

**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 стрічкового конвеєра» Виконав:

студент IV курсу, групи ЕП-12

(шифр групи)

Дудка Вячеслав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник асистент Сергійенко О.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 – 2025 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Назва	Кільк	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4		Пояснювальна записка	86	
3	A1		Загальний вигляд стрічкового конвеєра	1	
4	A1		Результати досліджень магістрального стрічкового конвеєра	1	
5	A1		Електрична схема стрічкового конвеєра	1	
6	A1		Структурна схема стрічкового конвеєра	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Дудка В.С.					
Перевір.		Сергієнко О.В.				2	87
Реценз.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕП-12		
Н. Контр.		Сергієнко О.В.					
Затверд.		Ковбаса С.					

«Електромеханічна
система магістрального
стрічкового конвеєра»

**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)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Дудці Вячеславу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра

керівник проекту асистент Сергієнко О.В.

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

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2025 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту: 13.06.2025

3. Вихідні дані до проекту: Довжини окремих ділянок: $l_{12} - 4\text{м}$, $l_{34} - 4\text{м}$, $l_{56} - 16\text{м}$, $l_{78} - 800\text{м}$, $l_{910} - 820\text{м}$; тип стрічки – резинотросова; розрахункова продуктивність – 300 т/год; транспортований матеріал – необроблені корисні копалини; кути нахилу окремих прямолінійних ділянок конвеєра:

$\beta_{12} - 40$ град, $\beta_{34} - 0$ град, $\beta_{56} - 30$ град, $\beta_{78} - 2$ град, $\beta_{910} - 2$ 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.

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 14.04.2025

Календарний план виконання бакалаврської роботи
студента групи ЕП-12
Дудка В.С.

на тему: "Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра"

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд науково-технічної літератури	27.04	
2	Розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи	03.05	
3	Математичний опис елементів механічної схеми конвеєра	20.05	
4	Дослідження режимів роботи електромеханічної системи магістрального стрічкового конвеєра	01.06	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06	

Студент

(підпис)

Дудка В.

Керівник проекту

(підпис)

асистент Сергієнко О.В.

РЕФЕРАТ

Даний дипломний проект об'ємом 86 сторінок представляє комплексне дослідження магістрального стрічкового конвеєра, підтвержене 38 ілюстраціями та 11 таблицями, які деталізують функціонування системи. На початковому етапі роботи проведено ретельний аналітичний огляд даної тематики, що дозволило сформулювати основні технічні вимоги до електроприводу конвеєра та обґрунтувати вибір оптимальної системи керування.

В результаті детальних розрахунків визначено оптимальні параметри та експлуатаційні характеристики магістрального стрічкового конвеєра. Особливу увагу приділено розробці математичної моделі електромеханічної системи в середовищі MATLAB, яка дозволила провести аналіз динамічних процесів у системі. Створена модель дала змогу дослідити поведінку системи при різних режимах роботи, зокрема проаналізувати перехідні процеси, що виникають при зміні навантажень, що є важливим для оцінки стабільності та ефективності запропонованого технічного рішення.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Дудка В.			<i>Електромеханічна система магістрального стрічкового конвеєра</i>	Літ.	Лист	Листів
Перевір.		Сергієнко О.В.					6	87
Реценз.						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-12</i>		
Н. Контр.		Сергієнко О.В.						
Затв.		Ковбаса С.						

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1 Аналіз конструкції та режимів роботи стрічкового конвеєра.	8
1.2 Основні вимоги до електроприводів	19
1.3 Огляд наукових досліджень	20
1.4 Аналіз систем електроприводів	25
2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	32
2.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.	32
2.2 Розрахунок та вибір редуктора	39
2.3 Вибір перетворювача частоти.	42
2.4 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна.	43
3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОЇ СХЕМИ КОНВЕЙЕРА.	49
3.1 Функціональна схема.	49
3.2 Математична модель асинхронного двигуна	52
3.3 Алгоритм векторного керування	53
3.4 Застосування ПІ-регулятора в алгоритмі керування.	56
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МАГІСТРАЛЬНОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА.	59
4.1 Розробка моделі для дослідження статичних і динамічних характеристик механізму.....	59
4.2 Програма досліджень.	67
4.3 Моделювання роботи двигуна в номінальному режимі і при зміні моменту навантаження.	68
ВИСНОВКИ.	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.	87

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Дослідження будови та робочих режимів стрічкового конвеєра

Стрічкові конвеєри функціонують безперервно. Вони знаходять широке застосування у різних галузях промисловості, зокрема у гірництві, вугільній промисловості, енергетичних комплексах тощо. Довжина таких конвеєрних систем може сягати 4 кілометри в одній ланці, а потужність їхніх приводних станцій - 5 мегаватт.

До основних переваг стрічкових конвеєрів належать: можливість переміщення вантажів на значні відстані; висока продуктивність та стабільність роботи; надійність конструкції та менша вага порівняно з іншими транспортними системами; зручність експлуатації та обслуговування; налаштування повної або часткової автоматизації процесів; енергоефективність та мінімальні втрати енергії.

Стрічкові конвеєри призначені для транспортування різних матеріалів, включаючи сипучі, розсипчасті та штучні гірські породи. Переміщення може здійснюватися як по горизонтальній поверхні, так і під нахилом (вгору або вниз).

Таким чином, стрічкові конвеєри залишаються одним із найефективніших способів транспортування сировини у промислових умовах завдяки своїй універсальності, продуктивності та економічності. Попри широке застосування, стрічкові конвеєрні системи мають ряд істотних обмежень у порівнянні з альтернативними транспортними засобами. Суттєвими недоліками є значні капітальні витрати на обладнання, відносно недовгий експлуатаційний ресурс транспортерної стрічки (зазвичай 3-7 років залежно від умов роботи), а також технологічні обмеження щодо максимального кута нахилу, який зазвичай не перевищує 18-20° для стандартних конструкцій.

На ефективність стрічкових конвеєрів істотно впливають певні технологічні обмеження. Транспортування абразивних або крупнодисперсних матеріалів часто призводить до прискороного зносу стрічки та роликів опор, зменшуючи термін їх експлуатації. Конструктивні особливості стрічкових систем обмежують максимальний кут нахилу рівнем 16-18°, що пов'язано з ризиком ковзання вантажу та зниженням продуктивності.

Важливим недоліком є незмінність траєкторії руху - стрічкові конвеєри можуть функціонувати лише на прямолінійних ділянках. Для зміни напрямку транспортування необхідно встановлювати додаткові конвеєрні лінії з іншими приводами, що значно ускладнює конструкцію, збільшує займану площу та підвищує загальну вартість системи.

Стационарні конвеєри мають свої особливості, такі як:

- Необхідність комплексного підходу до проектування вузлів з'єднання;
- Жорстку прив'язку до геометрії та рівня поверхні технологічного об'єкта.

Стрічкові конвеєри включають у себе декілька ключових складових, зокрема:

- Приводну секцію, яка відповідає за передачу руху до конвеєрної стрічки;
- Приводний агрегат, що містить електродвигун і передавальний механізм;
- Проміжні приводні секції, які розташовуються між головним приводом і натяжним вузлом та забезпечують підтримку і рух стрічки;
- Натяжний механізм, що забезпечує належне натягнення стрічки і регулює його відповідно до умов експлуатації;
- Лінійні та перехідні стави, які поєднують елементи між приводом і натягачем, забезпечуючи стабільний і плавний рух стрічки;
- З'єднувальний вузол, який використовується для стикування двох окремих стрічок у разі потреби;
- Завантажувальну та кінцеву секції, що забезпечують відповідно подачу вантажу на стрічку та його вивантаження в точці призначення.

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

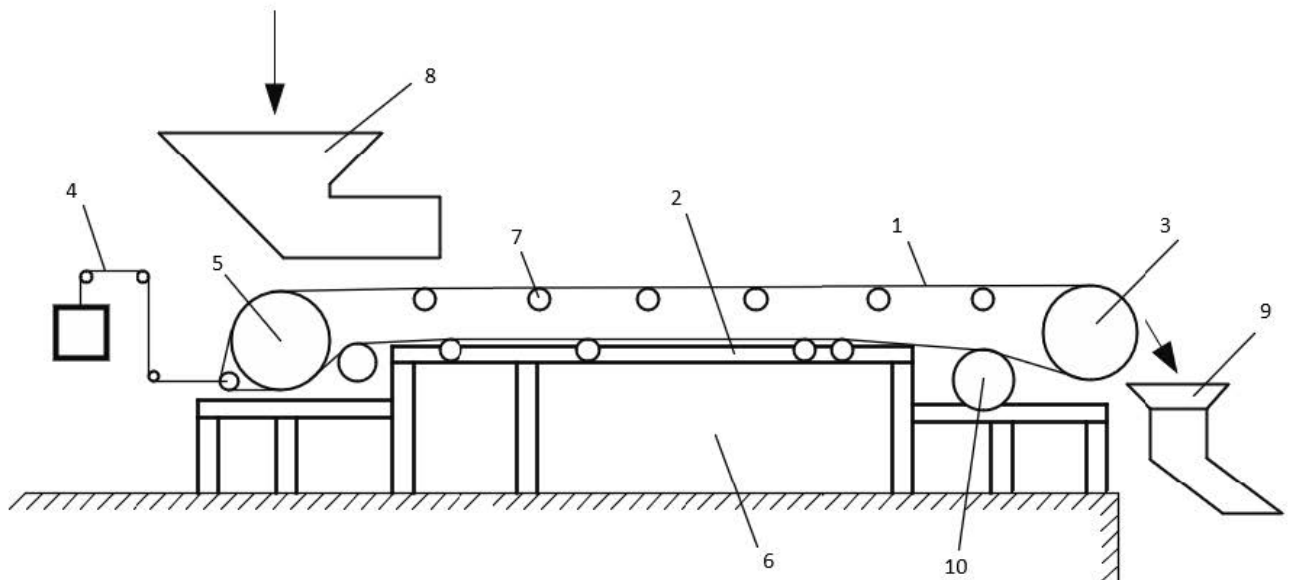


Рисунок 1.1 – Схема стрічкового конвеєра

1. Транспортерна стрічка
2. Роликів опорна конструкція
3. Приводний вал
4. Система натягу
5. Натяжний вал/циліндр
6. Несуча конструкція конвеєра
7. Опорні ролики з кріпленнями
8. Завантажувальний вузол
9. Вивантажувальний вузол
10. Напрямний барабан

Стрічка конвеєра одночасно виконує дві основні функції: служить для транспортування вантажу та виступає в ролі тягового елемента. Рух стрічки забезпечується за рахунок сил тертя, що виникають між її поверхнею та приводним барабаном. Під час експлуатації стрічка піддається комплексному механічному навантаженню, яке включає: Статичні навантаження від маси транспортуваного матеріалу, сили тертя в роликів опорах та інших вузлах, динамічні сили натягу по всій довжині контуру. На роботу стрічки також впливають зовнішні фактори, такі як температура навколишнього середовища, рівень вологості та інші умови експлуатації.

Стрічка конвеєра під впливом навантаження прогинається між опорними роликками та барабанами. Для її виробництва застосовують як натуральні (бавовняні), так і штучні волокна. В окремих випадках конструкція посилюється металевими або синтетичними тяговими елементами, що значно підвищує міцнісні характеристики.

У конструкції гумовотканинних стрічок застосовуються прокладки з різних видів тканин, які розташовані паралельно вздовж стрічки та з'єднані між собою методом гарячої вулканізації. Додатково над основною прокладкою може розміщуватися захисний шар (брєкерна тканина), призначений для запобігання механічним пошкодженням основної несучої частини стрічки.

Таким чином, стрічка конвеєра є складним багатофункціональним елементом, конструкція якого розрахована на ефективне виконання транспортних завдань у різних умовах експлуатації.

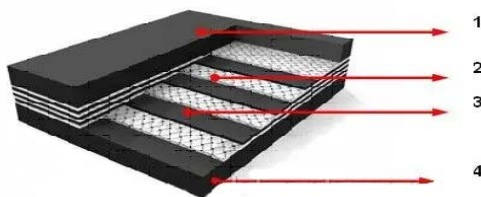


Рисунок 1.2 – Стрічка коонвеєра. 1, 4 – верхня і нижня обкладки, 2 – захисний слой, 3 – прокладки

Верхня (1) та нижня (4) обкладки виконують важливу захисну функцію, утворюючи надійний бар'єр для тягового каркаса стрічки конвеєра. Конвеєрні стрічки класифікують за типами та модифікаціями з урахуванням експлуатаційних умов та функціонального призначення. Виробники пропонують два основних класи: універсальні (загального використання) та спеціалізовані (адаптовані під специфічні умови). При проектуванні стрічок (загального призначення) розрахунок товщини каркасу включає додавання товщини гумового захисного покриття, яке зазвичай становить 3,2 мм з допустимим відхиленням $\pm 0,4$ мм. Це покриття захищає основу від зносу, механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища.

Стрічки на тканинній основі, поширені у промисловому застосуванні, мають максимальну довжину близько 300 метрів через технологічні обмеження при виготовленні. Такі обмеження виникають через труднощі з переміщенням та стикуванням довгих полотен із збереженням необхідної міцності.

Ці стрічки пропонують широкий діапазон міцності, відмінну стійкість до розривів уздовж і хорошу здатність поглинати динамічні навантаження. Проте їхня головна слабкість – значне видовження під дією експлуатаційних навантажень.

Плоскі ремені відрізняються спеціалізованими властивостями, що залежать від умов експлуатації. Виробники пропонують різні варіанти конструкцій, адаптовані під специфічні вимоги: стандартні виконання для звичайних умов, спеціальні морозостійкі версії для роботи при низьких температурах та антистатичні модифікації для вибухонебезпечних середовищ.

Гумотросові стрічки обладнані несучим каркасом із сталевих тросів із латунованим покриттям для покращення адгезії з гумовою основою. Ці троси розміщені паралельно в один шар по всій протяжності стрічки та зв'язані декількома текстильними прослойками. Верхня прослойка вкрита гумою, а нижня також має гумове покриття. Виготовлені стрічки не перевищують 300 метрів завдовжки.

Конвеєрний став утворює основну несучу конструкцію стрічкового транспортера, що складається із модульних секцій, міцно з'єднаних між собою. На рисунку 1.2 представлена конструкція ставу у зборі без транспортерної стрічки, що дозволяє чітко розглядіти його структурні особливості.



Рисунок 1.3 – Роликоопора

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

Приводна система транспортера формує замкнений тяговий контур, де силове навантаження передається через взаємодію таких ключових елементів: Приводні барабани, відхиляючі барабани, натяжні пристрої, електродвигуни з редукторами.

Приводні барабани забезпечують передачу зусилля від барабана до стрічки за рахунок фрикційного зчеплення. Їхній діаметр визначається залежно від довжини конвеєра, типу стрічкового матеріалу та кількості прошарків у стрічці. Зазвичай ширина приводного барабана перевищує ширину стрічки на 150–200 мм. Кількість таких барабанів у стрічковому конвеєрі може становити від 1 до 3 — залежно від необхідної продуктивності, довжини транспортера та його ухилу. Для покращення передачі тягового зусилля іноді використовують відхиляючі барабани, що дозволяє збільшити кут обхвату стрічки.

Барабани зазвичай встановлюються на підшипникових вузлах кочення, при цьому приводні барабани жорстко фіксуються на валу через шпонкове з'єднання. Що стосується натяжних та напрямних барабанів, їх можуть монтувати як на обертових, так і на нерухомих осях залежно від конструктивних особливостей конвеєра.

Натяжна система є критично важливим вузлом стрічкового конвеєра, що комплексно вирішує завдання підтримки оптимального натягу транспортерного полотна. Вона запобігає прослизанню стрічки на приводних барабанах, контролює допустиме провисання та компенсує робоче розтягнення матеріалу. Ключовими експлуатаційними параметрами системи виступають величина натяжного зусилля, швидкість переміщення та максимальний хід натяжного барабана. Паралельно з цим, сучасні завантажувальні пристрої реалізують важливу функцію рівномірного розподілу матеріалу по всій ширині стрічки, мінімізуючи при цьому втрати матеріалу та запобігаючи його розпилюванню під час транспортування.

Розташування очищувальних елементів біля приводного механізму дозволяє максимально ефективно використовувати силу натягу стрічки для підтримки необхідного контакту скребка з поверхнею. Гумові робочі кромки очищувачів забезпечують достатню жорсткість для видалення забруднень, зберігаючи при цьому здатність до пружної деформації, що запобігає абразивному зносу стрічки.

Режими функціонування конвеєра визначаються виходячи з величини навантажень та їхньої тривалості. Класифікація проводиться за різними категоріями експлуатації, які визначаються тривалістю використання, рівнем продуктивності та величиною навантаження на тяговий механізм. Ці режими є критично важливими для оцінки міцності та довговічності елементів конвеєра, а також виступають ключовими індикаторами його фактичного використання впродовж усього робочого циклу.

Основні режими роботи стрічкових конвеєрів включають:

1. Автоматичний режим:

Конвеєрна система функціонує повністю самостійно в автоматичному режимі, усуваючи необхідність постійного контролю з боку оператора. Програмне забезпечення дозволяє гнучко керувати параметрами роботи, включаючи регулювання швидкості транспортерної стрічки та контроль процесів завантаження і вивантаження.

2. Ручний режим: У ручному режимі керування конвеєром здійснюється оператором. Він самостійно встановлює бажану швидкість руху, активує або деактивує подачу та видалення матеріалів, постійно контролює процес і втручається за необхідності.

3. Реверсивний режим: Конвеєрна стрічка може працювати у зворотному напрямку, що дозволяє змінювати її рух залежно від поточних виробничих потреб або вимог до обслуговування обладнання.

4. Режим регулювання швидкості: Цей режим дає змогу регулювати швидкість переміщення стрічки відповідно до конкретних виробничих завдань, розмірів та ваги матеріалів, а також інших важливих факторів.

5. Зупинка конвеєра потрібна для проведення технічного обслуговування, очищення стрічки від залишків або інших цілей.

1.2 Основні вимоги до електроприводів

[3] Щоб забезпечити коректну, ефективну та безвідмовну роботу системи, до електроприводу висуваються такі ключові вимоги:

1. Ефективність

Привід має бути достатньо потужним, щоб переміщувати стрічку з вантажем на заданій швидкості, при цьому споживаючи мінімум енергії.

2. Надійність

Він повинен стабільно працювати тривалий час, навіть у забрудненому та агресивному середовищі, а також за значних перепадів температур і навантажень.

3. Зручність експлуатації

Важливо, щоб електропривід був простим у використанні та обслуговуванні, з легким доступом до всіх його елементів.

4. Керованість

Привід повинен дозволяти точно регулювати швидкість і напругу для безпечного та ефективного руху конвеєрної стрічки.

5. Безпека

Безпека електроприводу є пріоритетом. Він мусить відповідати всім стандартам безпеки та бути оснащеним захисними механізмами для запобігання небезпечним ситуаціям. Це включає повний набір захистів в електромеханічній системі: від максимального струму, перегріву двигуна, зсуву чи обриву стрічки, а також від критичних коливань напруги.

6. Мінімальний рівень шуму. Електропривід повинен працювати тихо, щоб зменшити шумове забруднення на робочому місці.
7. Екологічність. Він має відповідати вимогам екологічної безпеки, мінімізуючи негативний вплив на довкілля.
8. Вартість. Електропривід повинен бути економічно вигідним, забезпечуючи рентабельність виробництва.
9. Підтримання сталої швидкості. Привід має здатен підтримувати постійну швидкість в режимі компенсації навантаження.
10. Плавність розгону та гальмування. Важлива також плавність прискорення та уповільнення, з обмеженим ривком та траєкторією прискорення першого порядку.
11. Наявність екстреного гальмування за рахунок електродвигуна

1.3 Вивчення наукових розробок

У патентованій конструкції стрічкового конвеєра реалізовано модульний принцип організації, де система складається з низки функціонально автономних зон. Кожна така зона обладнана безперервною транспортерною стрічкою, яка огинає систему роликів, включаючи приводний ролик з індивідуальним приводним механізмом та мінімум один натяжний ролик для регулювання натягу. Автономність кожної зони забезпечує можливість незалежного транспортування вантажів, їх накопичення в межах окремих ділянок, а також гнучке комбінування різних режимів роботи. Інтегрована кутова секція є ключовим інноваційним елементом цієї конструкції. Вона дозволяє здійснювати з'єднання транспортних ліній під кутом, забезпечуючи плавне переміщення вантажів між ділянками та можливість бокового завантаження чи вивантаження. Конструкція кутової секції включає набір роликів різної довжини та систему стрічкових смуг змінної довжини, які разом утворюють кутово-спряжений край для безперешкодного переходу вантажів [4].

Таке технічне рішення відкриває широкі можливості для створення адаптивних транспортних систем з розширеним функціоналом, що особливо цінно для сучасних виробничих та логістичних комплексів, де потрібна гнучкість і багатофункціональність.

Згідно з описаним технічним рішенням, стрічковий конвеєр має специфічну конструкцію, що включає ключові компоненти для ефективного функціонування. Система оснащена приводним роликом та мінімум одним натяжним роликом, стратегічно розташованими вздовж та між бічними стінками конвеєра. Безперервна рифлена стрічка, виготовлена з матеріалу з низьким модулем пружності, огинає ці ролики, формуючи основу транспортного механізму.

Приводний ролик виконує ключову функцію, забезпечуючи рух стрічки по роликовій системі, що дозволяє ефективно транспортувати вироби по всій довжині конвеєра. Особливістю конструкції є властивості стрічки - її низький модуль пружності сприяє значному видовженню (не менше 0,75% від початкової довжини) під час первинного натягування при монтажі на ролики. Ця характеристика матеріалу стрічки забезпечує підвищену еластичність, що проявляється у здатності до розтягнення в діапазоні від 2% до 4% або більше під експлуатаційним навантаженням, що є важливою перевагою даної конструкції.

Стрічковий конвеєр представлено у вигляді модульної системи, що складається з двох або більше функціонально незалежних зон, кожна з яких здатна забезпечувати як транспортування, так і накопичення виробів у межах своєї ділянки. Конструкція кожної зони включає спеціалізований датчик виробів, який аналізує наявність вантажів на стрічці та передає сигнали до моторизованого ролика, що забезпечує синхронізовану роботу всієї системи відповідно до конкретних виробничих потреб.

Конвеєрна система відрізняється гнучкістю конфігурації - вона може бути встановлена під різними кутами нахилу, зберігаючи при цьому повну функціональність навіть у режимі накопичення вантажів на похилій поверхні. Технічна реалізація передбачає наявність двох протилежних бічних стінок, між якими розміщено приводний та щонайменше один натяжний ролик, що обертаються на спеціальних підшипникових вузлах. Ключовим елементом системи є безперервна транспортерна стрічка, намотана на роликову систему, яка комплектується щонайменше одним високочутливим датчиком виробів. Особливістю приводного механізму є використання інноваційних роликів з інтегрованими електродвигунами, де обертальний момент передається безпосередньо на роликову частину, що забезпечує високу точність і надійність руху стрічки. Така конструкція дозволяє досягти оптимального співвідношення продуктивності та енергоефективності при роботі в різних режимах навантаження.

Стрічковий конвеєр може включати дві або більше суміжних зон, обладнаних індивідуальними моторизованими роликами. Кожен такий ролик функціонує автономно, незалежно від інших приводних елементів системи, що забезпечує можливість селективного накопичення вантажів у певних зонах конвеєра.

Робота моторизованих роликів синхронізована з датчиками виробів, розташованими у відповідних зонах. При активації датчика конкретною зоною, відповідний ролик автоматично активує режим накопичення, тимчасово припиняючи транспортування на даній ділянці, тоді як інші зони продовжують роботу у штатному режимі.

Безперервна стрічка може володіти низькомодульною характеристикою, яка дозволяє їй розтягуватися приблизно на 1,5% або більше. Крім того, стрічка здатна забезпечувати розтягнення на рівні близько 2%, 4% або навіть більше. Початкове видовження стрічки в поздовжньому напрямку може становити щонайменше приблизно 0,75%, коли вона намотана або розташована навколо роликів.

Кутова секція конвеєра розроблена для інтеграції з основною транспортною лінією, забезпечуючи бічне відведення вантажів. Вона розміщена під певним кутом до головного транспортера та включає: Бічні огорожувальні елементи, кутову раму, що утворює з'єднувальний край і приводні та натяжні роликові механізми

Конструкція дозволяє ефективно перенаправляти вантажі з основного шляху, зберігаючи при цьому безперервність транспортування. Роликова система забезпечує плавний перехід матеріалів між ділянками.

Конструкція кутової секції конвеєра передбачає використання стрічкових смуг різної довжини, які намотані на приводні та натяжні ролики відповідних розмірів. Таке технічне рішення формує плавну транспортувальну поверхню з кутовим з'єднанням, що інтегрується з основним маршрутом переміщення вантажів.

Моторизований ролик може бути встановлений на кінці кутової секції конвеєра, протилежному кутовій частині рами. Цей ролик, а також один або кілька інших роликів, можуть містити множину пристроїв відстеження, призначених для контролю положення множини стрічкових смуг на моторизованому ролику. Принаймні деякі з роликів, які мають різну довжину, можуть бути обладнані відповідними пристроями відстеження, що забезпечують контроль за відповідними стрічковими смугами серед множини смуг, що знаходяться на роликах різної довжини. Пристрої відстеження можуть включати елементи у вигляді смуг або коронок, розміщених навколо відповідних роликів.

Стрічковий конвеєр може бути організований з численними незалежно працюючими зонами або сегментами. Кожна така зона оснащена власною безперервною конвеєрною стрічкою, що рухається за допомогою моторизованого ролика. Ці зони можуть функціонувати синхронно, утворюючи безперервно працюючий стрічковий конвеєр, або ж працювати автономно як накопичувальний конвеєр. В останньому випадку керування зонами здійснюється за допомогою фотоелементів або датчиків. Стрічковий конвеєр з зональним управлінням функціонує за аналогічним принципом, що й роликівна система, проте має ключову відмінність у конструкції приводу. Замість складних механічних з'єднань між роликами тут застосовується єдина конвеєрна стрічка, яка огинає як приводні, так і натяжні ролики кожної зони. Принцип зонального управління дозволяє ефективно реалізувати функцію накопичення вантажів, зберігаючи при цьому всі переваги стрічкового транспорту. Кожна зона може працювати в автономному режимі, що забезпечує гнучкість технологічного процесу.

Кутова секція конвеєра реалізує безперервну транспортувальну поверхню з плавним кутовим переходом завдяки інноваційній конструкції, що поєднує моторизований приводний ролик з набором роликів змінної довжини та спеціальними стрічковими смугами різних розмірів. Ця технологічна особливість дозволяє створити оптимальне з'єднання з основним конвеєром без необхідності додаткового вирівнювання стрічки.

Стрічкові елементи різної довжини, намотані на відповідні ролики, формують єдину функціональну поверхню, що забезпечує ефективну передачу тягового зусилля та мінімізує енерговитрати. Використання роликів змінної довжини дозволяє досягти ідеального прилягання до основного транспортерного шляху, усуваючи традиційні проблеми зносу в зоні кутового переходу.

Конструкція відрізняється високою адаптивністю - модульний принцип побудови дає можливість легко інтегрувати кутову секцію в існуючі конвеєрні системи без значних конструктивних змін. Таке рішення суттєво підвищує ефективність роботи всієї транспортної системи, зберігаючи при цьому надійність і довговічність обладнання.

Конструкція стрічкового конвеєра має певні технологічні обмеження, які впливають на його ефективність. Нерівномірний прогин стрічки між роликівими опорами створює додатковий опір руху, що призводить до зростання енергоспоживання системи. Цей ефект особливо помітний при великих відстанях між опорами або при транспортуванні важких вантажів.

1.4 Дослідження систем електроприводів

Конвеєрні системи демонструють різноманітність конструктивних рішень, що обумовлене специфікою їх застосування у різних галузях промисловості. В основі класифікації лежать такі ключові аспекти: галузеве призначення (від промислових до спеціалізованих медичних чи логістичних систем), принцип передачі тягового зусилля (механічні, гравітаційні чи пневматичні методи), характер переміщуваних вантажів (штучні, насипні чи пакувальні одиниці), а також конструктивні особливості (стаціонарні, переносні чи телескопічні моделі).

Класифікація конвеєрних систем передбачає їх поділ за кількома ключовими критеріями. Перший підхід розрізняє конвеєри загального призначення, які знаходять застосування у різних галузях економіки, та спеціалізовані установки, розроблені для конкретних виробничих потреб.

Важливим класифікаційним фактором є механізм передачі рушійної сили: Механічні системи з тяговими елементами (стрічкові, ланцюгові, канатні) самопливні конструкції, що використовують силу тяжіння, пневматичні установки, де транспортування здійснюється повітряними потоками.

За наявністю тягового елемента розрізняють: Системи з тяговими органами (стрічки, ланцюги, канати) безтягові конструкції (роликові, інерційні тощо). Типи конвеєрного обладнання мають унікальні конструктивні особливості та сферу оптимального застосування, що дозволяє вибирати найбільш ефективне рішення для конкретних виробничих умов.

Вибір стрічкового конвеєра визначається низкою ключових параметрів: властивостями матеріалів, що транспортується, потрібною потужністю, особливостями траси (довжина, рельєф), специфікою завантаження/розвантаження, а також умовами експлуатації (температура, вологість тощо).

Конвеєрний привід забезпечує регульовану швидкість руху тягового елемента, що може бути як постійною, так і ступінчастою залежно від технологічних вимог. Для плавного регулювання швидкості, необхідного під час технологічних операцій або процесів завантаження, використовують частотні перетворювачі варіатори швидкості та гідравлічні приводи.

Регулювання швидкості конвеєра може здійснюватись ступінчасто за допомогою механічних пристроїв (коробок передач, комплектів змінних шківів) або спеціальних багатошвидкісних електродвигунів. У сучасних конвеєрних системах використовуються два принципово різні типи передачі тягового зусилля: механічне зачеплення (зубчасті передачі) та фрикційний привід (сила тертя). Для стрічкових конвеєрів найбільш поширеним є фрикційний принцип роботи, де тягове зусилля створюється за рахунок тертя між поверхнею приводного барабана та транспортерною стрічкою.

Конвеєрні приводи поділяються на три конструктивні різновиди залежно від місця встановлення та принципу дії: кутові (розміщені на поворотних ділянках), традиційні прямолінійні зі звичайними зірками та гусеничні системи. Гусеничні приводи відрізняються особливими перевагами – вони обладнані приводними зірками меншого діаметру в порівнянні з кутовими аналогами що дає зменшення крутного моменту при збереженні необхідного тягового зусилля

Електроживлення магнітів реалізовано через тролейну систему зі струмознімачами, що забезпечує подачу струму виключно на прямолінійних ділянках руху. При проходженні поворотних зірочок та зворотної гілки система автоматично знеструмлює магніти, оптимізуючи енергоспоживання.

Щодо фрикційних гусеничних приводів, їх використання обмежене через низку техніко-економічних факторів. Для створення достатнього тягового зусилля, особливо на похилих трасах, необхідні значні габарити фрикційних вузлів. Додатковими недоліками будуть підвищені виробничі витрати та ускладнена конструкція, ці обставини роблять традиційні стрічкові приводи більш практичним рішенням для більшості промислових застосувань.

Конвеєрні системи бувають однопривідними або багатопривідними залежно від кількості приводів. У багатопривідних системах використання декількох двигунів вздовж траси дозволяє зменшити натяг і використовувати легші тягові елементи. Це особливо актуально для довгих конвеєрних ліній, де традиційні однопривідні системи демонструють низьку ефективність. Встановлення двох електродвигунів на одному приводному валі дозволяє замінити один потужний двигун кількома меншої потужності, що забезпечує компактніше компонування приводу та спрощення конструкції. Три електродвигуни зазвичай використовуються у двобарабанних приводах стрічкових конвеєрів. У разі використання об'єднаних приводів один електродвигун може одночасно обертати дві або навіть три приводні зірочки конвеєра за допомогою передавального механізму. Широко розповсюджені електроприводи зазвичай базуються на асинхронних електродвигунах, що працюють від трифазного струму. Для багатопривідних систем застосовують електродвигуни з підвищеним ковзанням або з фазним ротором, обладнаним додатковим опором, що дозволяє збільшити ковзання і покращити узгодження роботи декількох приводів, а також для конвеєрів

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

Використання гідравлічного приводу в конвеєрах є досить обмеженим, зазвичай його застосовують у вибухонебезпечних середовищах, наприклад, у вугільних шахтах. Також його можна зустріти в конвеєрах, що є частиною комплексних машин, які вже мають гідравлічний привід.

Сучасні конвеєрні системи дедалі частіше впроваджують інноваційні технічні рішення. Особливу увагу приділяють лінійним асинхронним двигунам, які забезпечують поступальний рух без необхідності використання громіздких редукторних механізмів.

Для приводів барабанного типу переважно застосовують компактні одноступінчасті редуктори циліндричної або конічно-циліндричної конструкції. У випадках з обмеженою потужністю ефективним рішенням є інтегрований мотор-барабан, що поєднує функції приводу та несучого елемента.

Ланцюгові конвеєрні системи характеризуються необхідністю застосування приводів з підвищеним передавальним числом, що обумовлено низькими обертовими швидкостями приводних зірок. Для реалізації цієї вимоги на практиці використовують компактні одноступінчасті редуктори, поєднані з відкритою зубчастою передачею.

Проектування електроприводів конвеєрних систем потребує комплексного аналізу їх експлуатаційних характеристик. При виборі обладнання необхідно враховувати: Стабільність роботи при тривалому функціонуванні зі змінним навантаженням, односторонній напрямок руху (без реверсу), здатність до роботи в динамічних та гальмівних режимах для похилих конвеєрів. Варто звернути увагу на синхронізації роботи послідовно розташованих конвеєрів, які забезпечують перевантаження матеріалів. Система управління повинна гарантувати: Послідовний пуск і зупинку обладнання, плавне регулювання та відповідність технологічному процесу. Ці вимоги обумовлені специфікою роботи конвеєрних ліній і необхідністю забезпечення безперервного транспортування матеріалів.

Для забезпечення безперебійної роботи конвеєрних систем необхідно дотримуватись певної послідовності операцій запуску та зупинки. Старт системи слід виконувати у зворотному напрямку до руху вантажу, що запобігає накопиченню матеріалів у перевантажувальних вузлах. Процес зупинки, навпаки, має відбуватись у напрямку руху вантажопотоку, забезпечуючи повне видалення матеріалу з траси. Особливої уваги потребують конвеєри з мінливим навантаженням, зокрема магістральні транспортні системи. В таких випадках доцільно застосовувати адаптивне регулювання швидкості руху тягового елемента. Це технічне рішення дозволяє підтримувати оптимальне навантаження на систему, знижувати енерговитрати, мінімізувати механічний знос комплектуючих та значно продовжити термін експлуатації конвеєрної стрічки. В результаті реалізації такого підходу досягається суттєве підвищення ефективності роботи всього транспортного комплексу при одночасному зниженні експлуатаційних витрат. Для багатоприводних конвеєрів електропривід повинен забезпечувати рівномірний розподіл навантаження між приводами та запобігати ковзанню стрічки. При значній довжині конвеєра особливу увагу слід приділяти обмеженню прискорення під час запуску, забезпеченню надійного зчеплення стрічки з барабаном і вантажем, а також уникненню динамічних коливань навантаження, які можуть негативно впливати на роботу системи. Електроприводи з регульованою швидкістю, застосовані в конвеєрних системах, забезпечують плавний пуск, контроль швидкості конвеєрної стрічки, обмеження динамічних навантажень та вирівнювання між приводами. У цьому проєкті ми плануємо використовувати одноприводний конвеєр, оскільки він має низку переваг, які роблять його привабливим для певних умов. Одноприводна система має ряд переваг, які роблять її привабливим рішенням для багатьох конвеєрних установок.:1. Одноприводні конвеєрні установки відрізняються енергоефективністю, оскільки використовують лише один електродвигун, що суттєво знижує споживання електроенергії. Така конструкція також спрощує експлуатацію - керування всією системою здійснюється через єдиний приводний механізм, що мінімізує кількість контрольного обладнання.

2. Одноприводні конвеєрні системи демонструють стабільну працездатність завдяки мінімалістичній конструкції. Відсутність складних механічних вузлів зменшує ймовірність відмов, що позитивно впливає на експлуатаційні витрати та періодичність технічного обслуговування.

3. Монтажні переваги таких систем полягають у їх конструктивній лаконічності, яка дозволяє скоротити:

- Час збирання
- Трудовитрати на установку
- Необхідний простір для розміщення

Вибір приводної системи для конвеєра є критично важливим технічним рішенням, яке безпосередньо впливає на ефективність та надійність роботи всього транспортного комплексу. Сучасні тенденції свідчать про переваги багатопривідних систем у випадках, коли потрібне точне регулювання параметрів руху або забезпечення підвищених тягових зусиль. Особливу увагу в промислових застосуваннях привертають системи "частотний перетворювач - асинхронний двигун" з векторним керуванням, які поєднують в собі переваги традиційних асинхронних двигунів з можливостями точного цифрового управління, де потрібна висока точність і енергоефективність тому що вони надають:

1. Високий рівень точності: Ця система забезпечує надзвичайно прецизійний контроль над обертовим моментом, швидкістю та позиціонуванням двигуна. Вона враховує всі електричні та механічні характеристики двигуна, гарантуючи бездоганну точність і стабільність роботи навіть за умов змінних навантажень або експлуатаційних параметрів.

2. Хороша динаміка: Завдяки векторному керуванню, двигун демонструє високу швидкість реакції. Система дозволяє оперативно реагувати на зміни навантаження, з високою точністю корегуючи швидкість та обертовий момент. Це є критично важливим для застосувань, де вимагається миттєва адаптація до умов або чітке позиціонування.

3. Підвищена енергоефективність: Векторне керування сприяє значній економії енергії. Воно оптимізує споживання, мінімізуючи втрати, що прямо впливає на зниження витрат на електроживлення.

4. Ефективна робота на низьких обертах: Ця система дозволяє двигунам функціонувати на низьких швидкостях із збереженням високої точності. Це особливо цінно в ситуаціях, де потрібне плавне переміщення обладнання або точне позиціонування.

Висновки до розділу 1

Дослідження експлуатаційних режимів та конструктивних особливостей стрічкових конвеєрів дозволило визначити ключові вимоги до їх електроприводних систем. В результаті комплексного аналізу було обґрунтовано вибір найбільш перспективної технології - частотно-керованого асинхронного електроприводу з векторним управлінням. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію параметрів електромеханічної системи з урахуванням динамічних навантажень і специфіки технологічного процесу. Особлива увага приділятиметься: детальному розрахунку двигуна, вибору параметрів двигуна, та підбору алгоритмів управління.

2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна

Задана структурна схема стрічкового конвеєра показана на рис. 2.1.

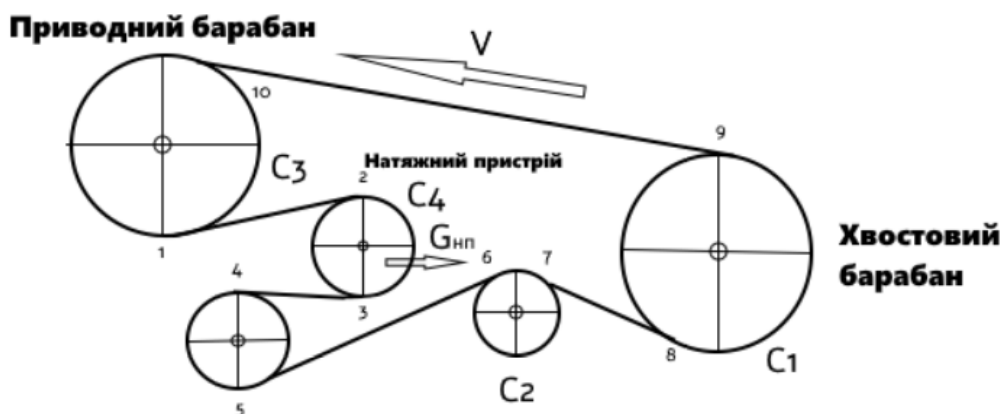


Рисунок 2.1 – Задана структурна схема стрічкового конвеєра

Таблиця 2.1 – Задані параметри конвеєра

Параметри конвеєра		Значення
Назва	Позначення	
1	2	3
Продуктивність	Π , кг/год	320 000
Швидкість руху стрічки (обрано самостійно)	v , м/с	1,6
Погонна маса стрічки (визначено самостійно)	m_0^* , кг/м	34
Кут обхвату приводного барабану (визначено самостійно)	α_{Π} , град	200

1	2	3
Кут обхвату натяжного барабану (визначено самостійно)	α_H , град	170
Довжини прямолінійних ділянок конвеєра	l_{12} , м	4
	l_{34} , м	4
	l_{56} , м	16
	l_{78} , м	800
	l_{910} , м	820
Кути нахилу прямолінійних ділянок конвеєра	β_{12} , град	40
	β_{34} , град	0
	β_{56} , град	30
	β_{78} , град	2
	β_{910} , град	2
Допустиме прискорення (обрано самостійно)	$\alpha_{дон}$, м/с ²	1,1
Діаметр приводного барабана (визначено самостійно)	D_n , м	1,3

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 масу стрічки

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

Ключовими етапами виконання розрахунку є: визначення опорів руху на окремих прямолінійних відрізках траси та обчислення їх загального впливу, встановлення значень натягу тягового елемента в точках його входу та виходу з приводного барабана, а також визначення необхідної потужності для роботи приводної станції.

Розрахуємо масу вантажу, що знаходиться на конвеєрі, розподілену на один метр довжини вантажної гілки конвеєра.

$$m_{\epsilon}^* = \frac{P}{3600 \cdot V} = \frac{300000}{3600 \cdot 1,6} = 55,56 \text{ кг / м.} \quad (2.2)$$

Визначимо маси прямолінійних ділянок конвеєру:

$$m_{12} = 34,0 \cdot 4 = 136 \text{ кг} \quad (2.3)$$

$$m_{34} = 34,0 \cdot 4 = 136 \text{ кг} \quad (2.4)$$

$$m_{56} = 34,0 \cdot 16 = 544 \text{ кг} \quad (2.5)$$

$$m_{78} = 34,0 \cdot 800 = 27200 \text{ кг} \quad (2.6)$$

$$m_{910} = (34,0 + 55,56) \cdot 820 = 73439 \text{ кг} \quad (2.7)$$

Сумарна маса системи, приведена до точки набігання стрічки на приводний барабан:

$$m_{\Sigma}^* = 73439 + 27200 \cdot 1,04 + 544 \cdot 1,04 \cdot 1,02 + 136 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 + 136 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1,04 \quad (2.8)$$

$$\approx 73439 + 28288 + 576,6 + 153,6 + 159,7 = 102617 \text{ кг}$$

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 прирощення 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:

$$\Delta F_{12} = (0,022 \cdot \cos(40^\circ) + \sin(40^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 136 \approx 892H \quad (2.10)$$

$$\Delta F_{34} = 0,022 \cdot 9,81 \cdot 136 \approx 29,4H \quad (2.11)$$

$$\Delta F_{56} = (0,022 \cdot \cos(30^\circ) + \sin(30^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 544 \approx 2910H \quad (2.12)$$

$$\Delta F_{78} = (0,022 \cdot \cos(2^\circ) - \sin(2^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 27200 \approx -9310H \quad (2.13)$$

$$\Delta F_{910} = (0,022 \cdot \cos(2^\circ) + \sin(2^\circ)) \cdot 9,81 \cdot 73439 \approx 56700H \quad (2.14)$$

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:

$$\begin{aligned} \Delta F_{\Sigma} &= 56700 - 9310 \cdot 1,04 + 2910 \cdot 1,04 \cdot 1,02 + 29,4 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 + 892 \cdot 1,04 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1,04 \\ \Delta F_{\Sigma} &\approx 56700 - 9682 + 3086 + 33 + 1005 = 52142H \end{aligned} \quad (2.15)$$

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



Рисунок 2.2 – Діаграма натягу конвеєра

Для визначення статичного зусилля на приводному барабані необхідно розрахувати мінімально допустимий натяг стрічки в точці її збігання з приводного барабана ($T_{сб\ min}$), який забезпечує відсутність проковзування стрічки відносно барабана. Цей розрахунок ґрунтується на умові Ейлера.

$$T_{сб.min} = \frac{52142 + 102617 \cdot 1,1}{e^{0,2 \cdot 3,49} - 1,15} = \frac{52142 + 112879}{2,01 - 1,15} = \frac{165021}{0,86} = 191885H \quad (2.16)$$

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 та приводним барабаном у формулі задається в радіанах.

З огляду на похибки розрахунку, що виникають через ряд припущень, введемо корекційний коефіцієнт:

$$T_{сб} = 1,1 \cdot 191885 \approx 211073H \quad (2.17)$$

Враховуючи динамічні навантаження, які виникають через рухомі маси конвеєра, розрахуємо натяг у зоні набігання на приводний барабан:

$$T_{нб} = 1,15 \cdot 211073 + 52142 + 102617 \cdot 1,1 \approx 242733 + 52142 + 112879 \approx 407754 H \quad (2.18)$$

Розраховуємо необхідну потужність електродвигуна:

$$P = 1,2 \cdot \frac{(407754 - 211073) \cdot 1,6}{0,8} = 1,2 \cdot \frac{196681 \cdot 1,6}{0,8} = 1,2 \cdot 393362 = 472 \text{ кВт} \quad (2.19)$$

Відповідно до розрахованої потужності обираємо електродвигун типу АМІ 500L6А (АВВ) [5]. У таблиці 3.2 приведено основні параметри цього двигуна при з'єднанні обмоток статора у зірку.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані електродвигуна АМІ 500L6А (АВВ)

Параметр	Значення
Номінальна потужність	$P_{2n} = 500 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 6000 \text{ В } (f = 50 \text{ Гц})$
Синхронна частота обертання	$n_0 = 1500 \text{ об/хв}$
Режим роботи	S1
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 95,2 \%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0,92$
Перевантажувальна здатність за моментом	$\lambda = 2,2$
Відношення пускового струму до номінального	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 6,5$
Момент інерції	$J = 9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Номінальне ковзання	$s_n = 0,8 \%$
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	$\overline{x''_2} = 0,13$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R''_2} = 0,012$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu} = 5,3$

2.2 Розрахунок та вибір редуктора

Розрахуємо 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 видно з проведених розрахунків, відносне відхилення між заданим і фактичним значенням швидкості не перевищує 3 %, що свідчить про достатній рівень точності.

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

За розрахованими даними передаточного числа та максимальною швидкістю двигуна обираємо редуктора типу КЦ2-500-71 [6], параметри якого занесені до таблиці 3.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики редуктора КЦ2-500-71

Параметр	Значення
1	2
Типорозмір	КЦ2-500-71
Передаточне число	71

1	2
Номінальний крутний момент на тихохідному валу	30000 Нм
Максимальна швидкість на вході	1500 об/хв
ККД	0,96
Маса	1500 кг

Виконаємо перевірку двигуна по перевантажувальній здатності. Момент інерції редуктора та момент інерції барабана приймаємо рівними моменту інерції електродвигуна. $J_{\delta} = J_p = J_{\delta} = 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Розрахуємо сумарний момент інерції механізму приведенного до валу двигуна

$$J_{\Sigma} = J_{\delta} + J_p + \frac{J_{\delta}}{i_p^2} + m'_{\Sigma} \cdot \frac{D_{\delta}^2}{4i_p^2} = 7 + 7 + \frac{7}{63^2} + 96547 \frac{1,25^2}{4 \cdot 63^2} = \quad (2.26)$$

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

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 ACS6080-04-0820-6 [7] від виробника АВВ. Параметри даного перетворювача частоти (ПЧ) занесено до табл. 3.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики ПЧ ACS6080-04-0820-6

Параметр	Значення
Модель	ACS6080
Напруга живлення	600 В
Номінальна потужність	500 кВт
Номінальний струм	820 А
Максимальна вихідна частота	50 Гц
Фільтр ЕМС	Наявний
Гальмівний модуль	Зовнішній
ПД 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

Даний частотний перетворювач має ряд важливих переваг. Вбудований пульт керування оснащений інтерактивними підказками, що спрощує налаштування приводу. Спеціалізовані функції для насосних систем дозволяють оптимізувати їх роботу. Вбудований енергомоніторинг постійно аналізує витрати електроенергії. Пристрій підтримує різноманітні типи двигунів, включаючи асинхронні, з постійними магнітами та синхронні з реактивним ротором. Конструкція відзначається високою надійністю та містить вбудований ЕМС-фільтр, дросель ланки постійного струму, інтерфейс Modbus RTU та функцію безпечного зупинення (STO). Можливість розширення комунікаційних інтерфейсів та додаткових дискретних входів/виходів через знімні плати додає гнучкості у використанні.

2.4 Розрахунок параметрів двигуна

Розрахуємо основні параметри електродвигуна. Частота обертання магнітного поля статора визначається за формулою:

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

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

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

Номінальна швидкість двигуна

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

Номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = 3215 (\text{Нм}) \quad (2.33)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності з каталогу)

$$M_k = \lambda M_n = 2,2 \cdot 3215 = 7073 (\text{Нм}) \quad (2.34)$$

Номінальні 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

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 314 (\text{В}) \quad (2.37)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 704 = 850 (\text{А}) \quad (2.38)$$

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

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

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.

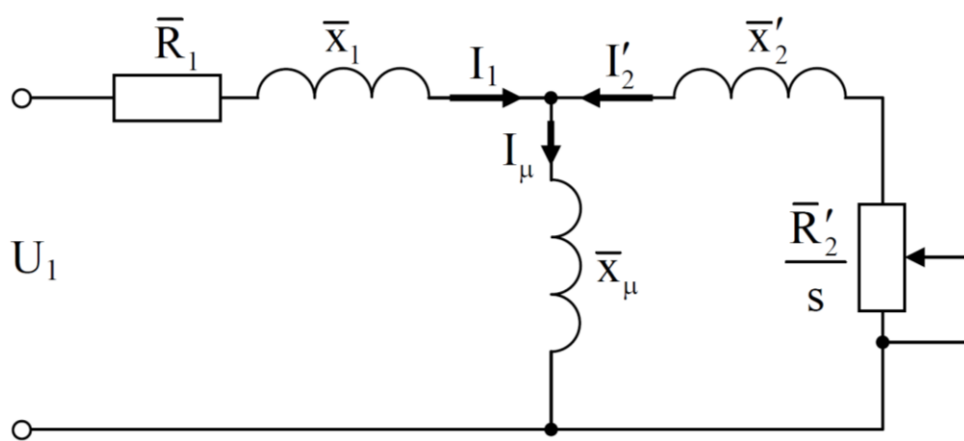


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення

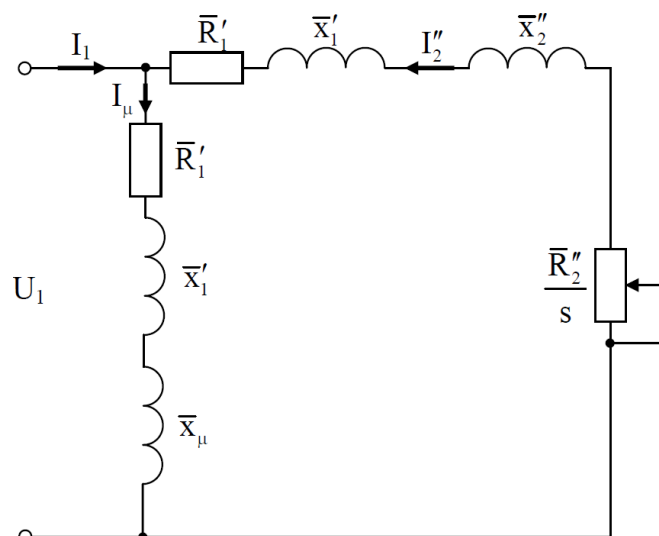


Рисунок 2.4 – Г-подібна схема заміщення

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

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

Індуктивності статора і ротора

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

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

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

$$a = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0,0039}{0,0055} = 0,7 \quad (2.53)$$

$$a = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,0055}{0,0055} = 1 \quad (2.54)$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0,0055 - \frac{0,0055^2}{0,0055} = 0,00025 \quad (2.55)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0,0055}{0,0055 \cdot 0,00025} = 4000 \quad (2.56)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha R L_m = \frac{0,0055}{0,00025} + 0,7 \cdot 4000 \cdot 0,0055 = 38 \quad (2.57)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна АМІ 500L6А зведені до табл. 3.5.

Таблиця 2.5 – Розраховані параметри двигуна АМІ 500L6А

Параметр	Значення	Параметр	Значення
P_{2n} , кВт	500	p_n	2
ω_{xx} , рад / с	157	R_1 , Ом	0,005
ω_n , рад / с	155,5	R_2 , Ом	0,004
M_n , Нм	3215	L_1 , Гн	0,0055
M_k , Нм	7073	L_2 , Гн	0,0055
λ	2,2	L_m , Гн	0,0055
I_{na} , А	850	α_1 , Ом / Гн	1
ψ_{1xx} , Вб	1	α , Ом / Гн	0,7
η	0,952	β , 1 / Гн	4000
$\cos(\varphi)$	0,92	γ , Ом / Гн	38
J_d , кг · м ²	9	σ , Гн	0,00025

Висновки до розділу 2

На основі технічних розрахунків для роботи системи було підібрано обладнання: асинхронний двигун АМІ 500L6А, редуктор КЦ2-500-71 та частотний перетворювач ACS6080-04-0820-6. Додатково визначено характеристики електродвигуна та параметри його Т-подібної схеми заміщення. Отримані результати стануть базою для подальшого моделювання системи в MATLAB Simulink.

3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОЇ СХЕМИ КОНВЕЙЕРА

3.1 Функціональна схема

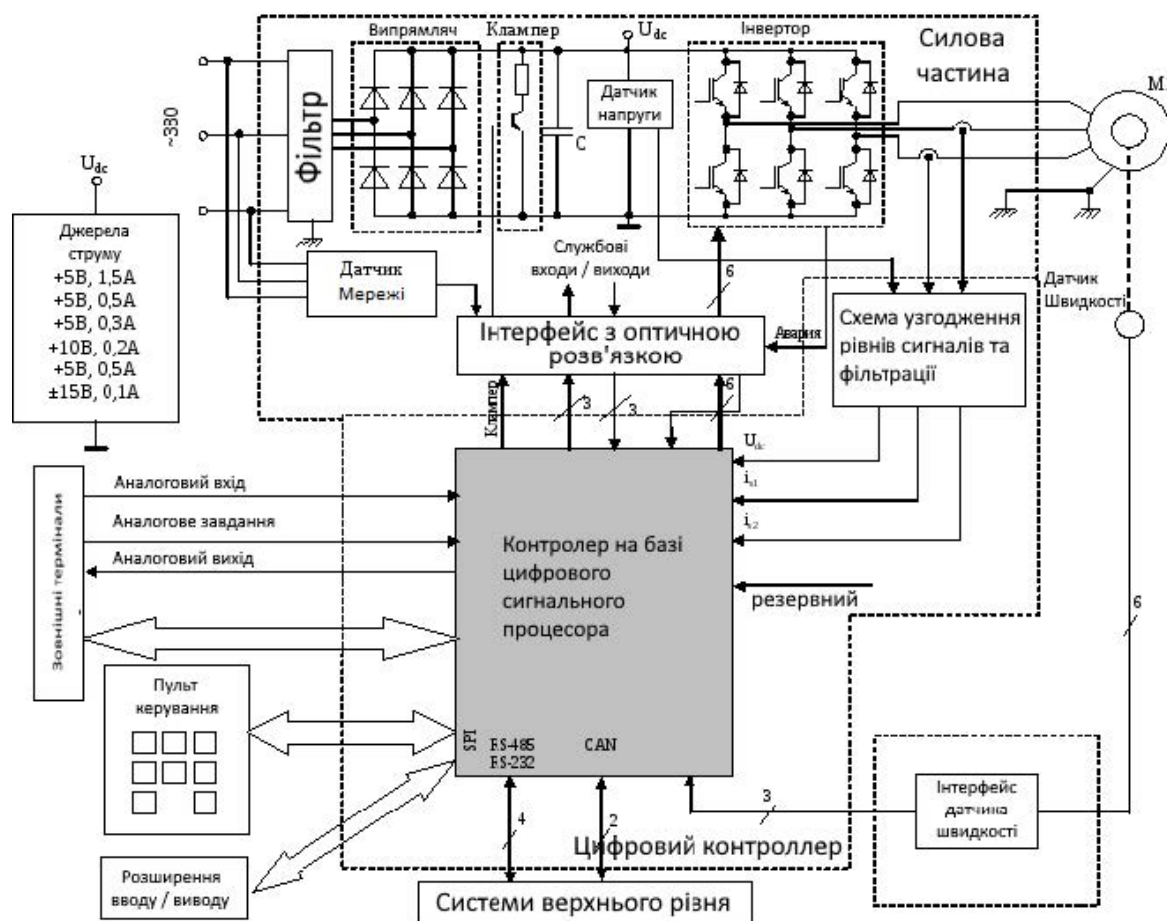


Рисунок 3.1 – Функціональна схема

Представлено схематичне зображення системи, що складається з класичної структури перетворювача частоти, до якого підключено асинхронний електродвигун та датчик кутової швидкості. Конструктивно перетворювач частоти містить дві основні складові: силову частину, яка безпосередньо взаємодіє з електродвигуном, та блок керування, що забезпечує формування необхідних керуючих сигналів.

Силова частина включає мережевий фільтр, випрямляч на діодному мості, ланку постійного струму з конденсатором C ,

ключем К і резистором R, клампер, датчик напруги ланки постійного струму та інвертор на силових IGBT транзисторах.

Секція керування включає комплекс функціональних елементів: блок живлення керуючих ланцюгів, схему адаптації та фільтрації сигналів, модуль інтерфейсу датчика швидкості, операторську панель, драйвери та оптророзв'язок для керування IGBT-транзисторами, а також DSP-контролер, що здійснює централізоване управління роботою частотного перетворювача. Кожен із цих компонентів взаємодіє у строго визначеній послідовності, забезпечуючи точне та надійне функціонування всієї системи.

Система складається з декількох взаємопов'язаних модулів, кожен з яких виконує визначені функції:

Силова частина включає:

Вхідний фільтр з подвійним призначенням: захист від перенапруг і придушення ВЧ-шумів, випрямний блок для конвертації змінної напруги у постійну, фільтруючі ємності з плавним зарядним контуром (резистор+реле), захисний клампер (800-1000В) для захисту від перенапруг, IGBT-інвертор з ШІМ-керуванням (2-16 кГц).

Система управління містить:

Схеми узгодження сигналів із вбудованою фільтрацією, інтерфейс датчика швидкості, DSP-контролер для реалізації векторних алгоритмів, драйвери з розв'язкою для керування IGBT.

Додаткові системи:

Імпульсний блок живлення ($\pm 15\text{В}$, $+5\text{В}$, $+24\text{В}$), модуль охолодження (радіатори+вентилятори), комунікаційні інтерфейси (RS-485, Ethernet, USB), розширена система захисту (реле, датчики)

3.2 Математична модель асинхронного двигуна

У стаціонарній системі координат математичне представлення АД через струми статора та потокозчеплення ротора записується наступним чином:

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

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

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

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

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

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

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, ν – 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 переходу від стаціонарної системи координат (a-b) до синхронної системи координат (d-q) використовується перетворення координат, яке забезпечує спрощення математичного опису та реалізацію алгоритмів векторного керування.

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

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

3.3 Алгоритм векторного керування

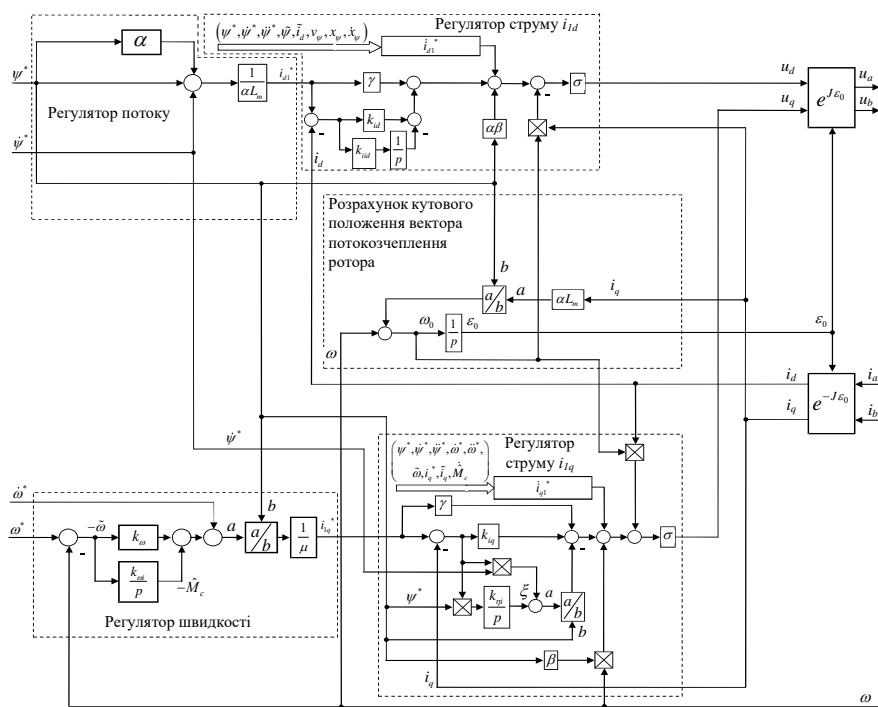


Рисунок 3.2 – Структурна схема непрямого векторного керування

Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування швидкістю, зображена на рисунку 3.2, складається з таких основних компонентів:

Регулятор потокозчеплення — формує сигнал, що відповідає бажаному значенню потокозчеплення ротора.

Регулятор швидкості — здійснює керування швидкістю обертання, генеруючи відповідний сигнал керування.

Блок обчислення кутового положення вектора потокозчеплення ротора визначає кутове положення на основі заданого значення потокозчеплення.

Регулятори струмів i_d , i_q : забезпечують регулювання струмів у синхронній системі координат, які впливають на динаміку та момент двигуна.

Блоки перетворення координат Парка-Горєва: виконують трансформацію струмів i_d і i_q у напруги u_a і u_b , що подаються безпосередньо на двигун.

Вхідні сигнали алгоритму керування: задане значення потокозчеплення, задана траєкторія швидкості та їх похідні;. Сигнали зворотних зв'язків включають струми i_a , i_b та кутову швидкість ротора двигуна. Вимір струмових параметрів здійснюється за допомогою прецизійних датчиків струму, встановлених мінімум у двох фазних лініях, що забезпечує повний контроль електромагнітних процесів. Для визначення кутової швидкості ротора застосовується або інкрементальний енкодер, що забезпечує високу точність дискретних вимірів, або аналоговий сенсор обертання, який надає безперервний сигнал про положення ротора. На виході алгоритму формуються керуючі напруги u_a та u_b , що подаються на двигун для реалізації заданих параметрів швидкості та потокозчеплення.

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

– розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

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

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

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

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ задане значення модуля вектору поточкозчеплення 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:

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

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

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:

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

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

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

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:

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

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

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 реалізації контурів регулювання швидкості та струмів у системі передбачено застосування ПІ-регулятора, що обґрунтовується його оптимальними динамічними характеристиками. Даний тип регулятора ефективно поєднує ключові переваги пропорційної та інтегральної складових: швидку реакцію на зміни керованих параметрів завдяки пропорційній дії та здатність повністю усувати статичну похибку регулювання за рахунок інтегральної складової. Такі властивості ПІ-регулятора роблять його оптимальним вибором для запропонованого алгоритму керування, забезпечуючи необхідну точність і швидкодію системи в різних режимах роботи. У системі непрямого векторного керування реалізовано підпорядковану структуру керування: зовнішній контур регулює швидкість, а внутрішній — струм. Згідно з принципами теорії автоматичного керування, зовнішній контур має бути в 2–3 рази повільніший внутрішнього, що забезпечує коректну роботу системи в динамічних режимах.

Зважаючи на обмеження, обумовлені швидкодією мікропроцесора ПЧ, для струмових регуляторів обрано коефіцієнт пропорційної складової $k_i = 700$. Водночас, для врахування впливу неточностей у механічних передачах, значення коефіцієнта пропорційного регулятора швидкості прийнято рівним $k=150$.

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 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 маємо

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

У підсумку маємо типові аналітичні залежності для коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових 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

Відповідно до вибраного принципу векторного керування асинхронним двигуном розроблено функціональну схему системи керування. Паралельно було здійснено детальний опис математичної моделі асинхронного двигуна у двофазній системі координат, що враховує всі ключові електромеханічні процеси. Отримані та виведені математичні залежності стануть основою для подальшого моделювання роботи системи у середовищі MATLAB Simulink, яке буде детально розглянуто в наступному розділі дослідження.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

4.1 Моделювання механізму для вивчення його статичних і динамічних характеристик.

У дослідженні роботи асинхронного двигуна застосовано алгоритм непрямого векторного керування, детально описаний у попередніх розділах. Для імітаційного аналізу в MATLAB Simulink (рис. 4.1-4.15) розроблено комплексну модель, яка інтегрує блоки формування заданих параметрів (швидкості обертання, величини потокозчеплення та навантажувального моменту) з функціональними модулями реалізації алгоритмів керування.

В структурі моделі передбачено три окремі модулі для встановлення заданих параметрів - швидкості обертання, величини потокозчеплення та навантажувального моменту (w reference, PSI reference, M_c). Додатково система включає блок реалізації алгоритмів регулювання (Control block), імітаційну модель асинхронної машини (Model IM (a-b)), а також спеціалізовані модулі для обчислення кута вектора потокозчеплення (Flux calculator) та перетворення між системами координат ($d-q \rightarrow a-b$ і $a-b \rightarrow d-q$).

Усі подальші моделі були реалізовані у середовищі MATLAB Simulink, що базується на отриманих математичних моделях окремих компонентів електромеханічної системи та вдосконалених алгоритмах керування. Використання інструментарію Simulink дало можливість ефективно інтегрувати математичні моделі окремих підсистем, забезпечуючи при цьому високу точність моделювання робочих процесів у різних режимах експлуатації. Отримані моделі дозволяють не лише аналізувати існуючі характеристики системи, але й оптимізувати параметри керування для досягнення підвищеної ефективності та надійності роботи конвеєра.

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

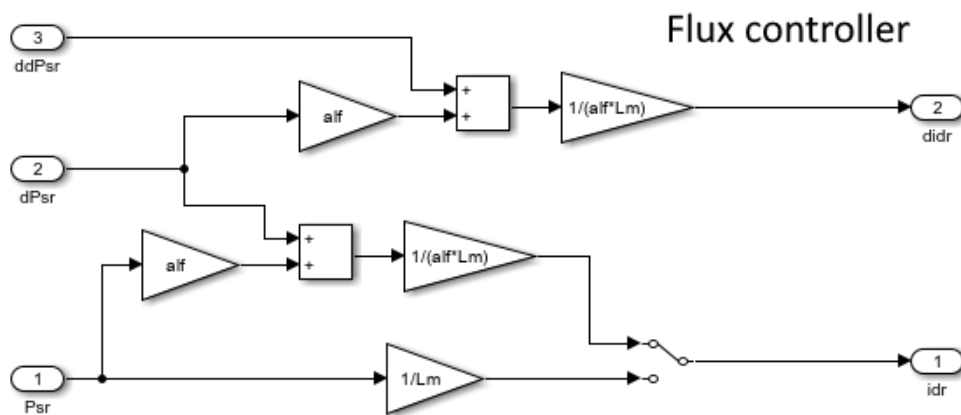


Рисунок 4.1 – Модель розімкнутого регулятора

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

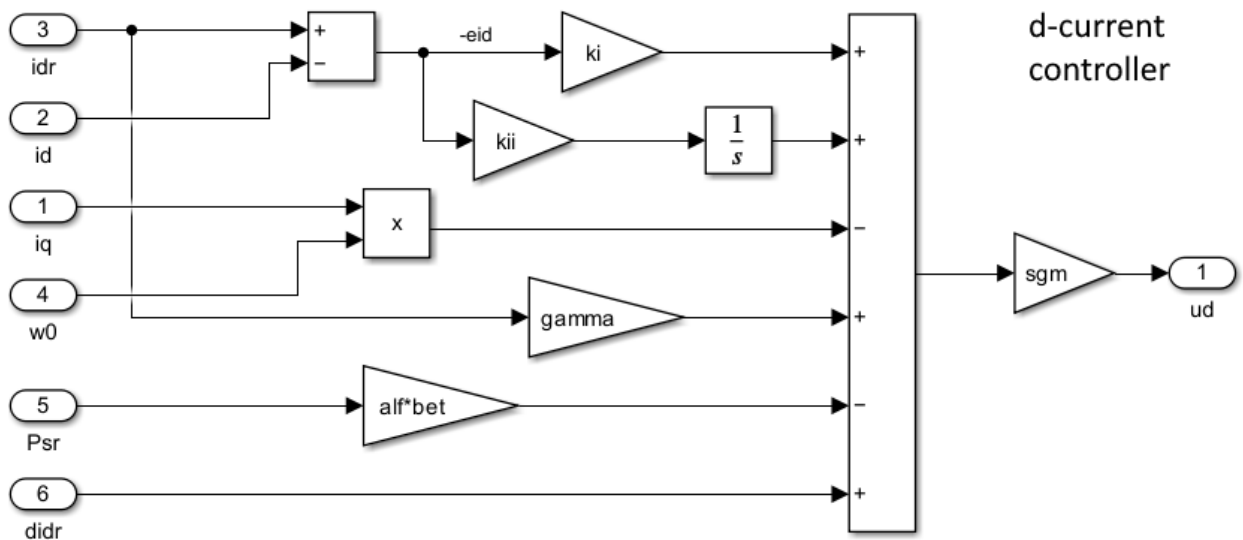


Рисунок 4.2 – Модель розімкненого регулятора по осі d

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

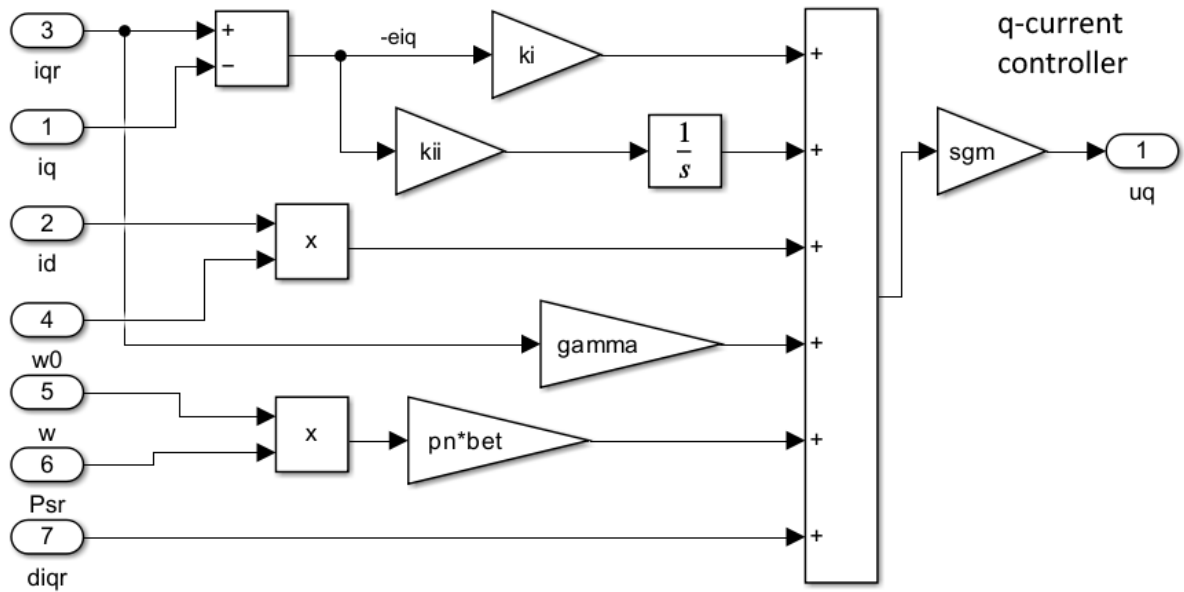


Рисунок 4.3 – Модель розімкненого регулятора по осі q

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

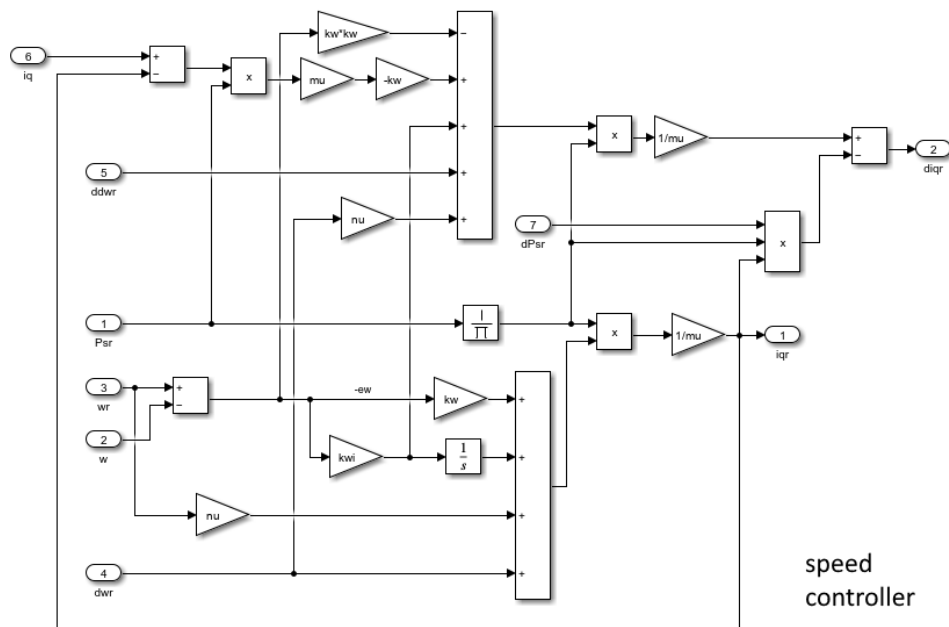


Рисунок 4.4 – Регулятор кутової швидкості

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

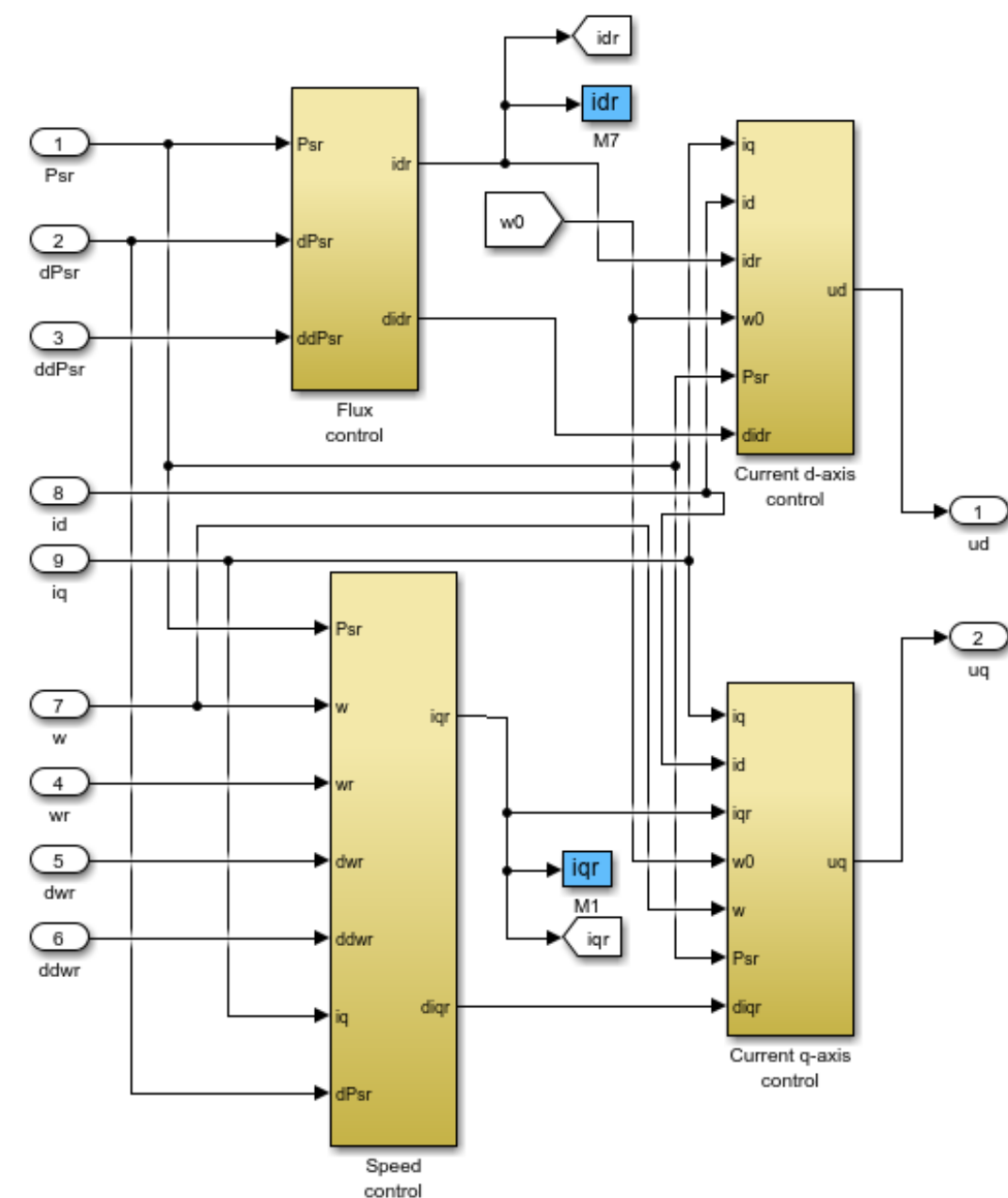


Рисунок 4.5 – Структура алгоритму непрямого векторного керування електродвигуном

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

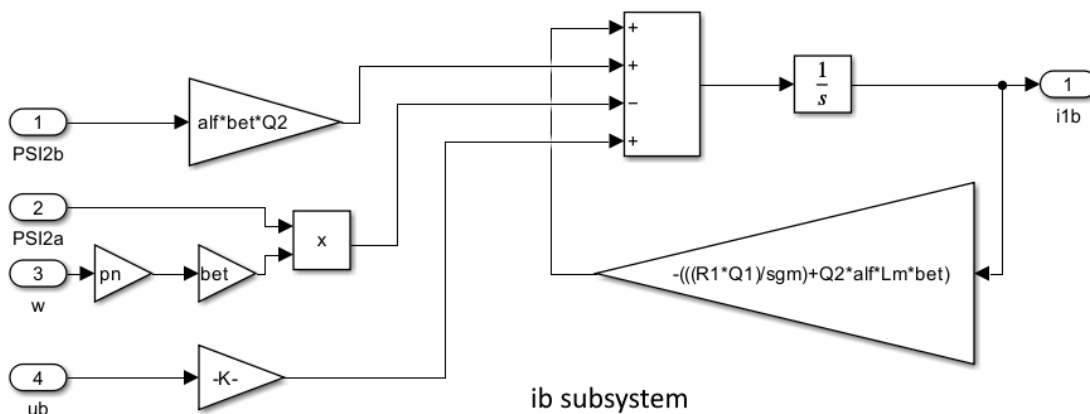


Рисунок 4.6 – Компонента струму статора в АД

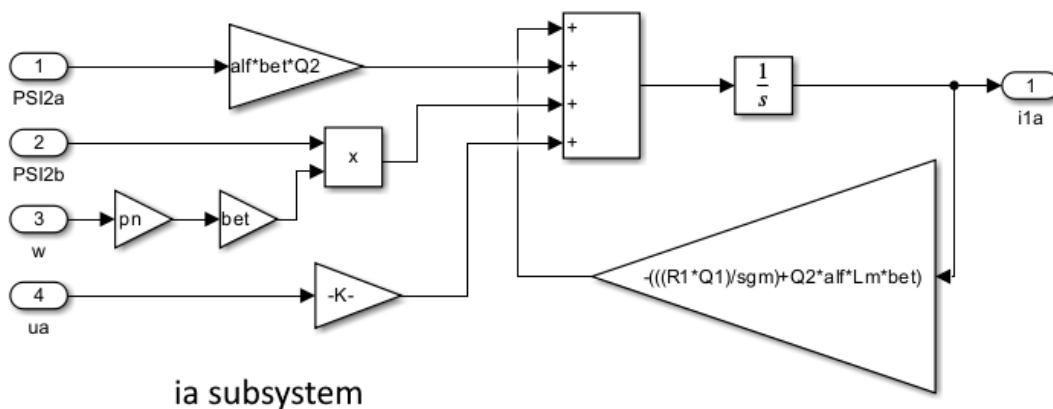


Рисунок 4.7 – Компонента струму статора в АД

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

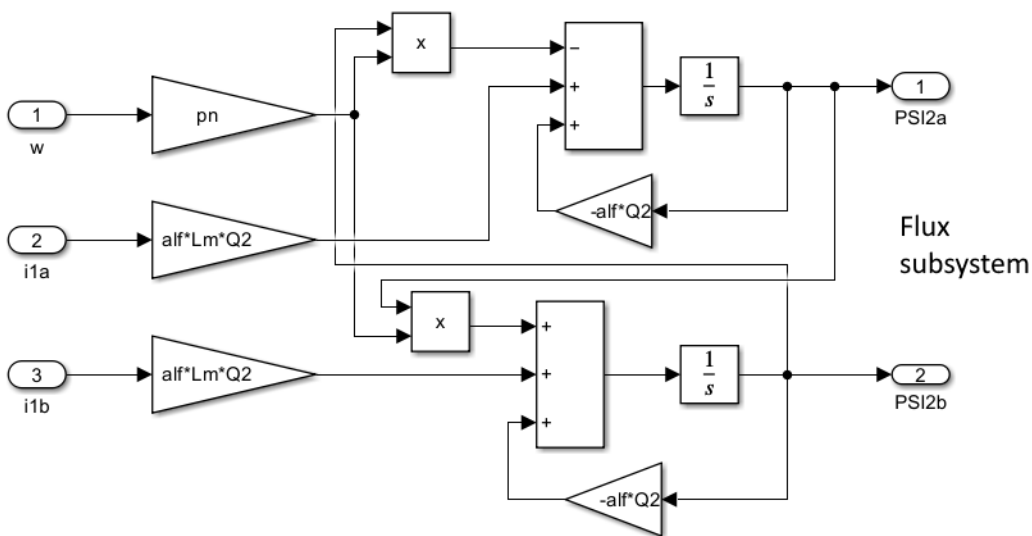


Рисунок 4.8 – Математична модель вектора потокозчеплення статора

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).

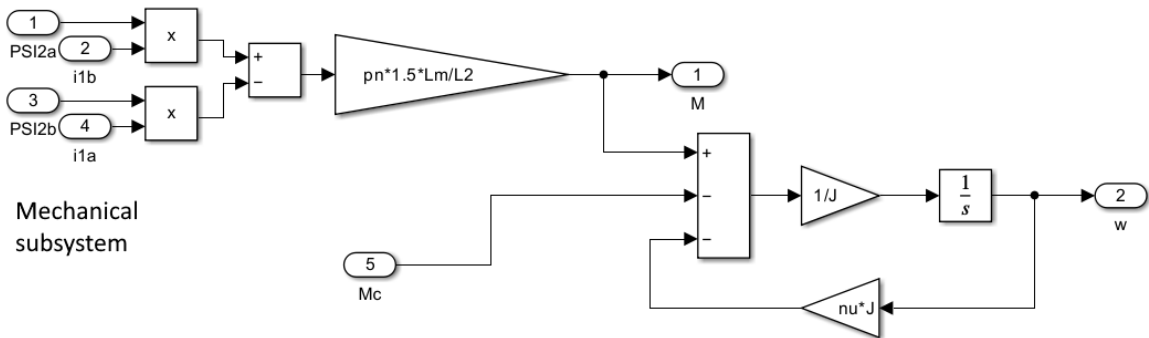


Рисунок 4.9 – Математична модель моменту на валу двигуна та кутової швидкості ротора

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

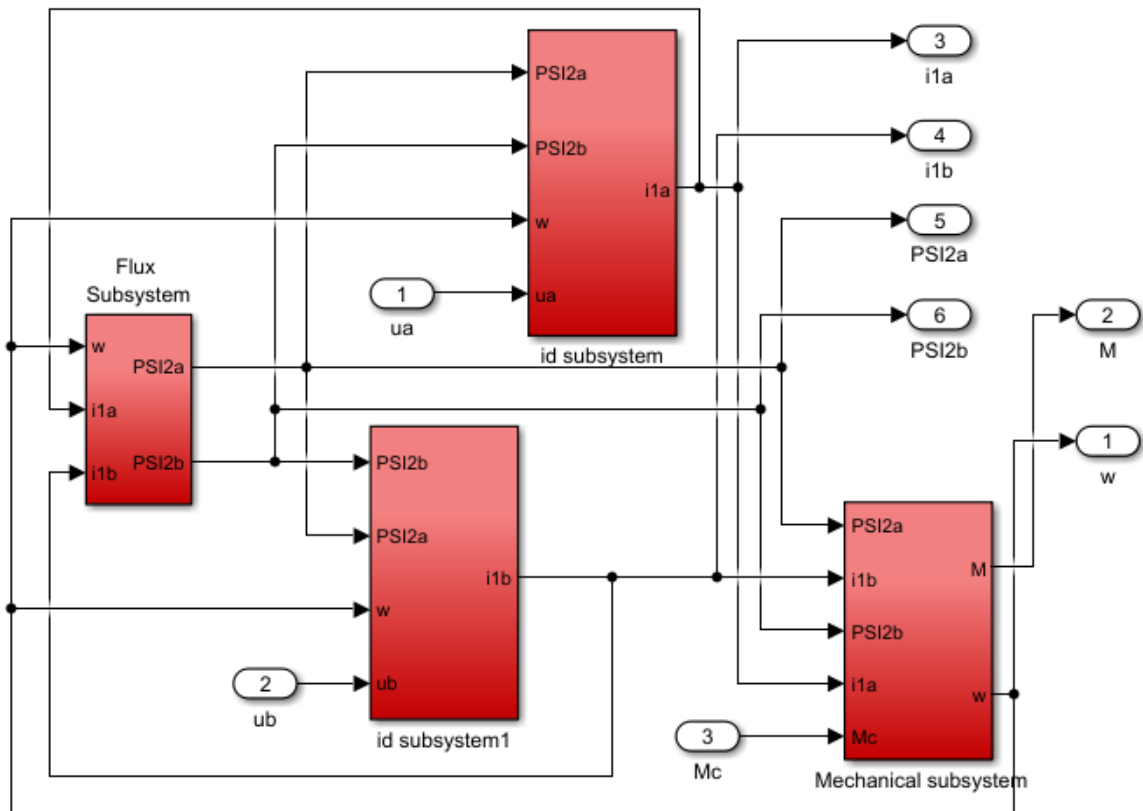


Рисунок 4.10 – Модель асинхронного електроприводу

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

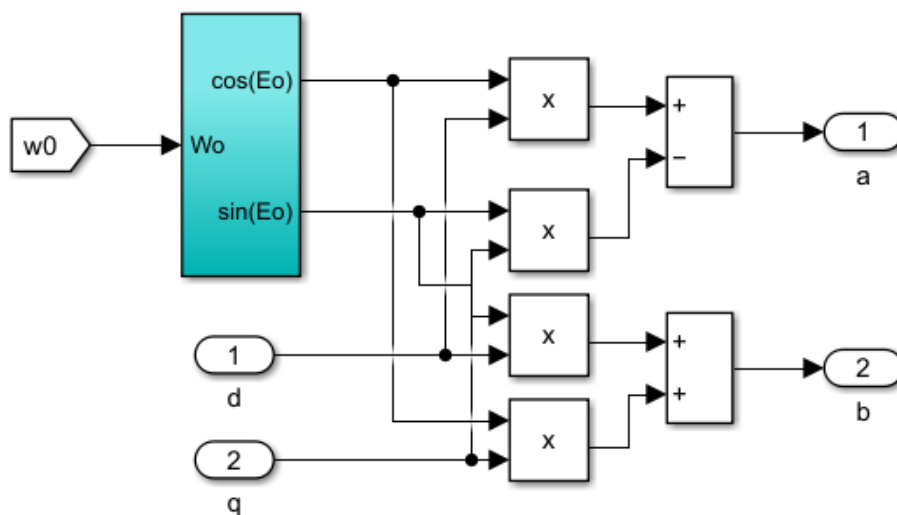


Рисунок 4.11 – Перетворення системи координат з (d-q) в (a-b)

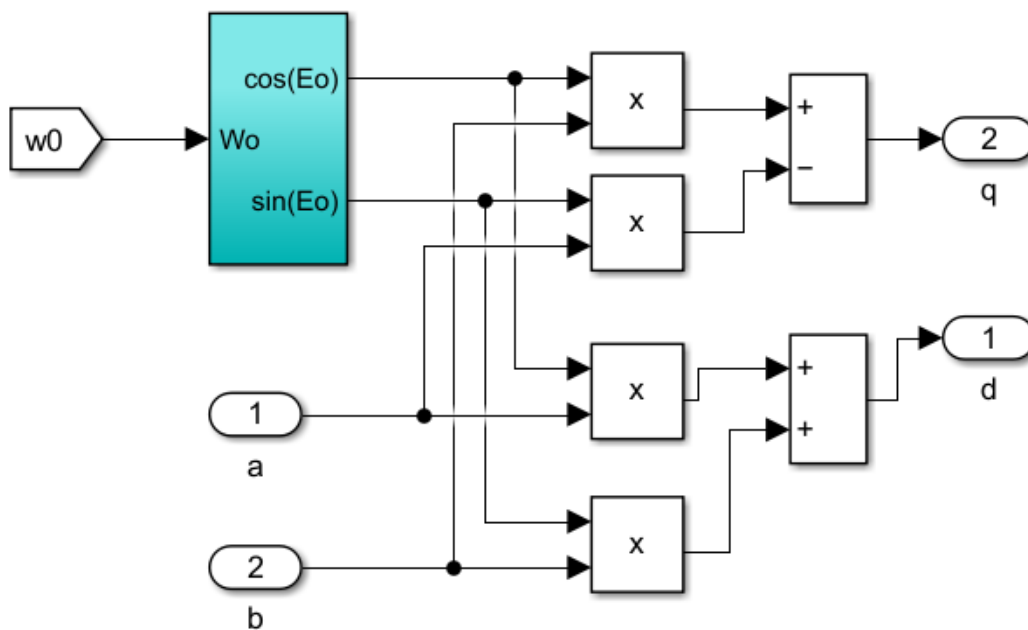


Рисунок 4.12 – Перетворення системи координат з (a-b) в (d-q)

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.

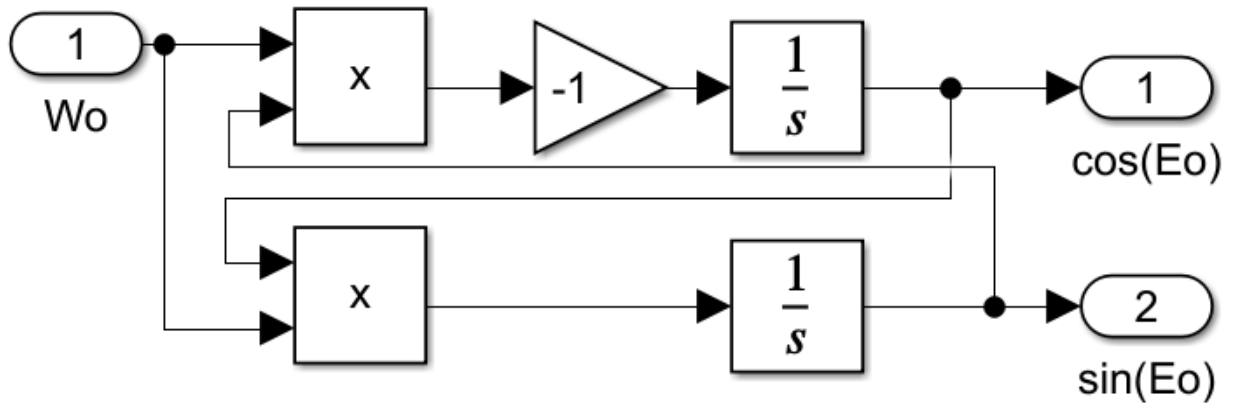


Рисунок 4.13 – Синусоїдний та косинусоїдний сигнали

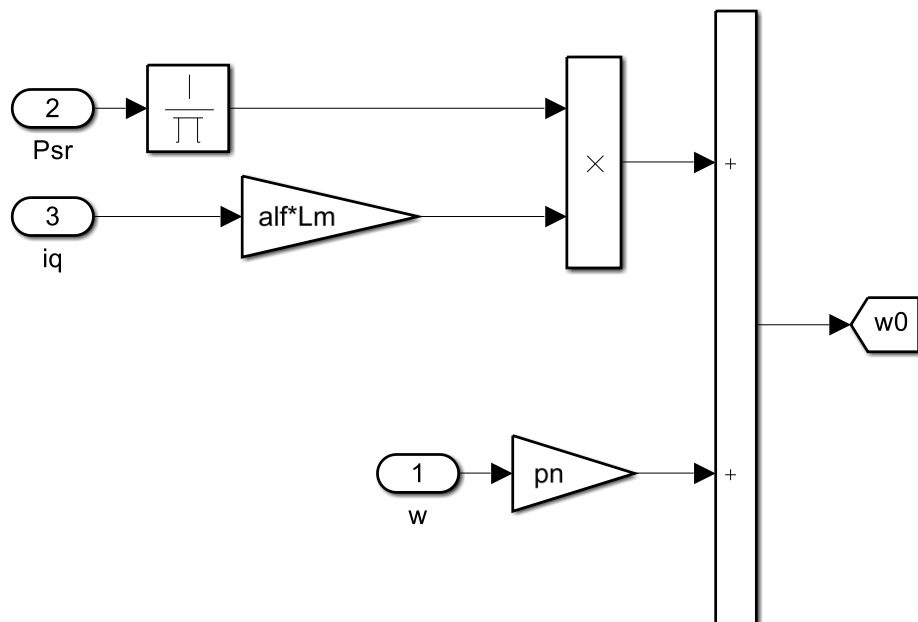


Рисунок 4.14 – Кутова швидкість вектора потокозчеплення

Оскільки всі складові моделі готові, ми можемо зібрати її та відобразити на загальному тлі, приховавши інші блоки за допомогою підсистем зображено на рис. 4.15.

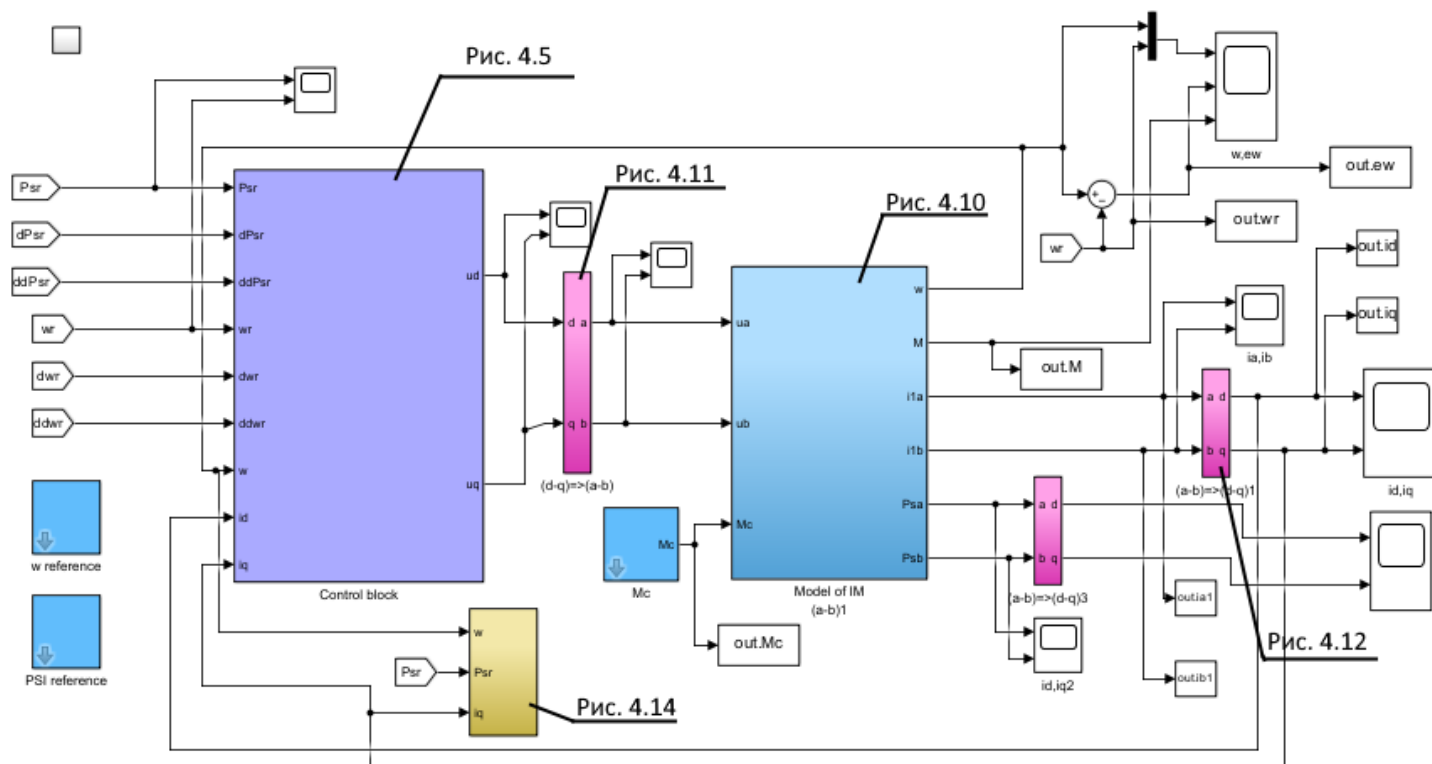


Рисунок 4.15 – Система керування рухом стрічкового конвеєру

Оптимальне потокозчеплення для частотного та векторного керування обчислюється за заданою формулою.

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

4.2 Програма досліджень

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

1. Аналіз перехідних процесів для основних параметрів у номінальному режимі ($M_c = M_n$)
2. Дослідження поведінки системи при різних навантаженнях: $M_c = 1,3M_n$
 $M_c = 0,7M_n$ $M_c = 0,5M_n$ $M_c = 0,2M_n$.
3. Візуалізація залежностей параметрів: активної і механічної потужності та втрат активної потужності від навантаження.
4. Систематизація результатів у табличній формі

Збудження відбувається за час 0,4 с з обмеженою другою похідною. Розгін двигуна розпочинається в момент часу 0,5 с за траєкторією другого порядку та триває протягом 0,75 с, що відповідає приблизно двократному динамічному моменту. Двигун розганяється до номінальної швидкості. На протязі 3 с двигун працює з постійною номінальною швидкістю. У момент часу 2 с до двигуна стрибкоподібно прикладається статичний момент навантаження, який знімається в момент 3 с.

4.3 Моделювання роботи двигуна в різних режимах та при змінюванні моменту навантаження

Дослідження системи у номінальному режимі роботи при навантаженні $M_c = M_n$. Результати представлені на рис. 4.16 та 4.17

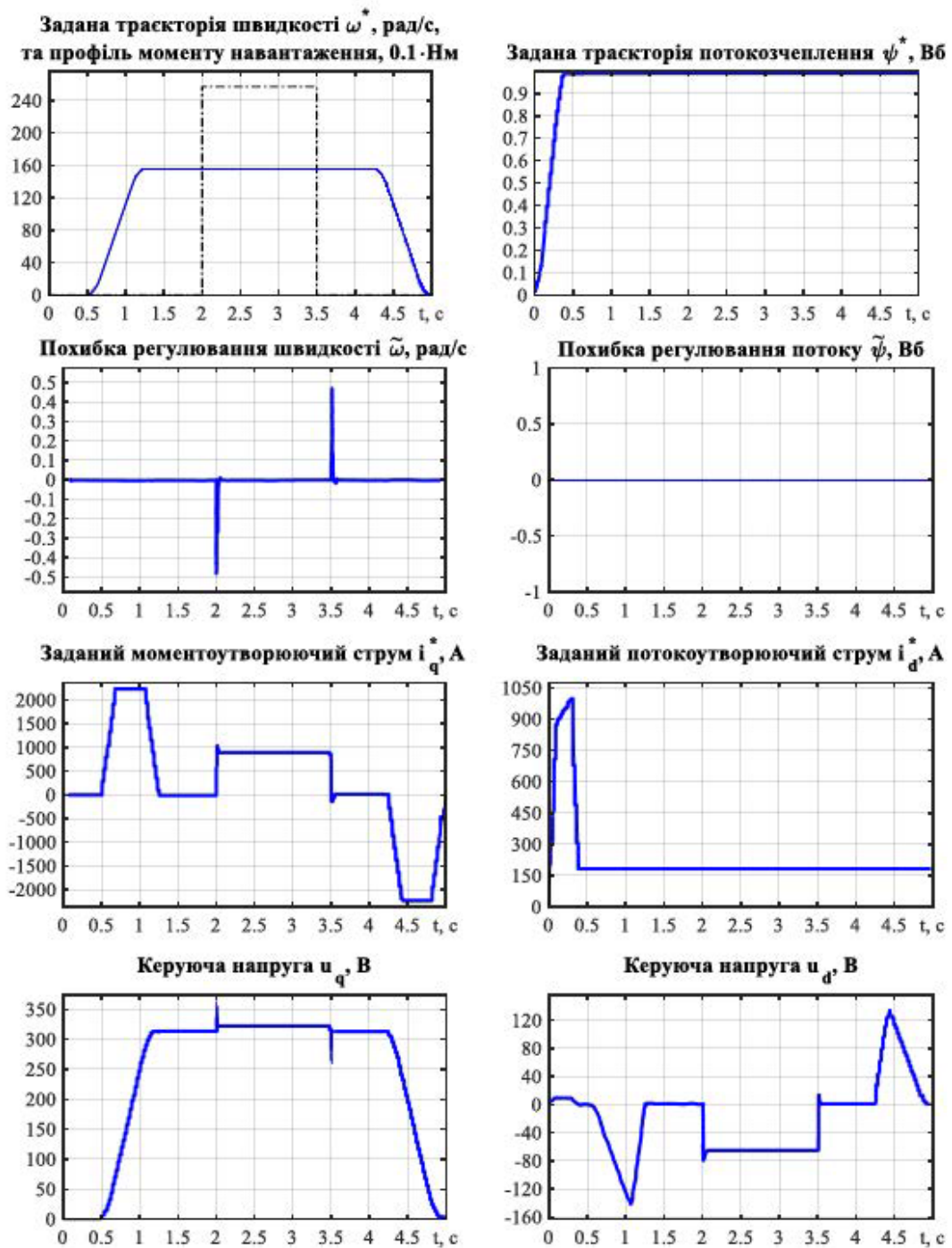


Рисунок 4.16 – Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням $M_c = M_H$

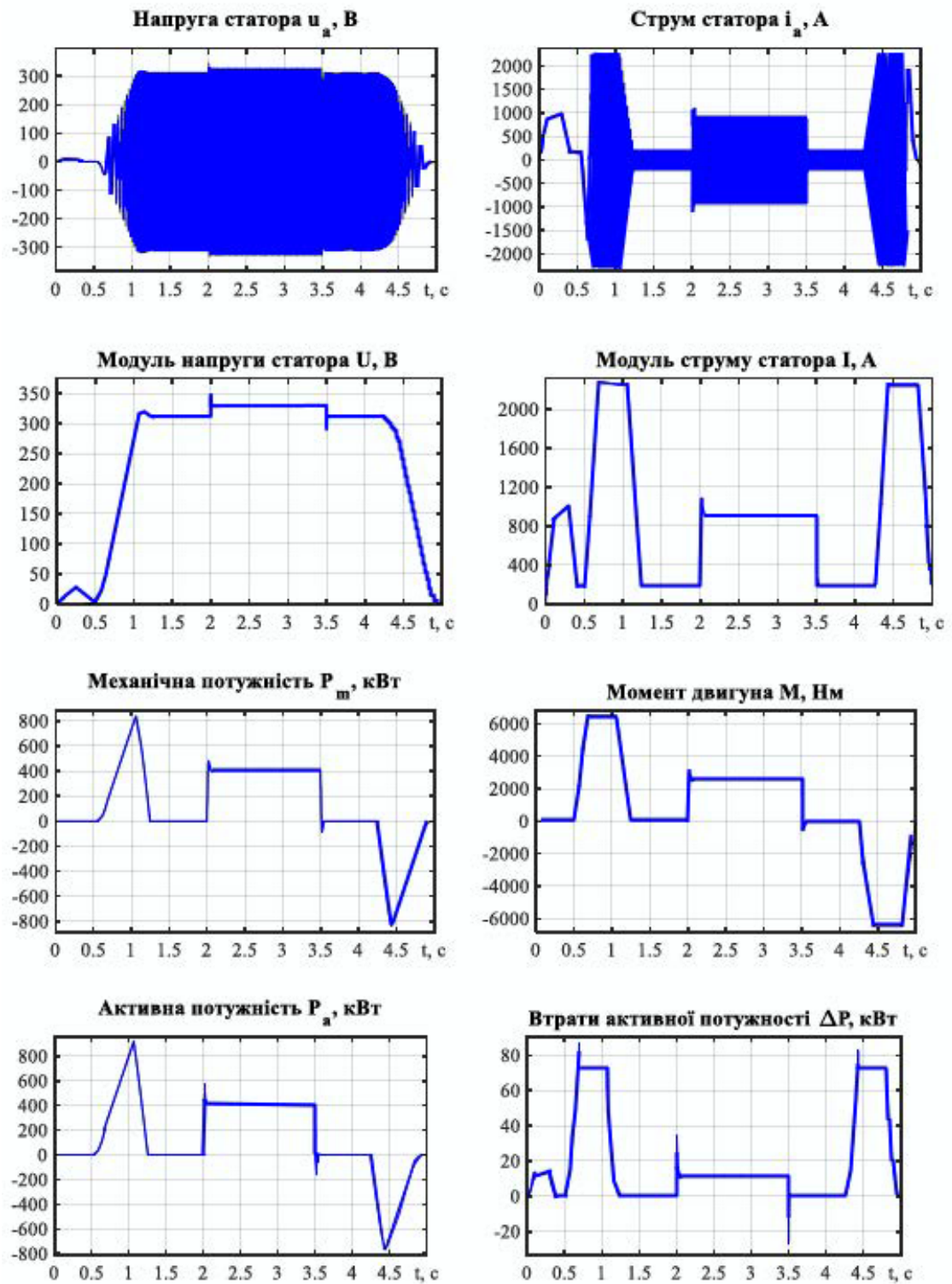


Рисунок 4.17 – Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням $M_c = M_n$

Аналіз графіків перехідних процесів похибки регулювання швидкості дозволяє зробити висновок, що в режимах розгону та гальмування похибки регулювання практично відсутні, що досягається завдяки ефективній компенсації першої та другої похідних заданої швидкості. Однак при різкій зміні навантаження, зокрема під час його накидання чи скидання, спостерігаються помітні динамічні похибки, що обумовлено відсутністю безпосереднього вимірювання моменту навантаження в системі. Наявність ПІ-регулятора в контурі керування гарантує повну відсутність статичних похибок у встановлених режимах роботи електроприводу незалежно від змін навантаження.

Графіки підтверджують високу ефективність системи векторного керування. Графік похибки регулювання потокозчеплення демонструє ідеальну точність із нульовим відхиленням, що свідчить про оптимальний підбір параметрів керування. Моментоутворююча складова струму i_q^* повністю відповідає формі графіка електромагнітного моменту, з чітко вираженими динамічними складовими під час розгону та гальмування. В режимі холостого ходу спостерігається повна відсутність струму i_q^* , що обумовлено ідеалізованою моделлю без врахування в'язкого тертя. Керуючі напруги u_d та u_q формуються з урахуванням необхідних динамічних характеристик, забезпечуючи оптимальну форму струмів по осях d та q . Фазні параметри, зокрема напруга та струм фази А, точно відображають реальні електромагнітні процеси в системі. Графік механічної потужності надає чітке уявлення про корисну потужність на валу двигуна та ефективність енергоперетворення в різних режимах роботи. Отримані результати свідчать про правильність обраної методики векторного керування, яка забезпечує високі точнісні показники у всіх режимах експлуатації. Відсутність похибок регулювання потокозчеплення підтверджує оптимальність параметрів системи та її здатність ефективно функціонувати при різних навантаженнях. Особливий інтерес представляє режим роботи при номінальному навантаженні - порівняння значень механічної та активної потужностей у цьому режимі дозволяє точно визначити номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна. Із графіку втрат активної потужності бачимо, що активні втрати прямо пропорційні моменту двигуна.

Проаналізуємо вплив зміни номінального моменту навантаження на динаміку електроприводу. Для цього побудуємо графіки перехідних процесів, які відобразатимуть: $0, 2 M_n, 0,5 M_n, 0,7 M_n$ та $1,3 M_n$ (рис. 4.18-4.25).

З отриманих графіків перехідних процесів демонструє чітку залежність між зростанням моменту навантаження та зміною ключових експлуатаційних параметрів системи. Зокрема, спостерігається закономірне збільшення похибки відпрацювання заданої швидкості, що є наслідком зміни навантажувальних характеристик. Паралельно фіксується зростання активних втрат потужності, яке безпосередньо впливає на показники як активної, так і механічної потужності, що підтверджує взаємозв'язок між енергетичними характеристиками системи та прикладеним навантаженням.

Графіки напруги та струму по осі а демонструють значення напруги і струму, що протікають у фазі А, і відповідають дійсним фізичним параметрам цих електричних величин.

Графік потужності дозволяє виявити такі закономірності роботи системи: графік механічної потужності відображає корисну потужність на валу двигуна, тоді як графік активної потужності показує споживання електроенергії від інвертора. При роботі в неномінальних режимах навантаження спостерігається суттєве погіршення енергетичної ефективності системи, що особливо яскраво проявляється при зниженні моменту навантаження. Хоча підвищення навантажувального моменту не викликає критичного зниження ККД, проте призводить до значного зростання споживаного струму, що створює додаткове навантаження на перетворювач частоти та може впливати на його експлуатаційні характеристики.

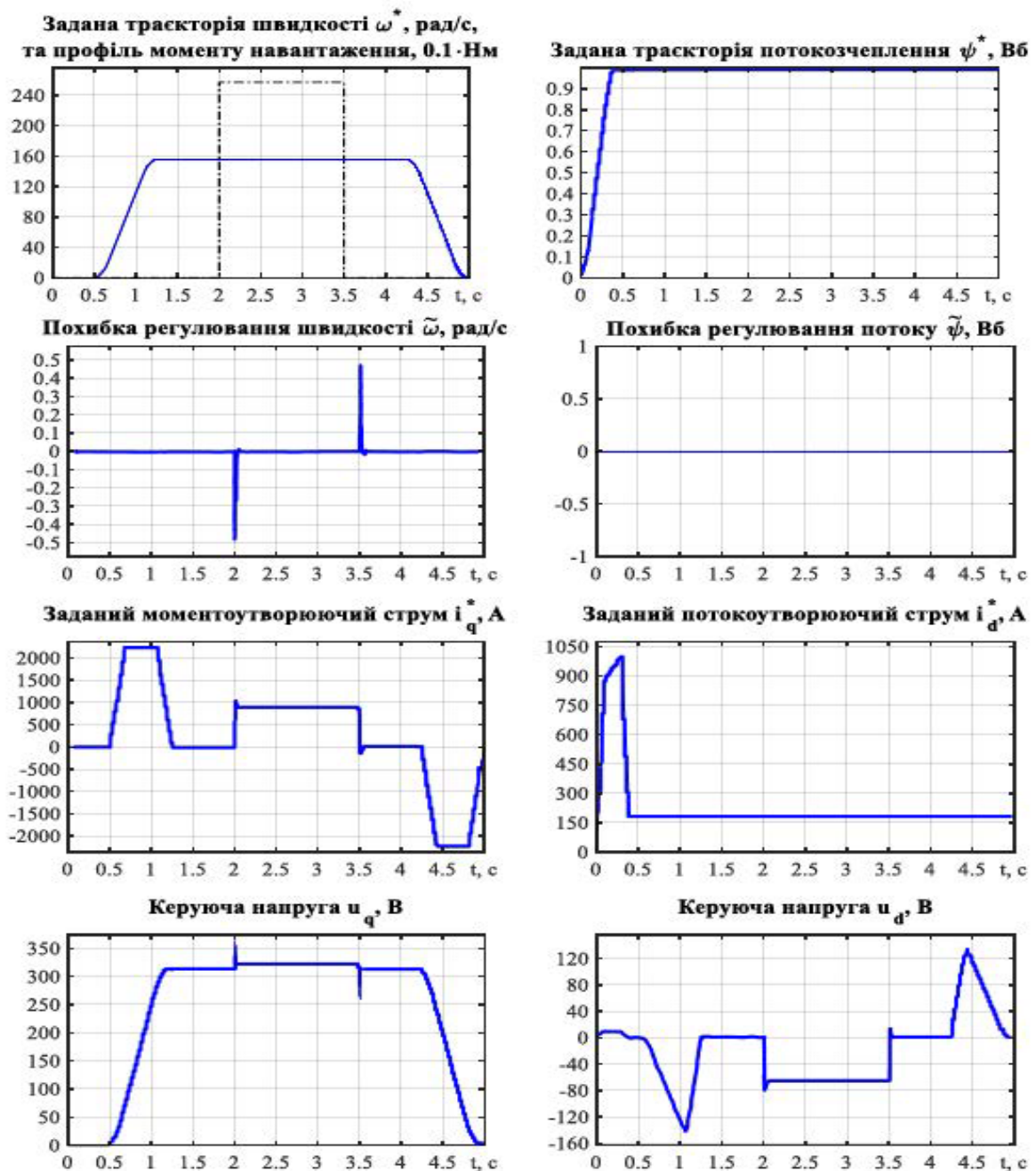


Рисунок 4.18 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 1.3M_H$

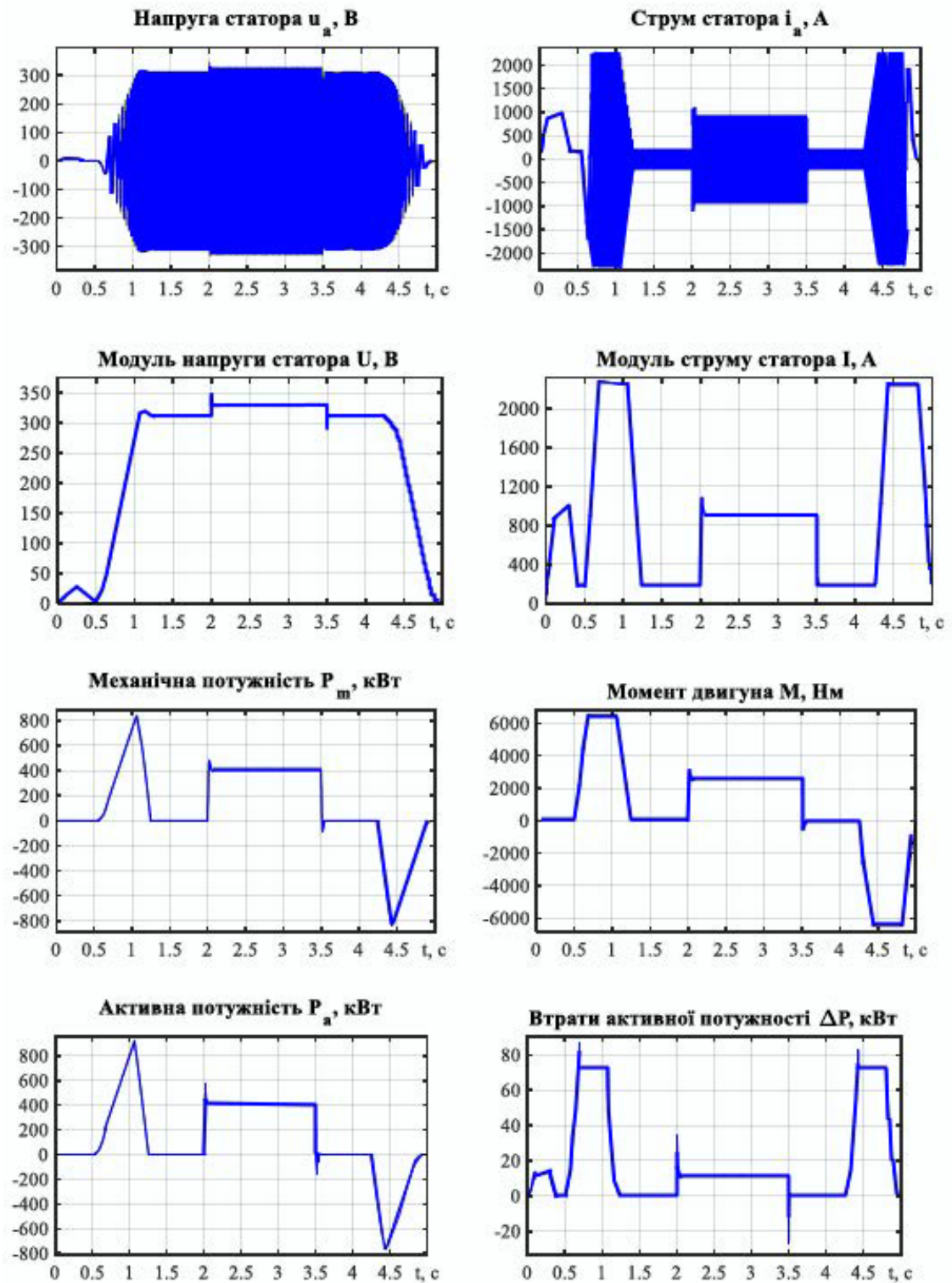


Рисунок 4.19 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 1.3M_n$

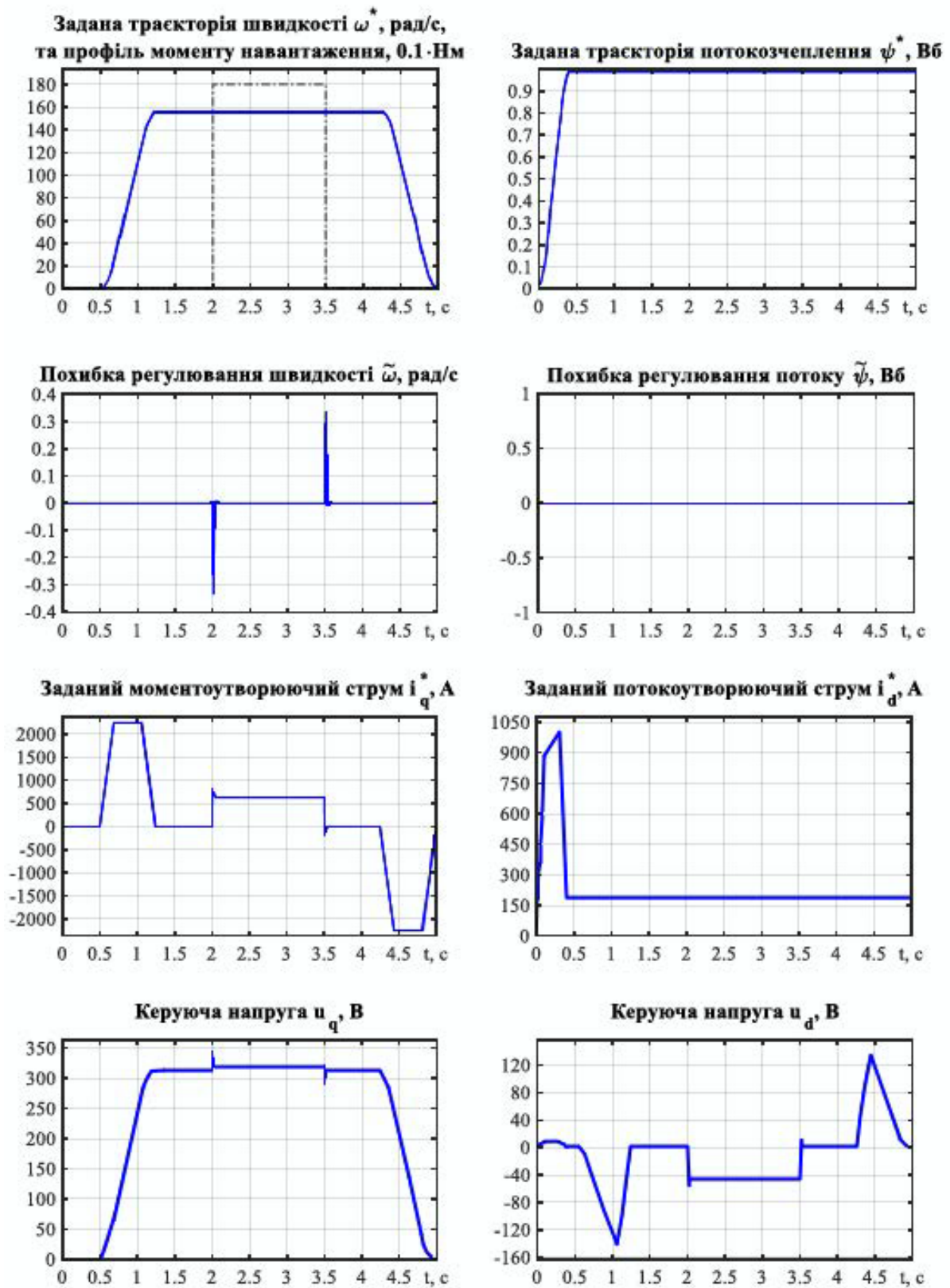


Рисунок 4.20 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.7M_H$

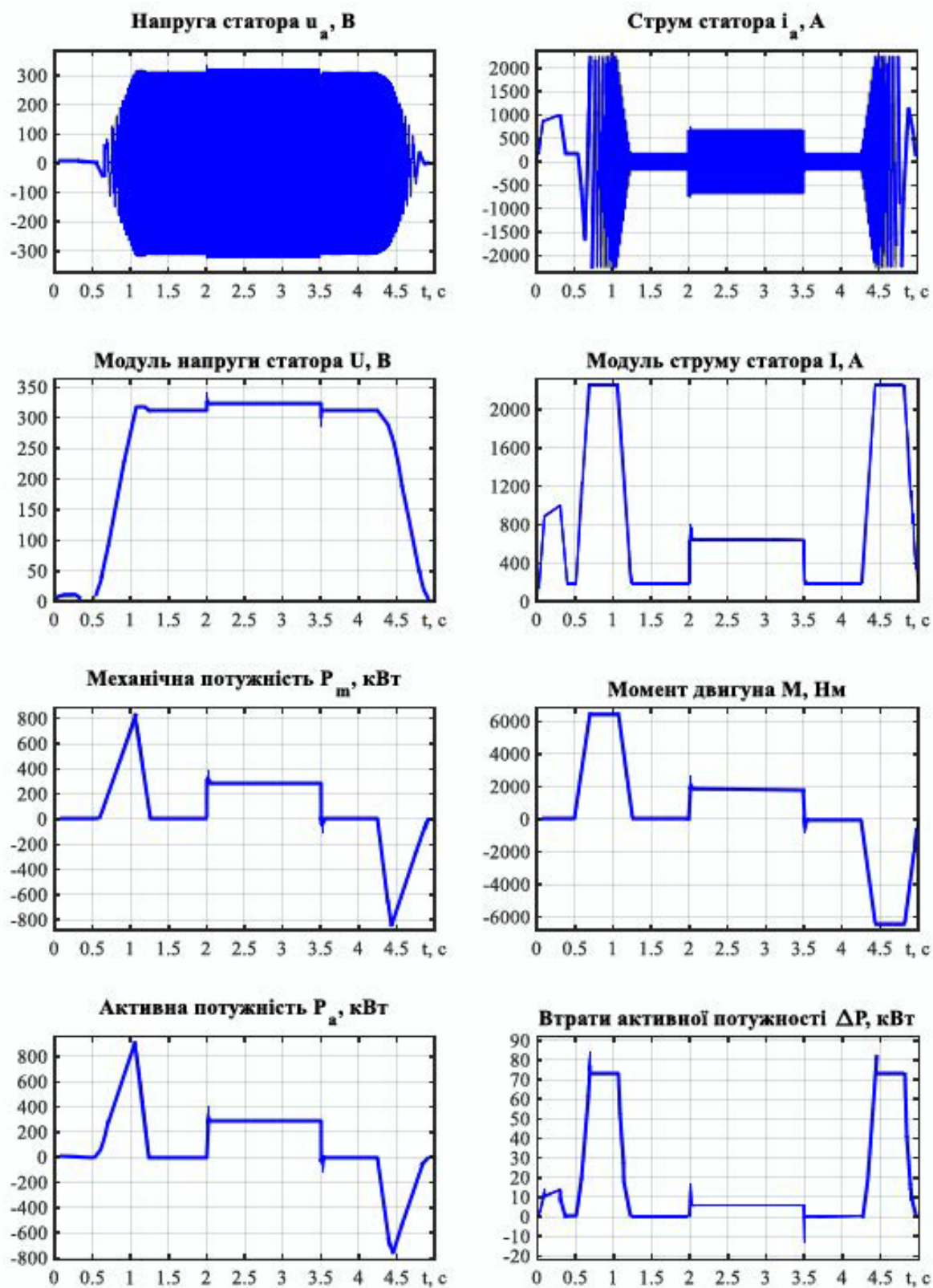


Рисунок 4.21 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.7M_n$

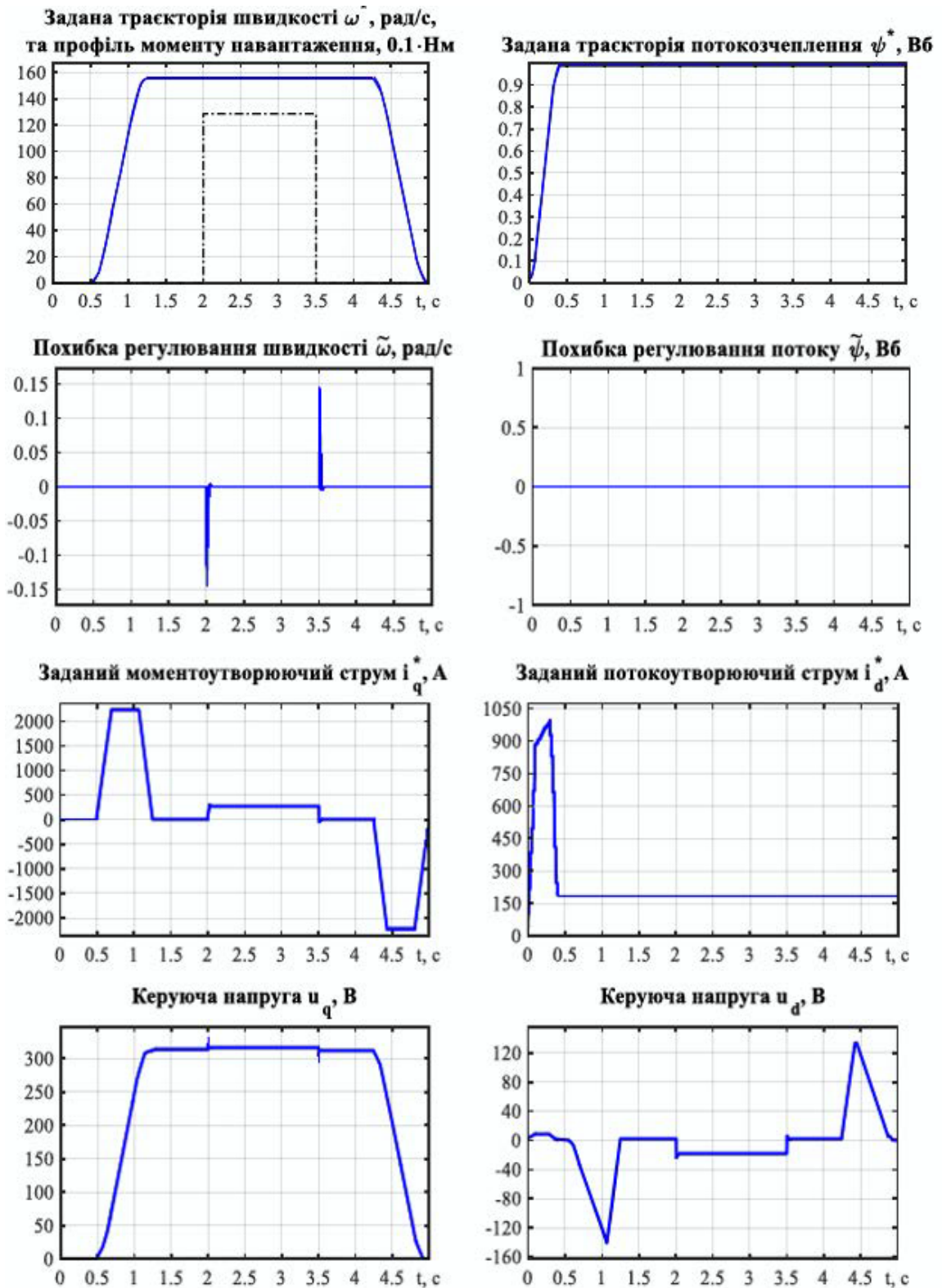


Рисунок 4.22 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.5M_n$

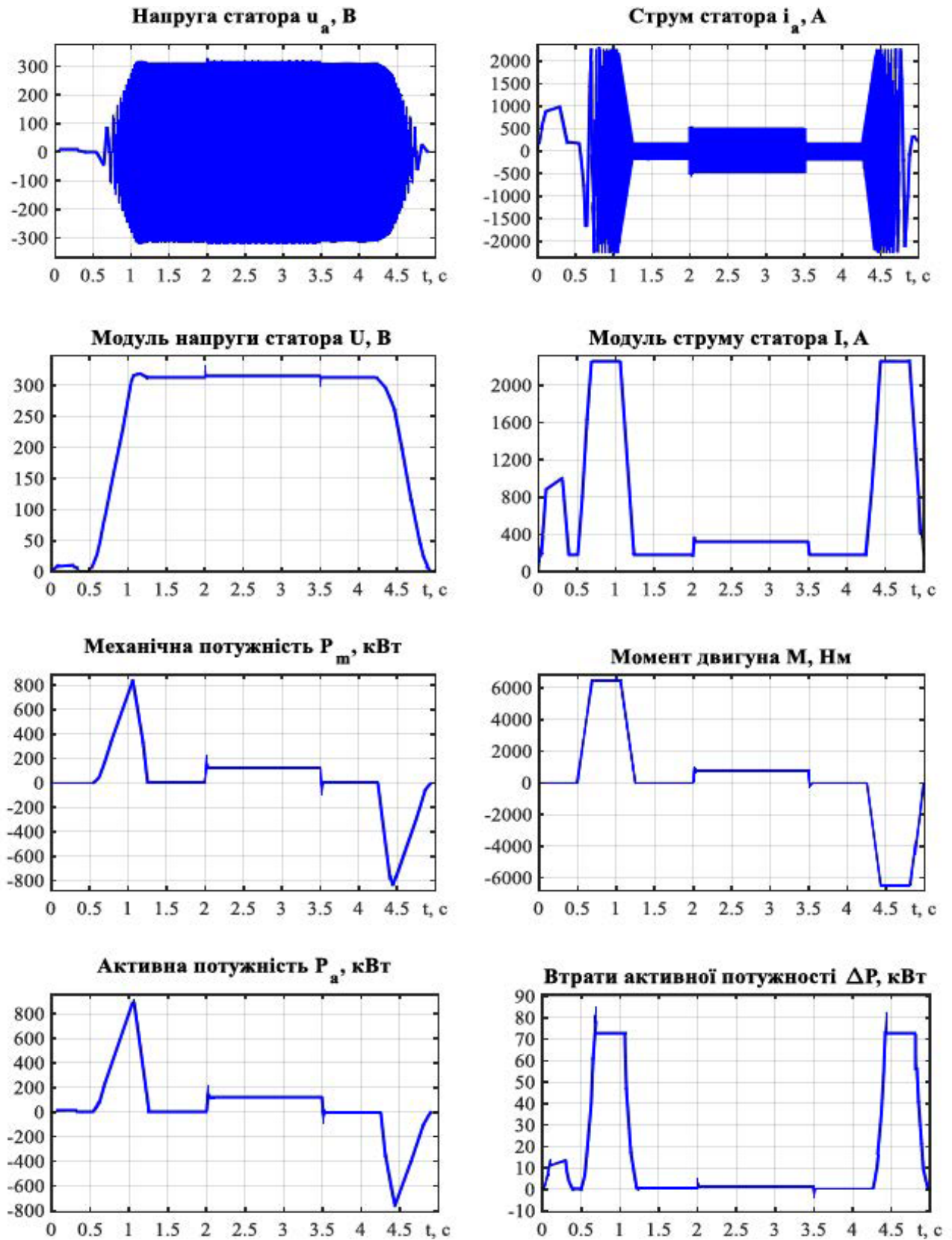


Рисунок 4.23 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.5M_n$

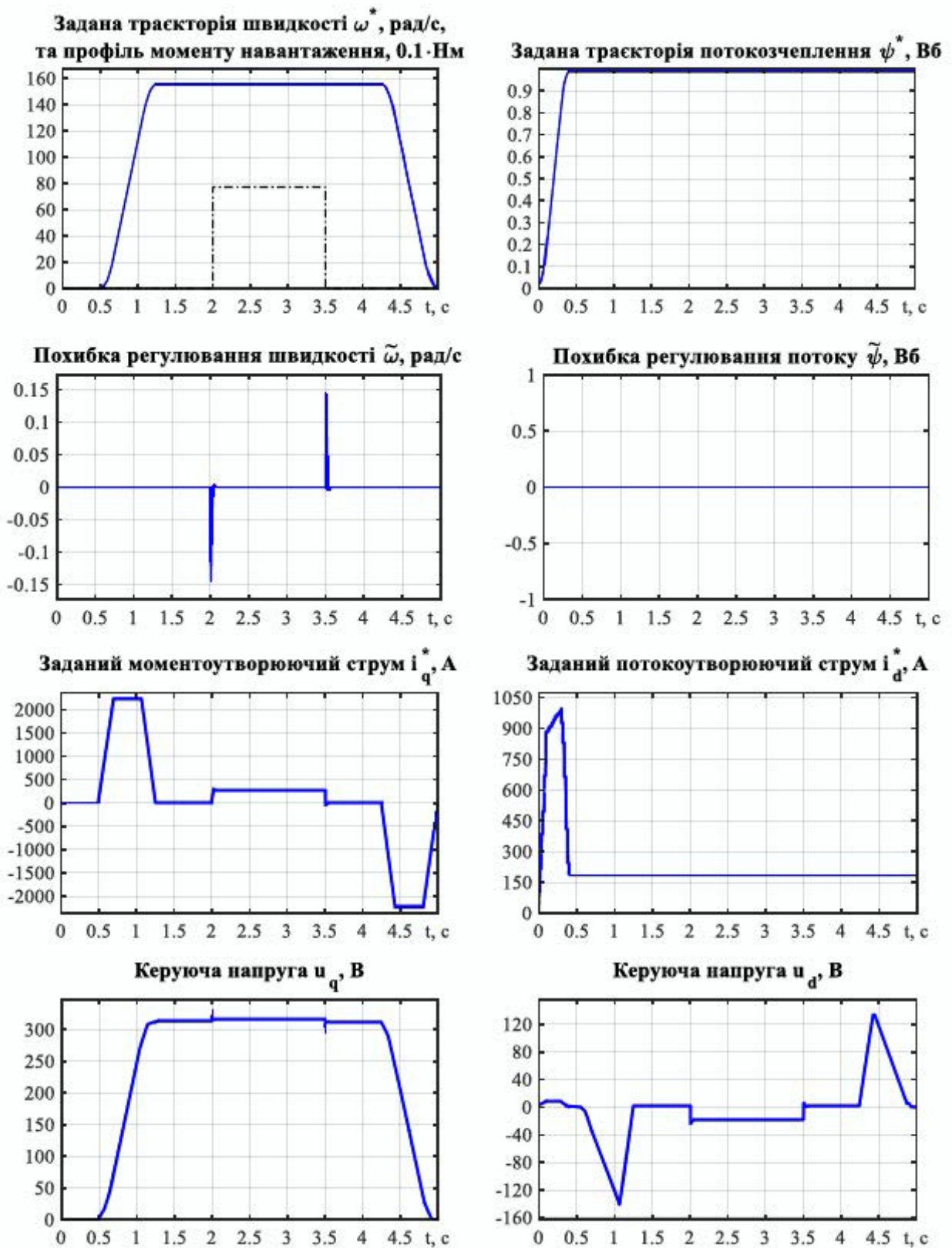


Рисунок 4.24 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.2M_n$

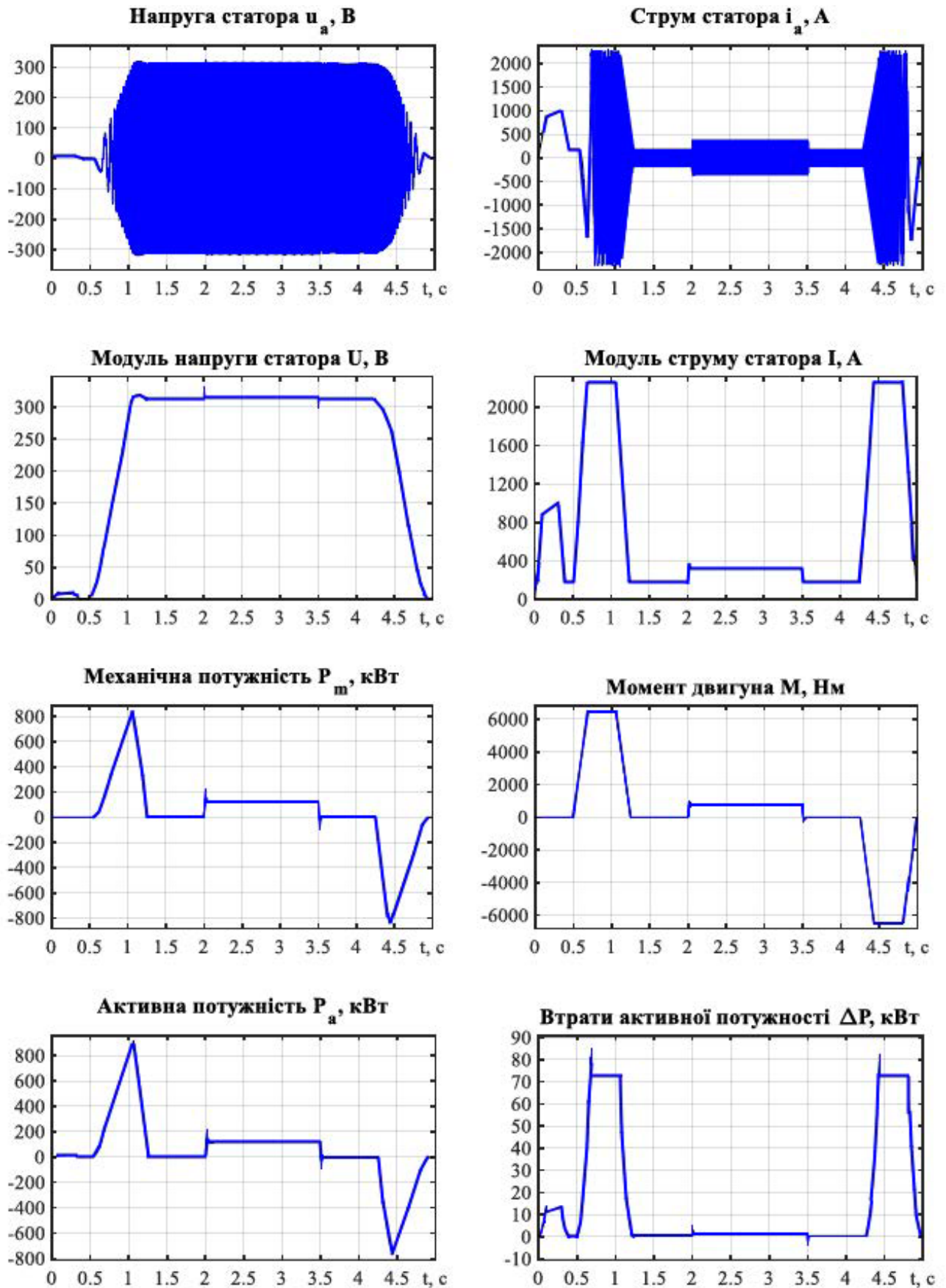


Рисунок 4.25 – Графіки перехідних процесів при номінальній швидкості та при моменті навантаження $M_c = 0.2M_n$

Загальні результати досліджень надані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна таблиця для статичних характеристик

Mc	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
ω (рад/с)	0,02	0,035	0,05	0,065	0,08	0,095	0,105	0,115	0,125	0,13	0,135	0,14
Pa (кВт)	150	190	230	270	310	350	390	430	470	490	510	525
Pm (кВт)	145	180	215	250	285	320	355	390	425	455	480	500
ΔP (кВт)	1,3	2,4	3,8	5,3	7	9	11,2	13,5	16	17,5	18,8	19

Проведемо побудову статичних характеристик, що відображають залежність похибки швидкості, активної потужності, механічної потужності, втрат активної потужності від моменту навантаження (рис. 4.26-4.29).

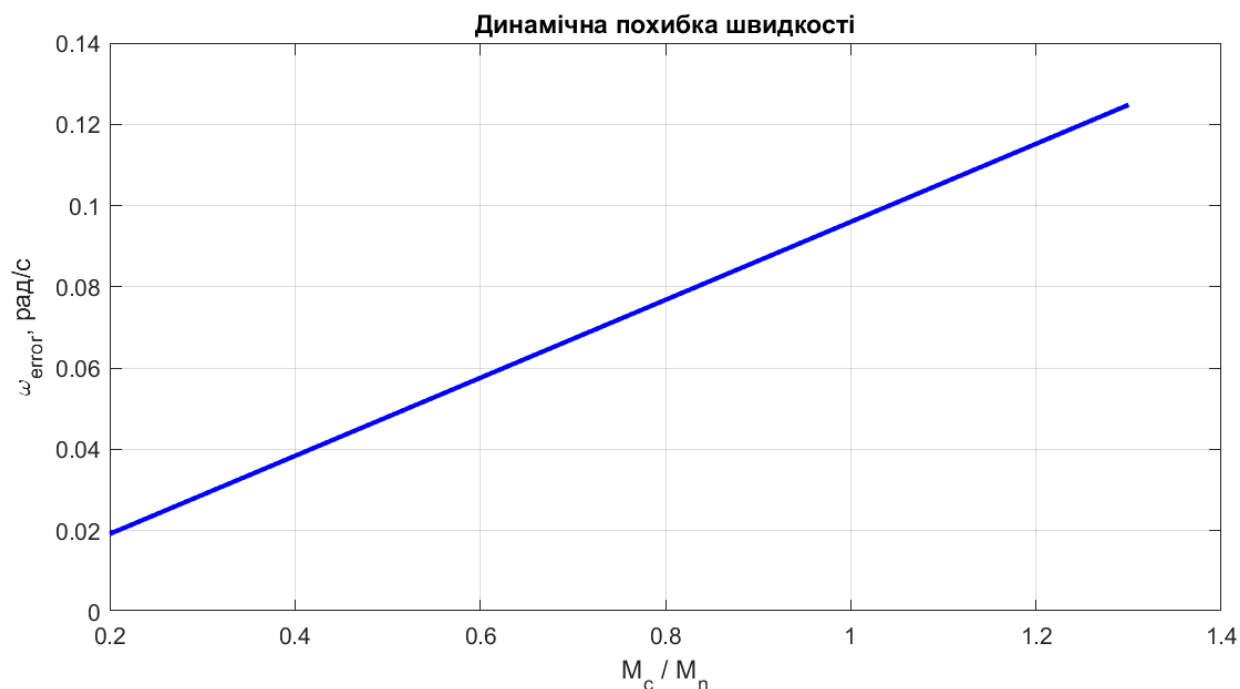


Рисунок 4.26 – Статична залежність динамічної похибки відпрацювання динамічної похибки швидкості від моменту навантаження

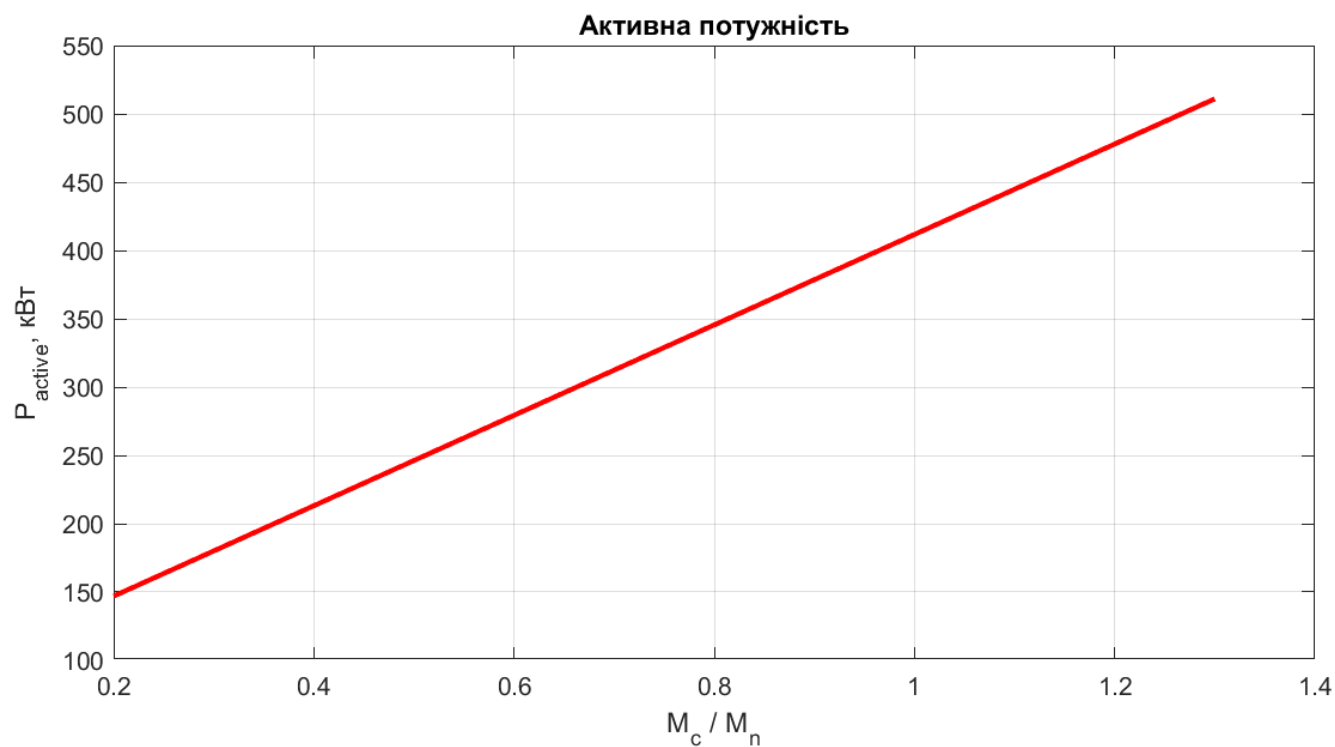


Рисунок 4.27 – Статична залежність активної потужності від моменту

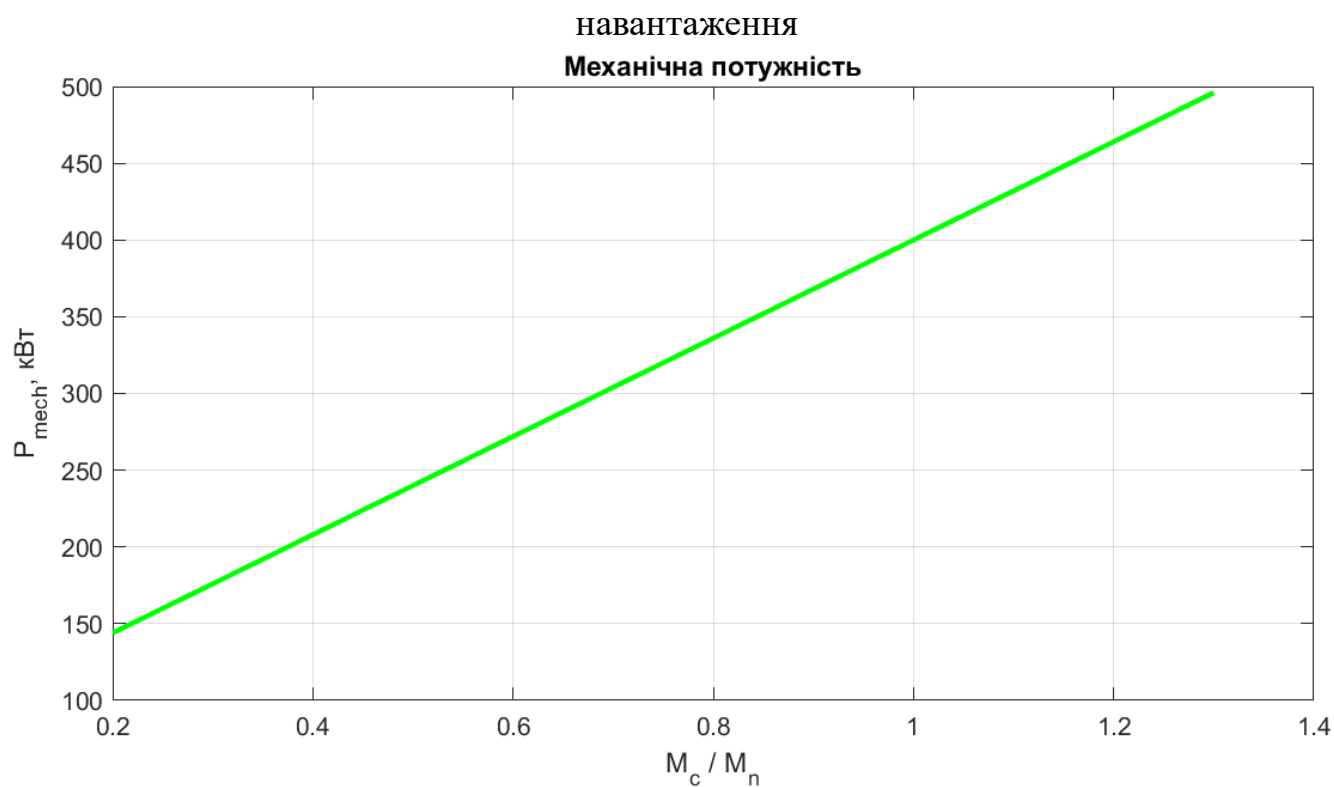


Рисунок 4.28 – Статична залежність механічної потужності від моменту

навантаження

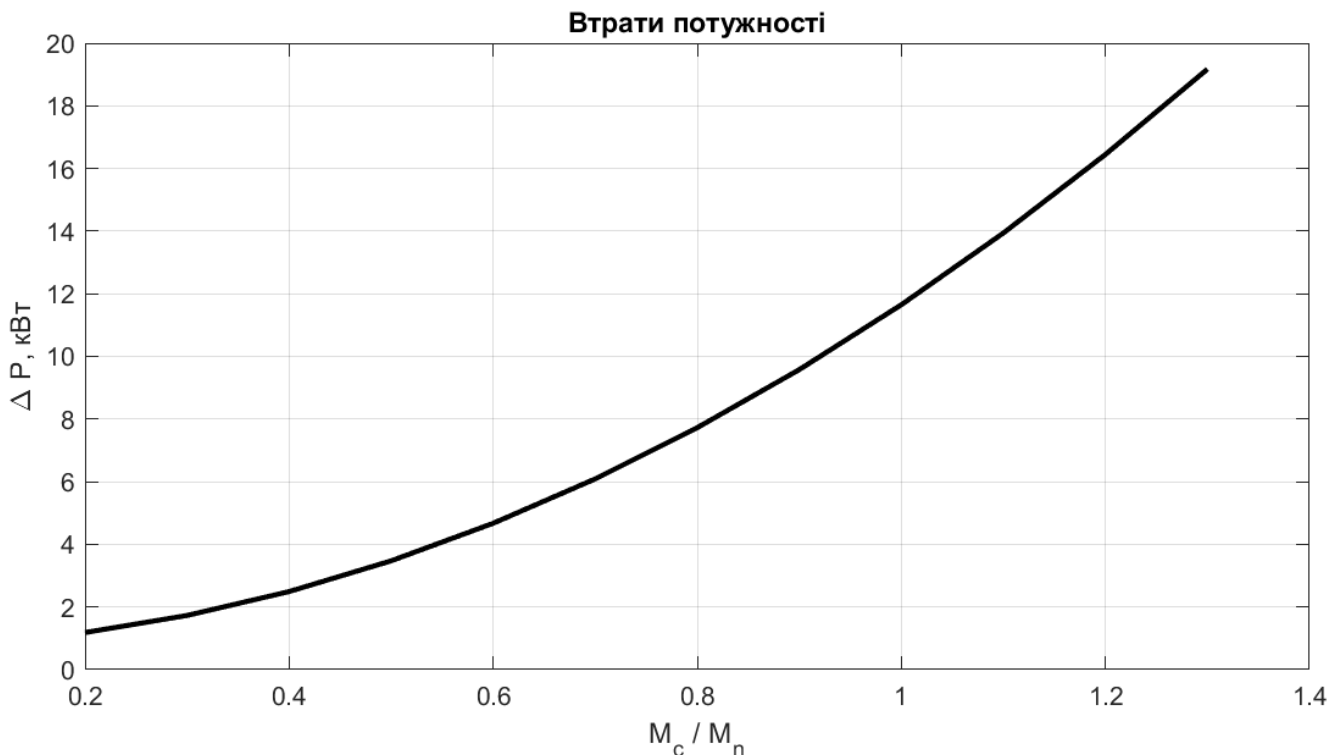


Рисунок 4.29 – Статична залежність активних втрат потужності від моменту навантаження

За даними таблиці 4.1 та графічними залежностями (рис. 4.10–4.19) встановлено, що зростання навантажувального моменту від $0,2M_n$ до $1,2M_n$ призводить до збільшення динамічної похибки регулювання швидкості з $0,02$ рад/с до $0,14$ рад/с ($0,6\%$ від номінального значення ω_n). Характерно, що перехідний процес стабілізації не перевищує 1 секунди, що практично не впливає на якість роботи стрічкового транспортера. Виникнення цієї похибки обумовлене принциповою особливістю системи керування - відсутністю інформації про зовнішнє навантажувальне збурення в реальному часі. Для її мінімізації пропонується корекція параметрів ПІ-регулятора. Отримані результати демонструють адекватність математичної моделі реальним процесам і вказують на потенційні шляхи підвищення точності керування без суттєвої зміни структури електроприводу.

Аналіз графіка статичної характеристики активних втрат потужності демонструє чітку квадратичну залежність від рівня навантаження, що суттєво відрізняється від лінійної. Спостерігається прогресуюче зростання втрат від 1,3 кВт при навантаженні ($M_c = 0,2M_n$) до 19 кВт при 130% навантаженні ($M_c = 1,3M_n$), що становить приблизно 4% від номінальної потужності двигуна. Такі показники повністю відповідають технологічним вимогам до роботи системи. Фізична природа цього феномену обумовлена закономірностями Джоулевих втрат, які зростають пропорційно квадрату величини струму. Така закономірність пояснює різке збільшення активних втрат при зростанні навантаження за межі номінальних значень, що є характерним для електромеханічних систем з асинхронним приводом.

Різноманітні характеристики електроприводу були стабільними при зміні навантажувального режиму. Ця особливість обумовлена застосуванням векторного керування, яке забезпечує асимптотичне полеорієнтування, в результаті чого підсистеми регулювання моменту та потокозчеплення повністю декоплекуються. Даний метод керування додатково дозволяє підтримувати електромагнітні (реактивні) втрати двигуна на незмінному рівні незалежно від величини механічного навантаження.

Висновки до розділу 4

На підставі аналізу схем, математичних рівнянь та вихідних даних було створено імітаційну модель у програмному середовищі MATLAB Simulink (рис. 4.1). Використання даної моделі дозволило відтворити реальні умови функціонування системи та отримати графічні залежності, що відображають динаміку перехідних процесів ключових параметрів. Особливу увагу приділено дослідженню поведінки системи при варіаціях навантажувального моменту (M_c) відносно номінального значення (M_n).

Проведене моделювання виявило характер реакції системи на зміни навантаження, що дало змогу оцінити правильність попередніх розрахунків. Отримані результати підтвердили адекватність вибору електродвигуна та інших структурних елементів системи, а також продемонстрували їх відповідність заданим технічним вимогам.

Таким чином, застосування електроприводу з векторним керуванням асинхронним двигуном забезпечує високу точність регулювання швидкості конвеєра, покращує енергоефективність системи та може бути рекомендованим для впровадження в електромеханічні системи транспортних механізмів безперервної дії під час їх модернізації чи реконструкції.

ВИСНОВКИ

У рамках проведеного дослідження успішно реалізований підхід до проектування та оцінки роботи електромеханічного комплексу стрічкового конвеєра. Виконаний обсяг робіт охопив усі етапи - від теоретичного обґрунтування концепції до практичної реалізації системи керування. Завдяки застосуванню сучасних методів моделювання та програмного забезпечення MATLAB вдалося створити математичну модель, яка дозволила провести дослідження динамічних характеристик системи та аналіз її перехідних процесів. Отримані результати демонструють високу ефективність - система з векторним керуванням забезпечує стабільність роботи з максимальною похибкою швидкості лише 0,6% у всьому робочому діапазоні навантажень, що супроводжується оптимальним рівнем енергоспоживання.

Детальний аналіз перехідних процесів за різних умов експлуатації підтвердив здатність системи до швидкої адаптації при змінах навантаження, що свідчить про її надійність та стабільність. Практична цінність роботи полягає у розробці електромеханічної системи, яка повністю відповідає сучасним промисловим вимогам щодо продуктивності, енергоефективності та надійності. Впровадження таких рішень дозволить суттєво підвищити продуктивність конвеєрних систем, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну роботу у різних умовах навантаження.

Результати проведеного дослідження показують шлях для подальшої оптимізації систем керування, розробки алгоритмів та впровадження систем моніторингу. Отримані дані підтверджують ефективність та відкривають нові перспективи для вдосконалення електромеханічних систем промислового транспорту, що може бути корисним для інженерно-технічних працівників, науковців та фахівців, які займаються проектуванням і експлуатацією сучасних конвеєрних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. М.В. Печеник, С.О. Бур'ян, М.В. Пушкар, Г.Ю. Землянухіна
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТИПОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА. Навчальний посібник. Київ КПІ ім. Ігоря
Сікорського 2022 (дата звернення 09.06.23).
2. М.В. Печеник, С.О. Бур'ян, М.В. Пушкар, Г.Ю. Землянухіна.
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТИПОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ
КУРСОВА РОБОТА. Навчальний посібник. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022 (дата
звернення 09.06.23).
3. Спиваковський А.О. Транспортні машини. Стрічкові конвеєри. — К.: Вища школа,
1983. — 240 с. (дата звернення 09.06.23).
4. Есаков В.П. Электрооборудование и электропривод
промышленных установок. Киев: Вища школа, 1981. — 247 с. (дата звернення
09.06.23).
5. Двигун АМІ 500L6А Сайт продавця: **motors bonnew** URL: [https://
motors.bonnew.com/abb-motors/ami-type/ami-500l6a-1500kw-10000v-50hz.html](https://motors.bonnew.com/abb-motors/ami-type/ami-500l6a-1500kw-10000v-50hz.html) (дата
звернення 09.06.23).
6. Редуктор КЦ2-500-71 Сайт продавця prom.ua URL: [https://prom.ua/ua/p2251427186-
reduktor-konicheski-tsilindricheskij.html](https://prom.ua/ua/p2251427186-reduktor-konicheski-tsilindricheskij.html)(дата звернення 09.06.23).
7. Перетворювач частоти ACS6080 Сайт продавця **global abb group** URL: [https://
new.abb.com/drives/medium-voltage-ac-drives/acs6080](https://new.abb.com/drives/medium-voltage-ac-drives/acs6080) (дата звернення 09.06.23).