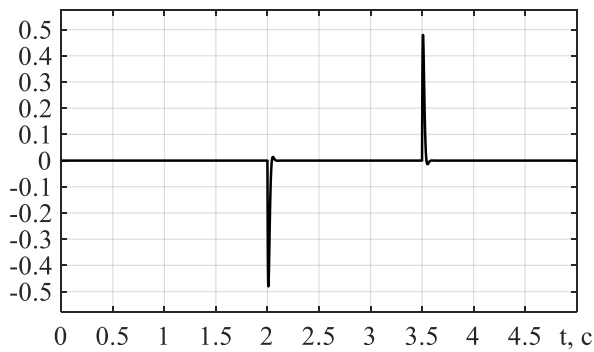
Задана траєкторія швидкості ω^* , рад/с,
та профіль моменту навантаження, $0.1 \cdot \text{Нм}$



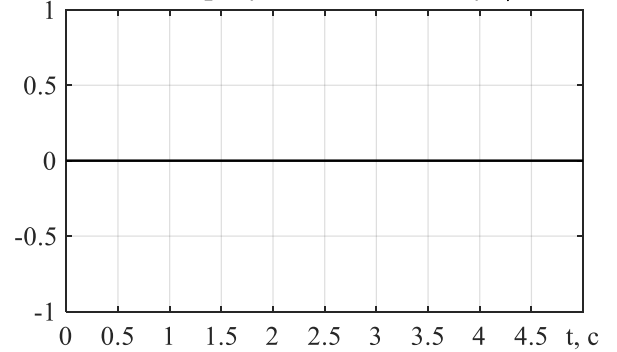
Задана траєкторія потокозчеплення ψ^* , Вб



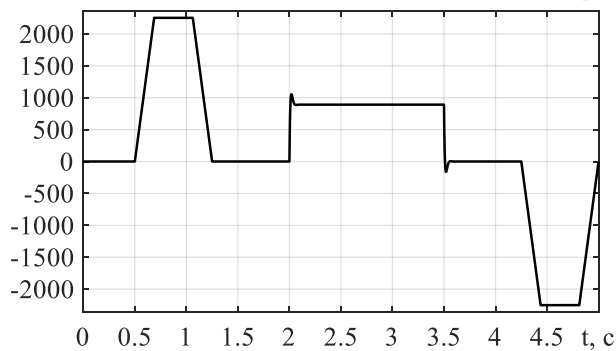
Похибка регулювання швидкості $\tilde{\omega}$, рад/с



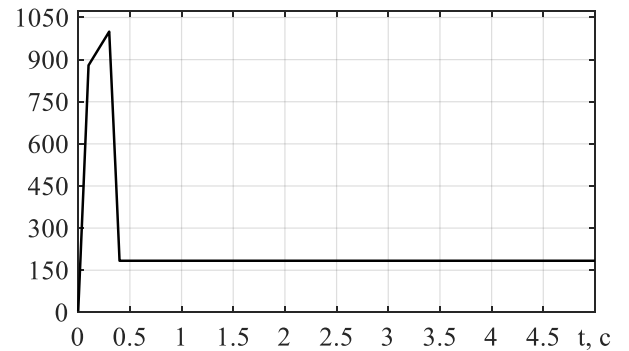
Похибка регулювання потоку $\tilde{\psi}$, Вб



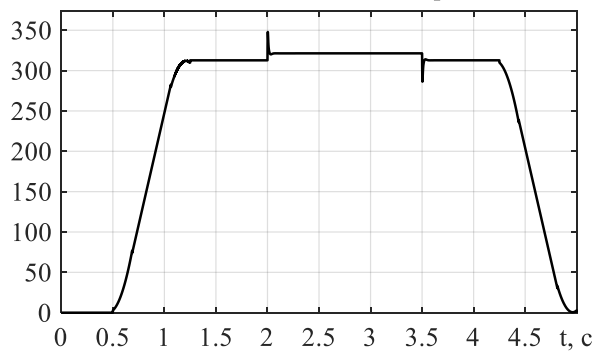
Заданий моментоутворюючий струм i_q^* , А



Заданий потокоутворюючий струм i_d^* , А



Керуюча напруга u_q , В



Керуюча напруга u_d , В

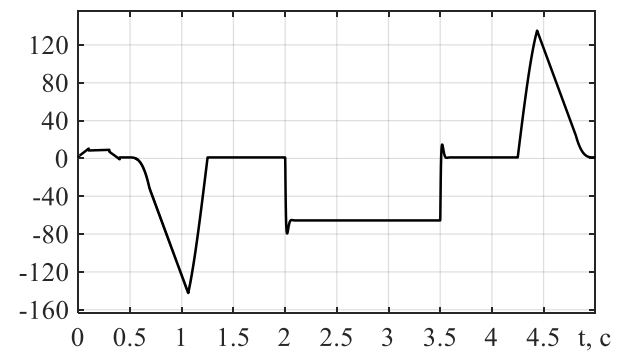
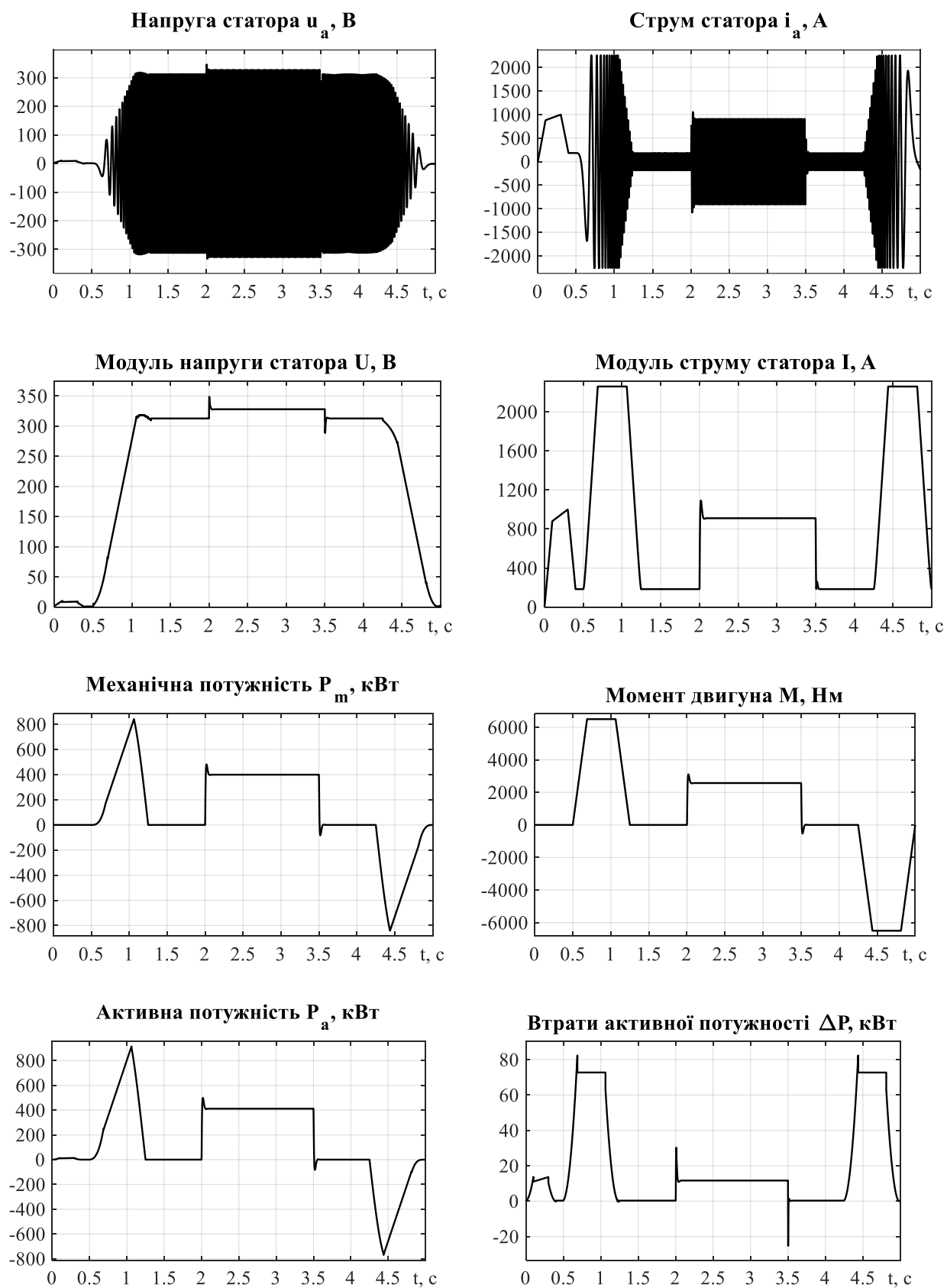


Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням $M_c = M_n$



Із графіка перехідного процесу похибки регулювання швидкості бачимо, що при розгоні та гальмуванні похибки відсутні, що забезпечується за рахунок дії компенсацій першої і другої похідних завдання швидкості. При накиданні й скиданні статичного моменту навантаження присутні динамічні похибки, що пов'язано з тим що момент навантаження не вимірюється. Наявність ПП-регулятора забезпечує відсутність статичних похибок.

На графіку похибки регулювання потоку бачимо, що похибка відпрацювання потокозчеплення рівна нулю. Це забезпечується роботою регулятора модуля потокозчеплення ротора та відсутністю збурень в підсистемі регулювання потоку завдяки розв'язці процесів керування в електромагнітні та в електромеханічній підсистемах.

Заданий моментоутворюючий струм i_q^* повністю співпадає із формою графіка моменту двигуна. Із графіків струму i_q^* та моменту бачимо дію утворення динамічного моменту та відповідної моментної складової струму на ділянках розгону і гальмування.

На ділянках холостого ходу відсутній момент та струм i_q^* це зумовлено відсутністю в моделі двигуна в'язкого тертя.

Керуючі напруги u_d , u_q формуються такими, щоб забезпечити необхідні форми струмів по осям (d) і (q).

На графіках напруги та струму по осі α відображені напруга і струм, що відповідають реальним фізичним значенням напруги і струму у фазі А.

За графіком механічної потужності можемо бачити вихідну потужність двигуна. Графік активної потужності відображає потужність, яку споживає двигун від інвертора. При дії номінального навантаження за графіками механічної та активної потужностей можемо визначити номінальний ККД двигуна.

Із графіку втрат активної потужності бачимо, що активні втрати прямо пропорційні моменту двигуна.

Проведемо дослідження впливу моменту навантаження на роботу електроприводу. Побудуємо графіки перехідних процесів при зміні номінального моменту навантаження у 0,3 M_n , 0,5 M_n , 0,7 M_n та 1,2 M_n рази (рис. 4.18-4.25).

Із отриманих графіків перехідних процесів можемо спостерігати, що при збільшенні моменту навантаження збільшується похибка відпрацювання швидкості, збільшуються активні втрати потужності й відповідно власне сама активна й механічна потужності.

Збільшення навантаження призводить до зростання заданого моментоутворюючого струму i_q^* , який формує відповідний момент двигуна.

Відсутність моменту та струму i_q^* на ділянках холостого ходу свідчить про відсутність в двигуні в'язкого тертя. Для двигунів такої великої потужності таке припущення є допустимим.

Напруги u_d , u_q формуються регуляторами струму такими, щоб забезпечити необхідні форми струмів i_d^* , i_q^* .

Графіки напруги та струму по осі a відображають напругу і струм, що проходять в фазі А та відповідають реальним фізичним значенням напруги й струму.

За графіком механічної потужності можемо бачити вихідну потужність двигуна. Графік активної потужності відображає потужність, яку споживає двигун від інвертора. При дії неномінального навантаження за графіками механічної, активної потужностей та графіком активних втрат можемо бачити, що ефективність системи значно погіршується особливо при зменшенні моменту навантаження. Збільшення моменту навантаження не призводить до значного зниження коефіцієнту корисної дії, проте в такому випадку система вимагає підвищеного споживання струму. А це в свою чергу робить перевантаження на перетворювач частоти.

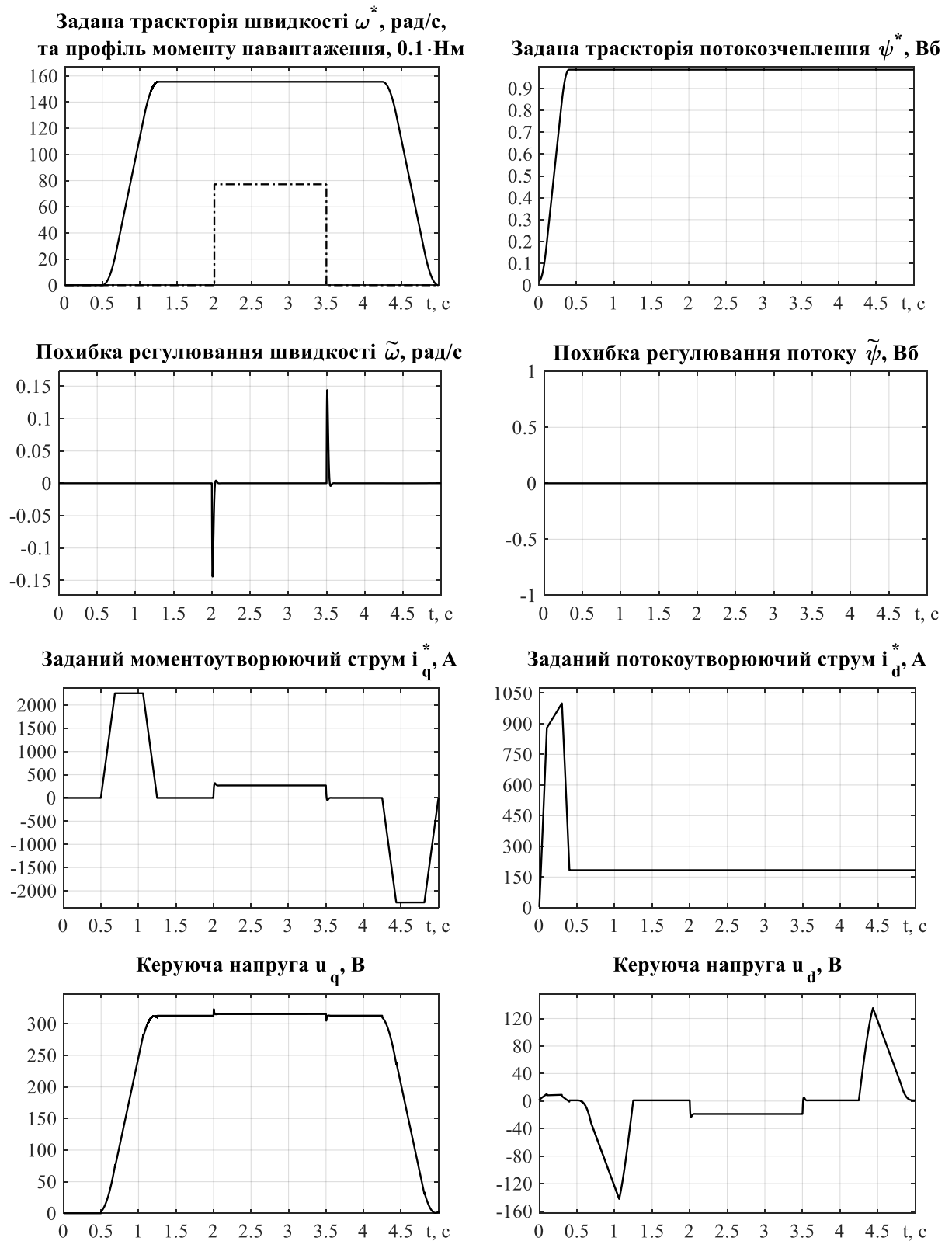


Рисунок 4.18 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.3M_n$

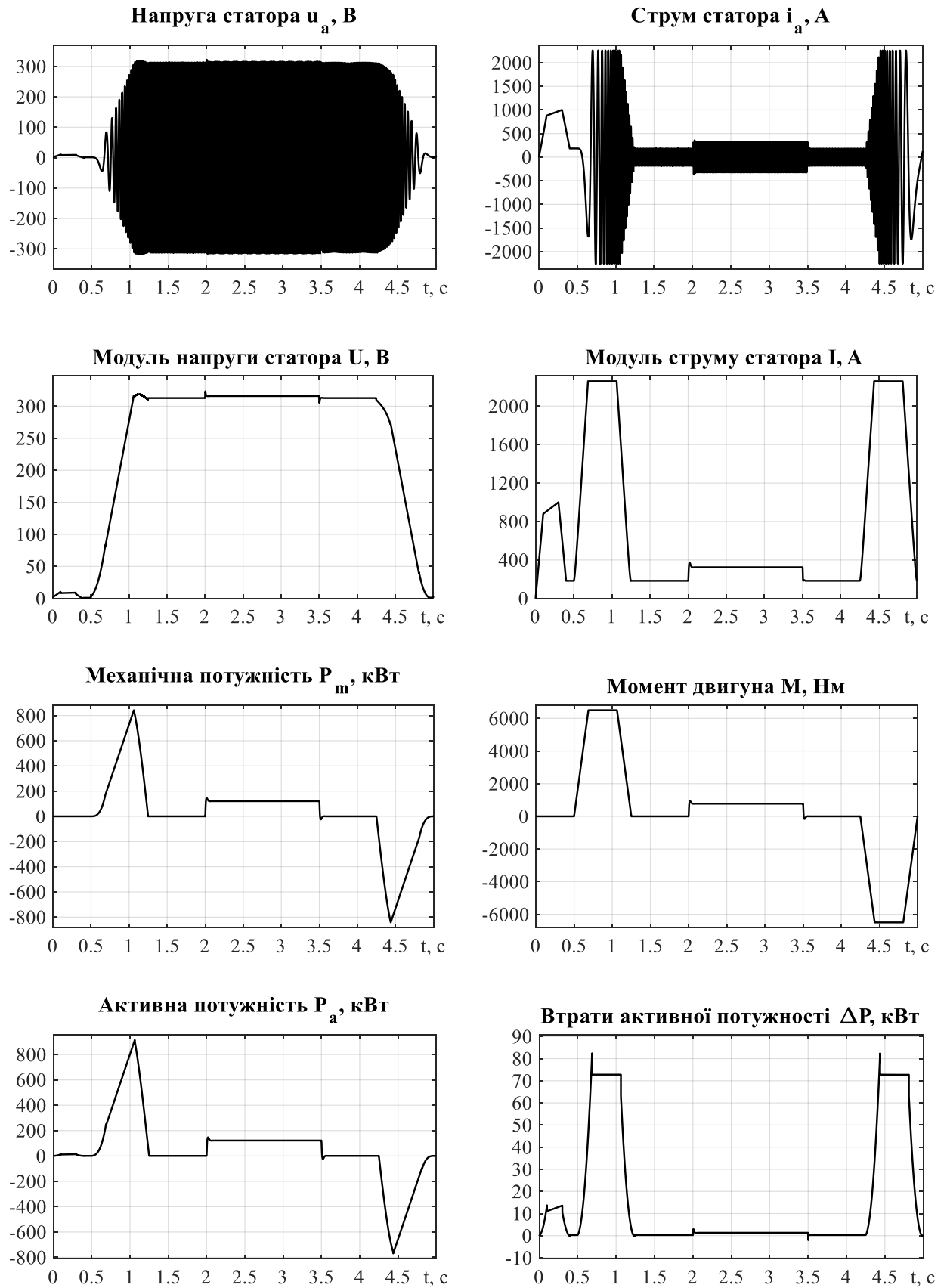


Рисунок 4.19 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.3M_n$

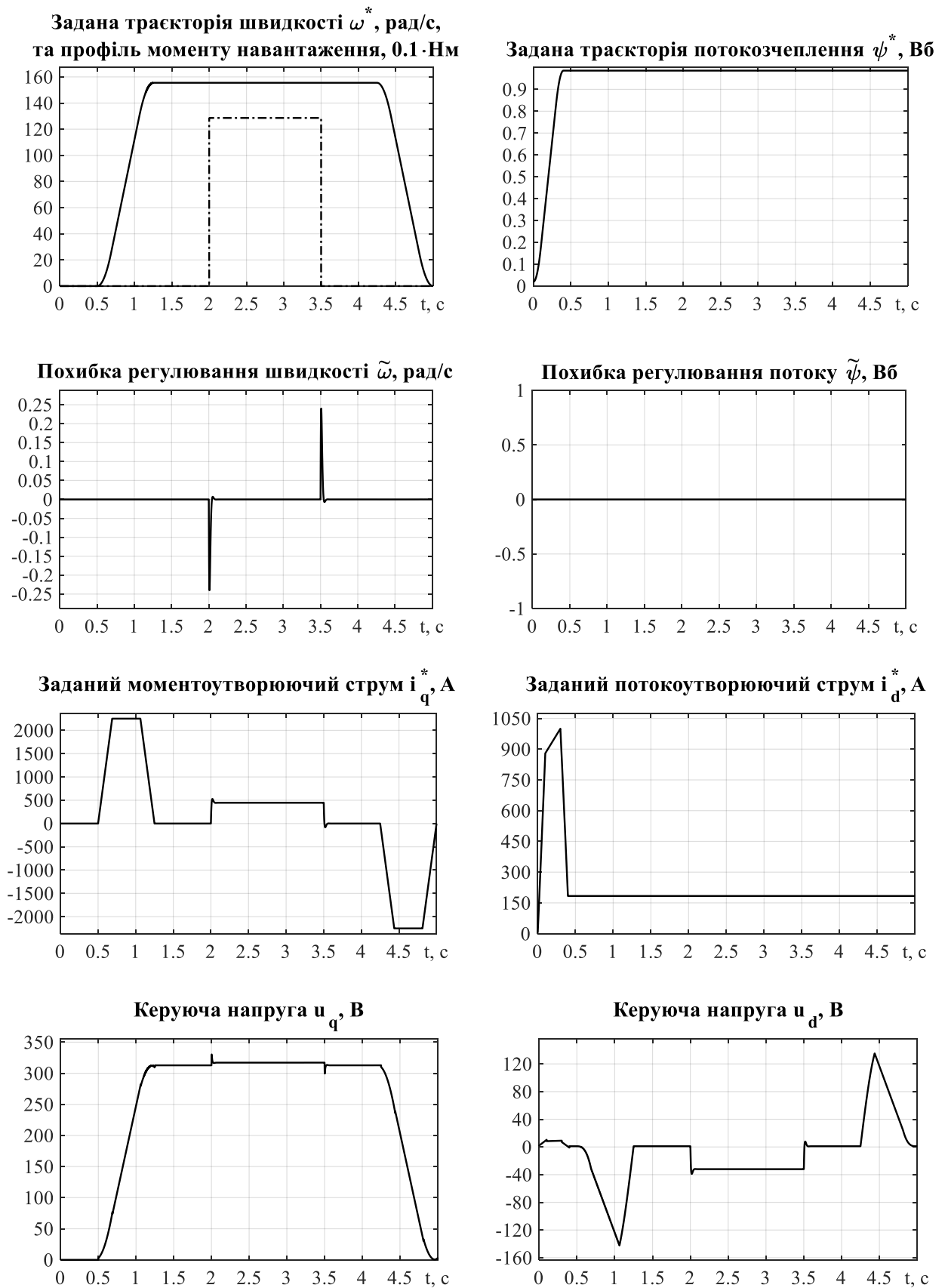


Рисунок 4.20 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.5M_H$

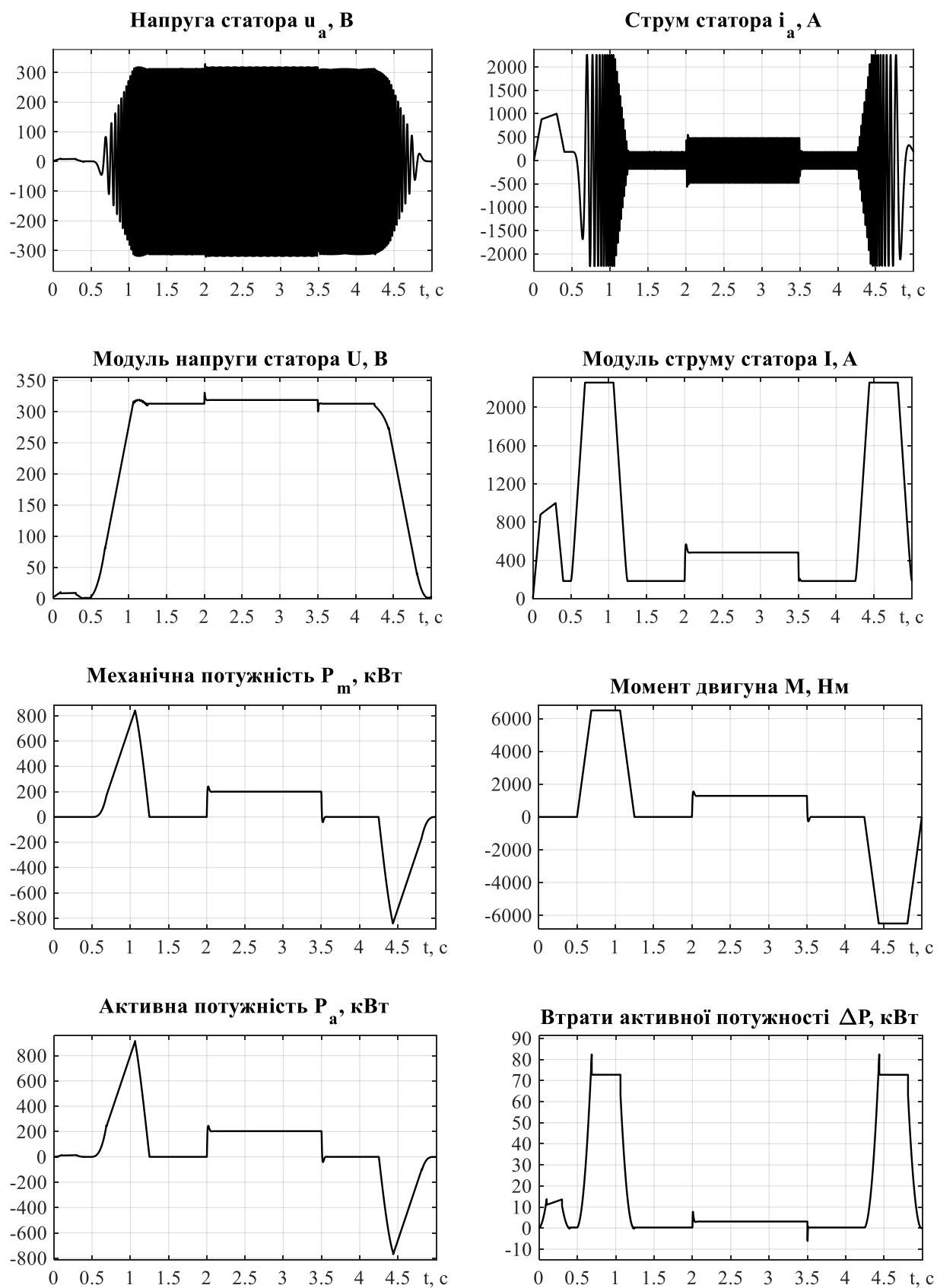
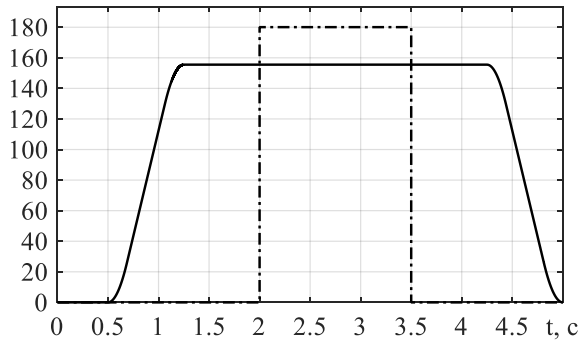
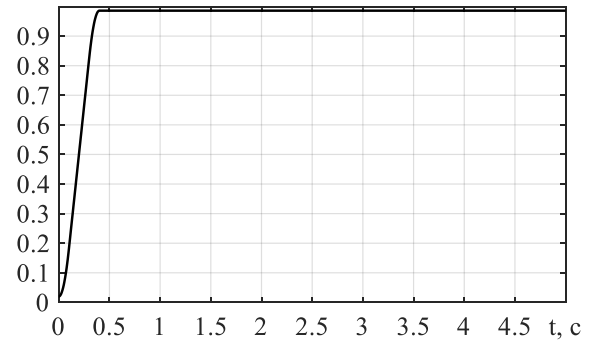


Рисунок 4.21 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.5M_H$

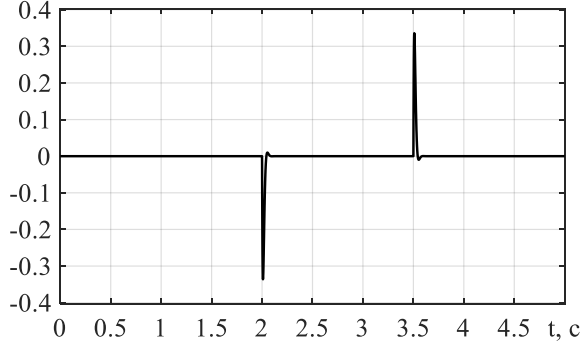
Задана траєкторія швидкості ω^* , рад/с,
та профіль моменту навантаження, 0.1·Нм



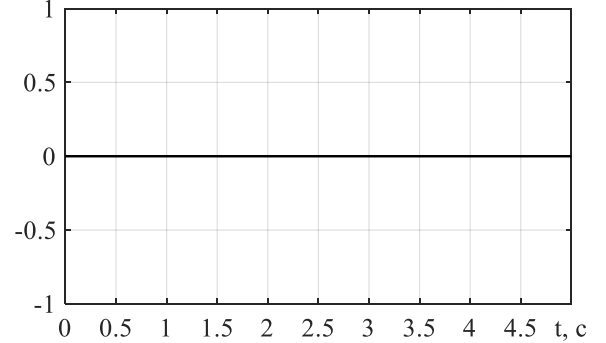
Задана траєкторія потокозчеплення ψ^* , Вб



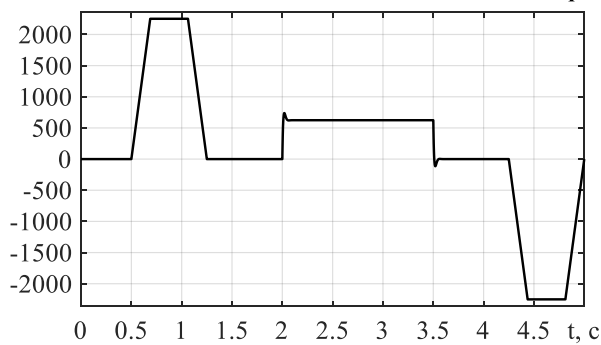
Похибка регулювання швидкості $\tilde{\omega}$, рад/с



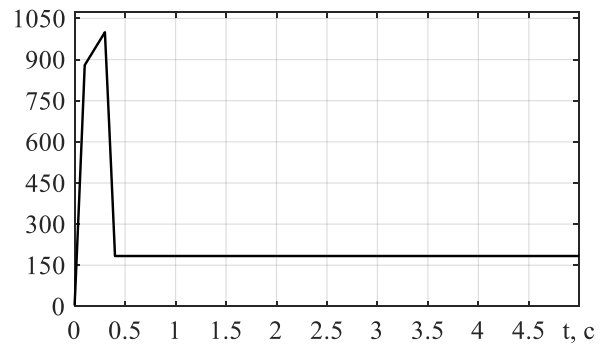
Похибка регулювання потоку $\tilde{\psi}$, Вб



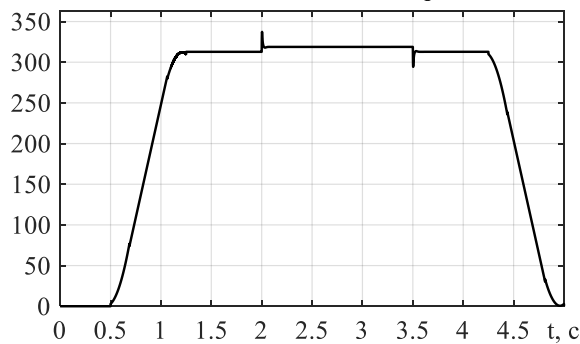
Заданий моментотворюючий струм i_q^* , А



Заданий потокоутворюючий струм i_d^* , А



Керуюча напруга u_q , В



Керуюча напруга u_d , В

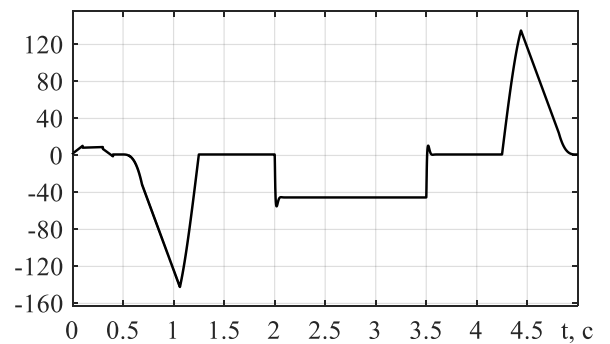


Рисунок 4.22 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та
при моменті навантаження $M_c = 0.7M_n$

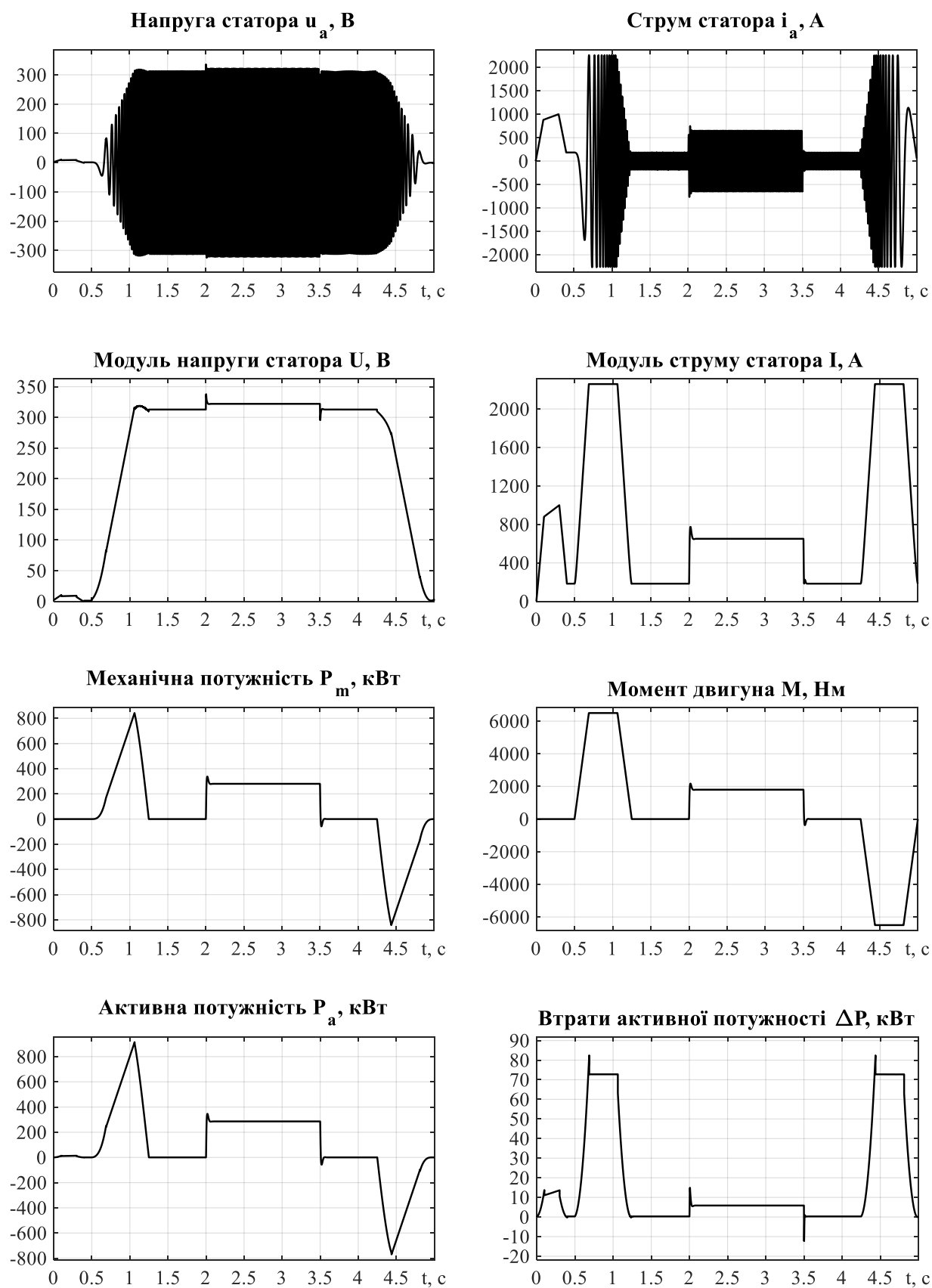


Рисунок 4.23 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.7M_H$

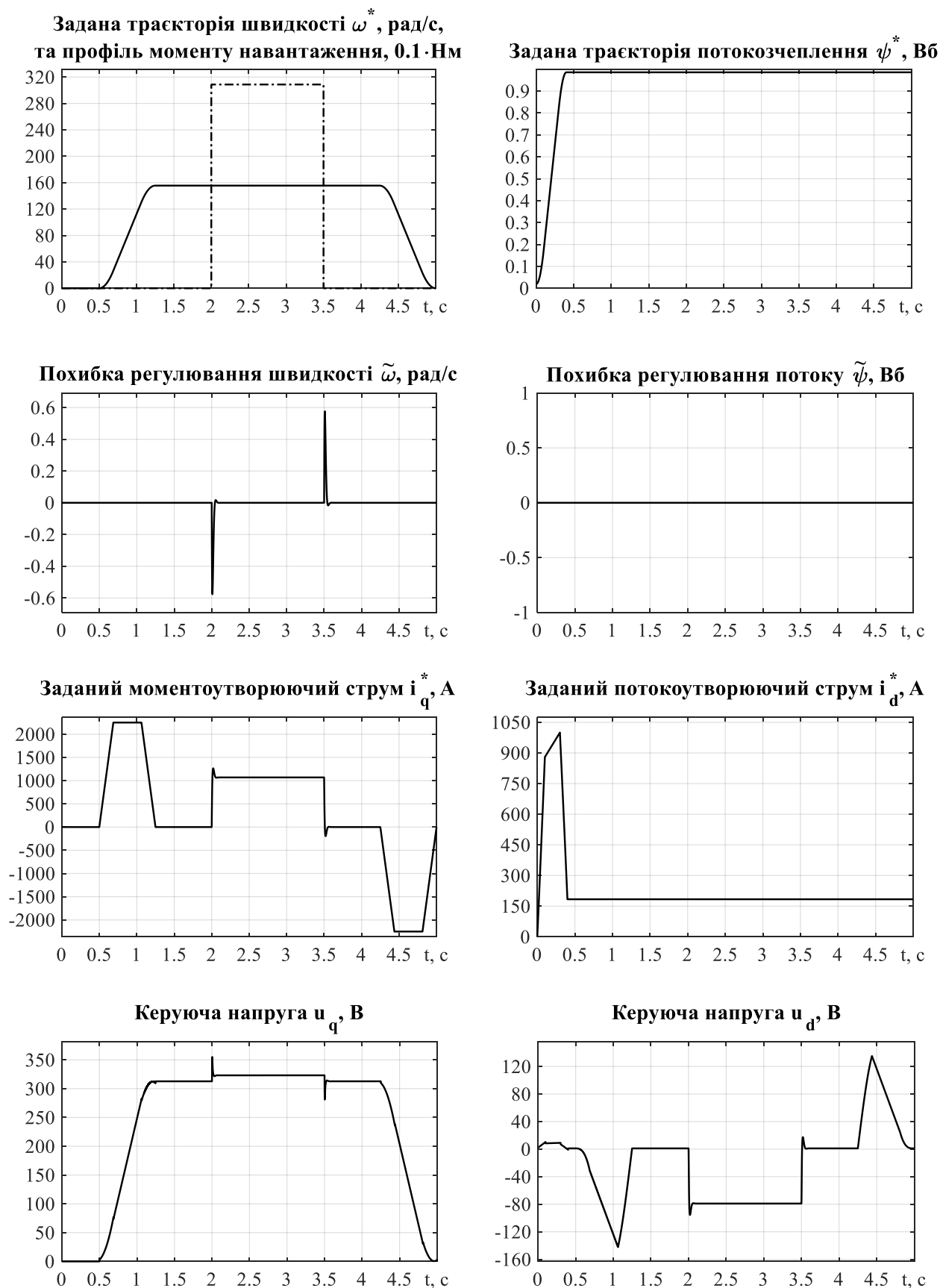


Рисунок 4.24 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 1.2M_H$

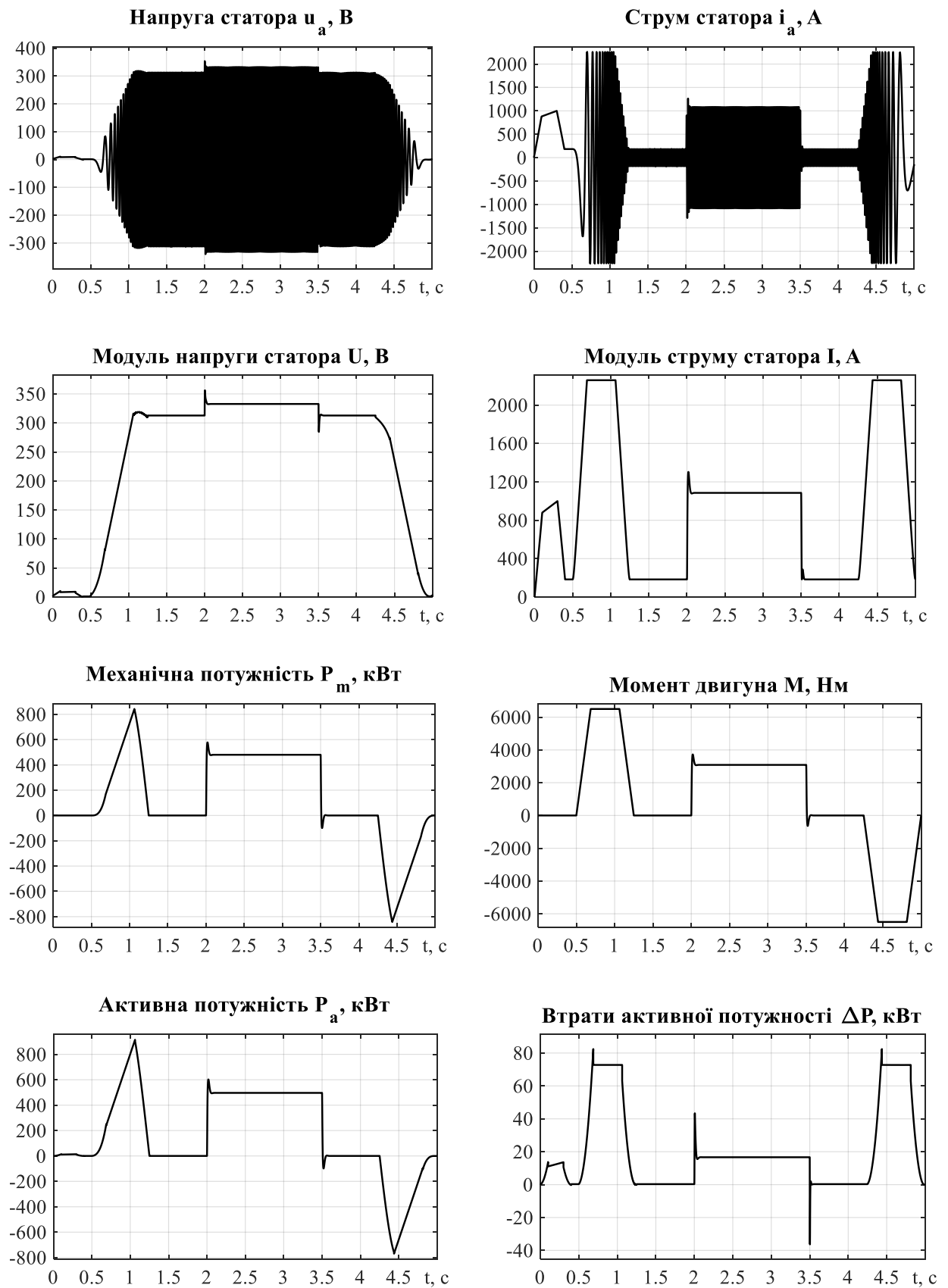


Рисунок 4.25 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 1.2M_n$

Загальні результати досліджень надані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна таблиця для статичних характеристик

M_c	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
$\tilde{\omega}$, рад/с	0,096	0,144	0,192	0,24	0,288	0,336	0,384	0,432	0,48	0,528	0,576	0,624
P_a , кВт	80,8	121,3	162,1	203,1	244,4	285,9	327,6	369,5	411,7	454,04	496,6	539,5
P_m , кВт	80,01	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520
ΔP , кВт	0,748	1,316	2,111	3,133	4,382	5,858	7,562	9,492	11,65	14,03	16,65	19,49

Виконаємо побудову статичних залежностей похибки швидкості, активної потужності, механічної потужності, втрат активної потужності від моменту навантаження (рис. 4.26-4.29).

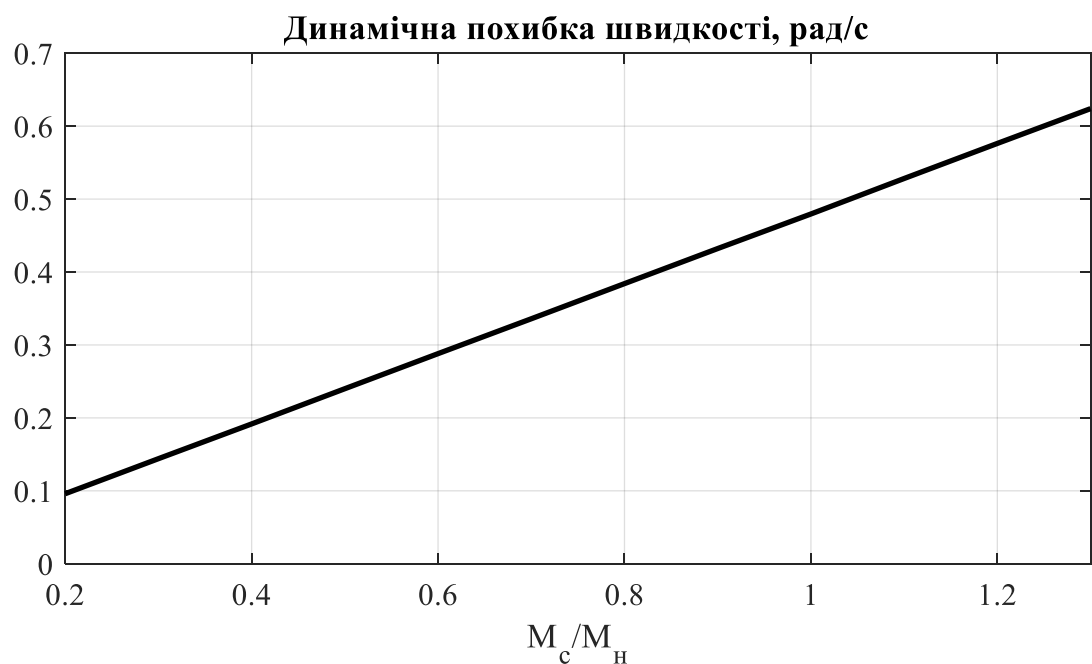


Рисунок 4.26 – Статична залежність динамічної похибки відпрацювання динамічної похибки швидкості від моменту навантаження

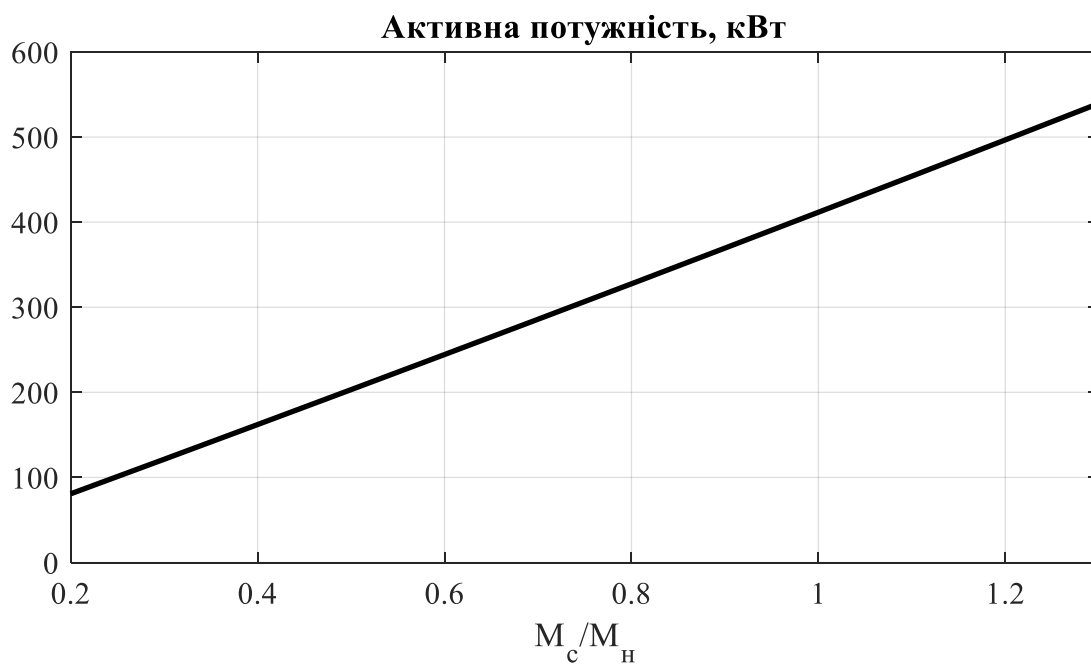


Рисунок 4.27 – Статична залежність активної потужності від моменту навантаження

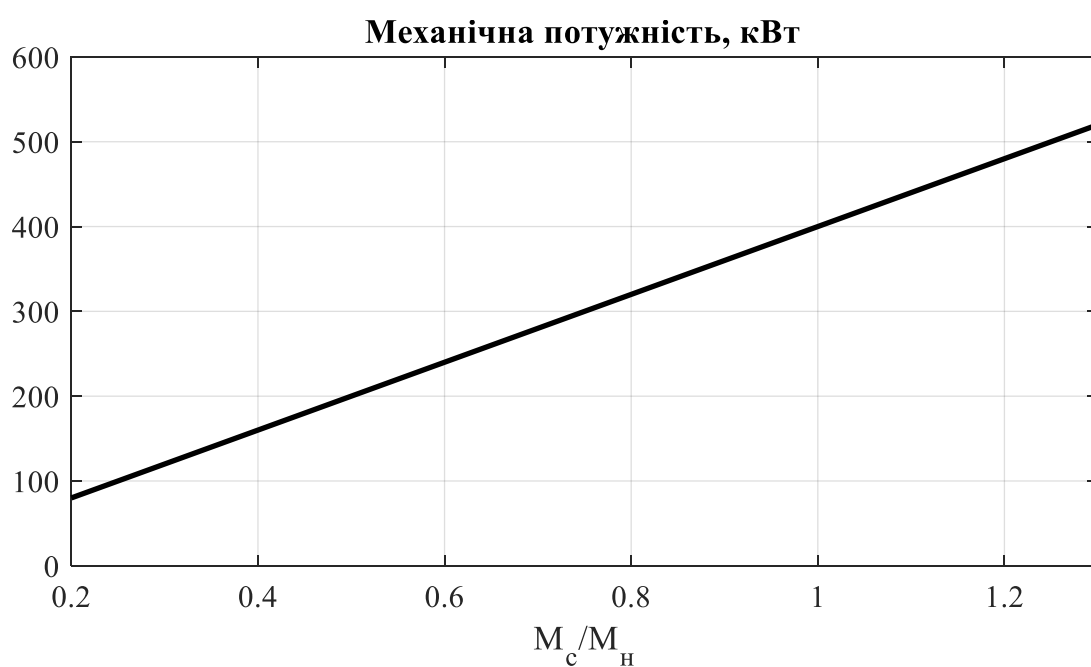


Рисунок 4.28 – Статична залежність механічної потужності від моменту навантаження

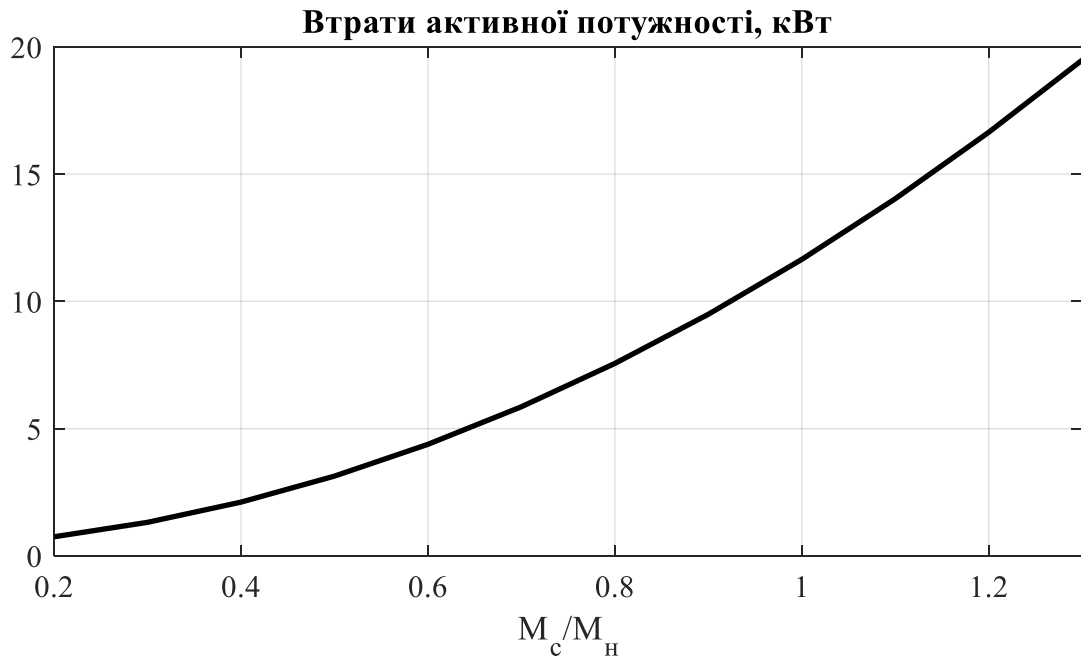


Рисунок 4.29 – Статична залежність активних втрат потужності від моменту навантаження

За отриманими результатами таблиці 4.1 та за графіками рис. 4.10 – 4.19 бачимо, що збільшення моменту навантаження призводить до збільшення динамічної похибки відпрацювання швидкості від $M_c = 0,3M_n$ $\tilde{\omega} = 0,144 \text{ рад} / \text{с}$ до $M_c = 1,2M_n$ $\tilde{\omega} = 0,576 \text{ рад} / \text{с}$, тобто 0,38% від ω_n . Час відпрацювання динамічної похибки не перевищує 0,8 с, що не має впливу на рівень стабілізації швидкості руху стрічки. Дана похибка виникає лише при зміні моменту навантаження й зумовлена тим, що алгоритм керування немає ніякої інформації про цей момент, тобто навантаження є зовнішнім збуренням, яке впливає на перехідний процес швидкості. Щоб мінімізувати дану похибку можна підняти значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів або збільшити момент інерції механічної частини електроприводу.

Зрозуміло, що збільшуючи навантаження, буде збільшуватися активна й механічна потужності від $M_c = 0,3M_n$ $P_a = 121,3 \text{ кВт}$ і $P_m = 120 \text{ кВт}$, до $M_c = 1,2M_n$ $P_a = 496,6 \text{ кВт}$ і $P_m = 480 \text{ кВт}$, оскільки більше навантаження змушує електропривод створювати більше значення компенсаційного моменту,

відповідно споживання струму при цьому також буде збільшуватись. Отже, активна й механічна потужності мають пряму пропорційну залежність від навантаження двигуна.

Проте як бачимо із графіка статичної характеристики активних втрат потужності, то активні втрати мають не лінійну залежність від навантаження, а квадратичну. Змінюється від $M_c = 0,3M_n$ $\Delta P = 1,316 \text{ кВт}$ до $M_c = 1,2M_n$ $\Delta P = 16,65 \text{ кВт}$, тобто 4.1% від P_n , що знаходяться в межах допустимих з боку вимог технологічного процесу. Така нелінійна залежність зумовлена наявністю Джоулевих (теплових) втрат, які є пропорційними квадрату струму. Тому отримуємо, що збільшення моменту навантаження потребує прямо пропорційного збільшення струму, а втрати при цьому є пропорційними квадрату струму.

Характеристики електромагнітної підсистеми електроприводу залишалися незмінними при зміні навантаження. Це зумовлено, тим що за рахунок векторного керування при виконанні асимптотичного полеорієнтування підсистеми керування моментом та потягозчепленням стають повністю розв'язаними одна відносно одної. Такий підхід також дозволяє забезпечити електромагнітні (реактивні) втрати в двигуні на постійному рівні, незалежно від навантаження.

Висновки до розділу 4

На основі схем, рівнянь і інших заданих даних було побудовано модель системи в середовищі MATLAB Simulink рис. 4.1. За допомогою цієї моделі було промодельовано роботу системи а також побудовано графіки перехідних процесів основних параметрів системи. Було проведено дослідження роботи системи при різних M_c відносно M_n і як на такі зміни реагує система. На основі

отриманих даних було зроблено висновки щодо правильних розрахунків і вибору двигуна і інших елементів в попередніх пунктах.

Таким чином використання системи електропривода ПЧ-АД з векторно-керованим асинхронним двигуном дозволяє забезпечити високі показники регулювання швидкості руху конвеєра, а також енергетичні показники і може бути рекомендована для використання в електромеханічних системах транспортних механізмів безперервної дії при їх модернізації та реконструкції.

ВИСНОВКИ

Всі поставлені в роботі завдання виконано в повному обсязі. У даному дипломному проекті була проведена детальна робота над розробкою та аналізом електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра. Використовуючи сучасні підходи та програмне забезпечення MATLAB, було створено математичну модель системи, що дозволило провести розрахунки та аналіз перехідних процесів системи.

Результати досліджень показали, що при використанні електромеханічної системи конвеєра з векторним керуванням, забезпечує показники точності стабілізації швидкості (похибка швидкості не перевищує 0.38% на всьому діапазоні зміни навантаження) а також досить високий рівень енергетичної ефективності. Аналіз перехідних процесів під різними умовами, зокрема при зміні навантаженнях, дав змогу зрозуміти поведінку системи та виявити її особливості.

Дослідження підтвердили важливість правильного вибору та налаштування електроприводу, а також оптимального керування системою для забезпечення її ефективності та надійності.

Загальним результатом досліджень є розробка оптимальної електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра, яка враховує вимоги промисловості щодо продуктивності, надійності та ефективності. Отримані результати можуть бути використані для покращення роботи магістральних стрічкових конвеєрів у різних галузях промисловості, що сприятиме зростанню продуктивності та зниженню витрат на транспортування.

Завершуючи, дослідження підтвердили актуальність теми електромеханічних систем магістральних стрічкових конвеєрів і показали потенціал подальшого розвитку цієї галузі. Результати роботи можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень та впровадження

у практику покращених електромеханічних систем магістральних стрічкових конвеєрів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бондарев В.С, Дубінець М.Б. та інші, Розрахунки підймальних і транспортувальних машин: підручник. – Київ; Вища школа, 2009, – 734 с.
2. David Cotter, Kenneth Kooistra, Curtis LeMay, BELT CONVEYOR [Електронний ресурс], URL: [https://patents.google.com/patent/US7093709B2/en?q=\(belt+conveyor\)&oq=belt+conveyor](https://patents.google.com/patent/US7093709B2/en?q=(belt+conveyor)&oq=belt+conveyor) (дата звернення 05.04.2023).
3. Владимир Иванович Родионов Ленточный конвейер [Електронний ресурс], URL: <http://surl.li/hvecg> (дата звернення 05.04.2023).
4. Чалий Ю.О. КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА «Система керування процесом випікання хлібобулочних виробів» [Електронний ресурс], URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/324227187.pdf> (дата звернення 04.04.2023).
5. Іноземцев О. М., Шеремет О. І. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОНВЕЄРІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАНТАЖІВ У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ [Електронний ресурс], URL: <http://surl.li/hveir> (дата звернення 15.04.2023).
6. Кравчик А. Е., Шлаф М. М., Афонін В. І., Соболенська Е. А. Асинхронні двигуни серії 4А : довідник. Київ, 1982. 504 с.
7. Редуктор ЦТНД-500. Сайт продавця Системи якості. URL: <https://xn--80aqy.com.ua/reduktory/tstnd-500/> (дата звернення 09.06.23).
8. Перетворювач частоти ACQ580-04-820A-4. Сайт продавця privod.kiev.ua. URL: https://privod.kiev.ua/ua/preobrazovatel_chastoty_acq580_450_kv_380v_acq580-04-820a-4 (дата звернення 09.06.23).