

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

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Інна НЕФЬОДОВА**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

тема «Електромеханічна система регулювання швидкості із асинхронним
двигуном і частотним перетворювачем»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-Е21
(шифр групи)

Євгеній КАЛАШНИКОВ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Тетяна НІКІТИНА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент роботи

к.т.н., доц. Валерій КОЛОМІЄЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Консультант

_____ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

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

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.	10
2	ЗАГАЛЬНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	20
3	РОЗРАХУНОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	31
4	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	44
5	МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	55
	Висновки	67
	Список використаних джерел	69
	Додатки	72

					ЕМКС 191002 000 ПЗ								
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Електромеханічна система регулювання швидкості із асинхронним двигуном і частотним перетворювачем.				Літ.	Арк.	Аркушів		
Розроб.		Калашиников Є.										6	
Перевір.		Нікітіна Т.Б.							БННППі ХНУ ім. В.Н. Каразіна БД-Е21				
Т. контр.													
Н. Контр.		Нікітіна Т.Б.											
Затверд.		Коломієць В.В.											

ВСТУП

Електромеханічні привідні комплекси, побудовані на основі асинхронних електродвигунів у взаємодії з перетворювальною технікою частотного типу, демонструють високий потенціал у сфері удосконалення транспортних технологій, особливо в умовах складного ландшафту та обмеженого просторового ресурсу. Проведені практичні випробування та досвід впровадження підтверджують, що застосування таких систем у транспортній галузі може забезпечити суттєве зниження експлуатаційних витрат - у деяких випадках у десятки разів у порівнянні з традиційними способами переміщення вантажів [1].

Однією з ключових переваг електромеханічних рішень з використанням асинхронного типу двигунів є можливість організації транспортування з мінімальною потребою у громіздких опорних інфраструктурах. Це відкриває додаткові перспективи для ефективного подолання як природних, так і штучно створених перешкод, серед яких варто відзначити водні об'єкти, магістральні енергетичні лінії, сільськогосподарські угіддя, щільну міську забудову тощо.

Особливої уваги заслуговує технічна здатність таких систем функціонувати на ділянках з великим ухилом - до 45° , що дає змогу проектувати транспортні маршрути максимально прямолінійними, скорочуючи шлях між пунктами відправлення та призначення і, відповідно, зменшуючи час перевезення та енергетичні витрати.

Серед основних чинників, які визначають конкурентні переваги електромеханічних систем регулювання швидкості у порівнянні з традиційними транспортними рішеннями, слід виокремити такі [2]:

- Максимальне скорочення довжини транспортного шляху за рахунок можливості проектування трас у межах найкоротших геометричних відстаней між пунктами відправлення та призначення;
- Надійне функціонування у широкому спектрі кліматичних умов, включно з опадами, коливаннями температур та іншими

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атмосферними явищами, за винятком екстремальних вітрових навантажень штормового типу;

- Помірний рівень первинних інвестицій та експлуатаційних витрат, необхідних для зведення й подальшого обслуговування інфраструктури систем;
- Раціональне використання земельних ресурсів, що дозволяє мінімізувати втручання в природні ландшафти та зберегти екологічно чутливі території, зокрема лісові масиви;
- Сприяння розвитку економіки гірських і важкодоступних територій, де традиційні транспортні засоби є технічно або економічно неефективними;
- Відсутність шкідливих викидів у навколишнє середовище, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки;
- Зниження акустичного забруднення, оскільки обладнання працює практично безшумно порівняно з двигунами внутрішнього згоряння.

На сьогоднішній день електромеханічні комплекси з асинхронними електродвигунами, керованими за допомогою частотних перетворювачів, ефективно експлуатуються в низці країн світу, демонструючи високу технічну надійність, стабільність роботи впродовж тривалого часу та мінімальні потреби в обслуговуванні. Практика доводить, що ресурс безаварійної роботи таких систем нерідко перевищує 30 років, що підтверджує їхню економічну доцільність [1].

У контексті сучасного розвитку технологій електромеханічні транспортні рішення все частіше стають реальними конкурентами автомобільному транспорту, особливо у нішах, пов'язаних з перевезенням великотоннажних об'ємів матеріалів. Як приклад, експерти німецької компанії RNV Weserhuttle провели розгорнутий техніко-економічний аналіз ефективності транспортування сипучих вантажів, порівнюючи використання автосамоскидів

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вантажопідйомністю 30 тонн із електромеханічною системою, оснащеною асинхронним приводом і перетворювачем частоти.

Модельний сценарій, покладений в основу дослідження, передбачав річний обсяг вантажоперевезень на рівні 1,3 мільйона тонн (що еквівалентно приблизно 300 тонн на годину), 10 км та висота у 700 метрів. Отримані результати підтвердили суттєву перевагу електромеханічних систем за кількома критеріями — енергоефективністю, витратами на експлуатацію, екологічністю та загальною економічною доцільністю проекту [3].

У сучасних умовах електромеханічні системи регулювання швидкості, що базуються на застосуванні асинхронних електродвигунів у поєднанні з частотними перетворювачами, мають значний потенціал для подальшого поширення й активного впровадження в різноманітних галузях економіки. За умови організації серійного виробництва вдосконалених компонентів і вузлів для таких систем можна досягти високої ефективності — продуктивність транспортування може становити від 750 до 1000 тонн за годину, а сумарний щорічний обсяг вантажопотоків — сягати 1,2–1,7 мільярда тонн на рівні національного масштабу.

У цьому контексті актуальність дослідження й розробки сучасних рішень у сфері електромеханічного регулювання є беззаперечною. Саме тому основною метою даної роботи є проектування та обґрунтування електромеханічної системи регулювання швидкості, яка використовує асинхронний електродвигун у тандемі з частотним перетворювачем і повністю відповідає заданим технічним характеристикам та умовам майбутньої експлуатації [4].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Використання канатної тяги в підвісних транспортних системах знімає вимогу до наявності фізичного зчеплення між ходовими колесами і опорною поверхнею. Це створює умови для прокладання трас із високими кутами нахилу та великими міжопорними прольотами, що суттєво розширює діапазон застосування таких рішень у складних географічних і ландшафтних умовах - гірських районах, ущелинах, над водними перешкодами або в зонах з обмеженим будівельним простором [4].

Окрему інженерну групу серед підвісних доріг становлять системи, де опорна або направляюча конструкція найчастіше реалізована у вигляді горизонтального чи слабо нахиленого рейкового шляху. Така компоновка зумовлена потребою забезпечення ефективного зчеплення між тяговими колесами приводу і поверхнею шляху, що є критично важливим для стабільного руху самохідного транспортного модуля. У подібних системах часто передбачено застосування допоміжних підйомних або штовхаючих механізмів, які забезпечують вертикальні або похилі переміщення вагонеток. У більшості реалізованих проєктів джерелом енергії для тягових систем виступає електричний струм, що подається до приводних вузлів або автономних силових установок вагонеток. Проте в окремих випадках можуть застосовуватись двигуни внутрішнього згоряння, зокрема тепловозна тяга, яка дозволяє використовувати системи в умовах відсутності електрифікації. Окрім того, існують інноваційні рішення, де самохідні вагонетки пересуваються по підвісному канатному шляху безконтактним способом - наприклад, за рахунок гвинтових (пропелерних) установок, що генерують поступальний рух за допомогою аеродинамічної тяги [5].

Канатні дороги належать до категорії універсальних транспортних систем, здатних ефективно виконувати як вантажні, так і пасажирські перевезення в різноманітних природно-кліматичних та інфраструктурних умовах. Окрім того, в практиці експлуатації широко застосовуються комбіновані рішення - так звані вантажопасажирські канатні лінії, які дають

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змогу одночасно переміщувати як матеріальні ресурси, так і людей, що значно підвищує ефективність використання інфраструктури в умовах обмеженого простору або в гірській місцевості.

У системах пасажирського призначення реалізуються як одноканатні, так і двоканатні інженерні схеми. Залежно від функціонального призначення та конфігурації маршруту, такі лінії можуть працювати за різними принципами організації руху. Серед найпоширеніших схем - маятниковий режим, коли дві вагонетки рухаються назустріч одна одній між кінцевими станціями, а також кільцева система, що забезпечує безперервний обіг транспортних модулів у межах замкненого маршруту. Вибір відповідної схеми залежить від ряду факторів: інтенсивності пасажиропотоку, конфігурації траси, перепаду висот та характеру рельєфу [5].

Канатні транспортні системи, що функціонують за кільцевим принципом організації руху, поділяються на два ключові типи залежно від способу з'єднання кабін із несучо-тяговим канатом.

Відповідно до положень чинних нормативно-технічних документів, зокрема «Правил безпеки канатних доріг», встановлено обмеження на максимальну швидкість руху для систем із фіксованими кабінами. Так, у випадках використання кабін з місткістю від 2 до 6 пасажирів та реалізації пульсуючого кільцевого руху, швидкість не повинна перевищувати 4 м/с. При цьому процес посадки й висадки пасажирів організовується шляхом повної зупинки кабіни на станції або зниження швидкості до 0,2–0,5 м/с, що дозволяє гарантувати безпечні умови для користувачів.

Для високошвидкісного транспортування пасажирів на маршрутах завдовжки понад 1 км у сучасній практиці все активніше застосовуються канатні дороги з автоматично відчіпними кабінами. Такі системи забезпечують стабільний рух несучо-тягового каната з робочою швидкістю близько 6 м/с, що дозволяє значно скоротити час у дорозі, зберігаючи при цьому високі стандарти безпеки та зручності для пасажирів [4].

З конструктивної точки зору буксирувальні канатні дороги класифікуються за кількістю пасажирів, яких одночасно може обслуговувати

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

один буксирувальний пристрій. Відповідно, системи поділяються на одномісні та двомісні. Основним робочим елементом у цьому випадку є буксирувальний пристрій, який може бути виконаний у вигляді штанги, диска або так званої “тарілки”. Цей елемент з’єднується з основним канатом і створює точку опори для лижника або сноубордиста під час підйому.

Особлива увага в таких системах приділяється плавності старту, оскільки різке початкове зусилля може спричинити дискомфорт або навіть травмування користувача. Для мінімізації подібних ризиків у конструкції каната застосовуються еластичні демпфувальні елементи, що забезпечують поступовий розгін буксиру та комфортне приєднання до руху [6].

Оптимальний робочий діапазон швидкості руху БКД зазвичай становить від 2 до 3,5 м/с, що забезпечує баланс між ефективністю перевезення та безпекою користування, навіть на складних гірських маршрутах.

Такий метод дозволяє формувати єдину лінію, що не знижує ефективність системи та відповідає вимогам до довговічності та безпеки. Конструктивна простота поєднується з високою надійністю, що робить з’єднувальні муфти незамінним елементом у монтажі довгих канатних трас.

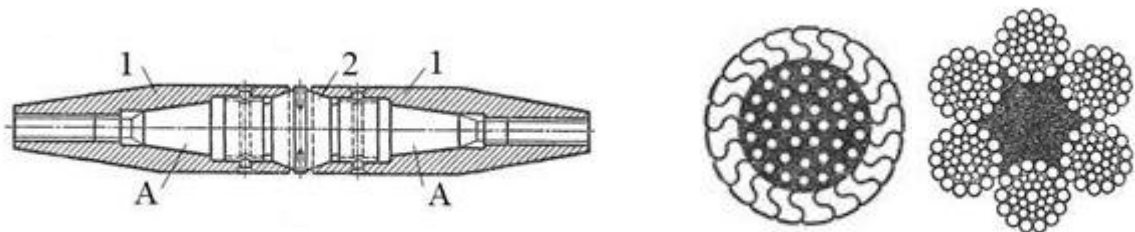


Рисунок 1.1 - Несучі і тягові елементи канатної дороги: Муфта де 1 - полумуфта; 2 - гвинтова стяжка; А - конусна частина; Перетин несучого та тягового канатів.

У процесі експлуатації тягові та несучо-тягові канати зазнають інтенсивного механічного навантаження, зокрема внаслідок частих перегинів на шківах, напрямних блоках і роliках, а також локального стиснення в зонах фіксації - зокрема в затискачах зчіпних механізмів. Крім того, відбувається

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поступове зношування зовнішнього шару через абразивну дію, що знижує ресурс елемента.

У системах вантажного типу, що функціонують на основі кільцевої схеми організації руху, основною транспортною одиницею є вагонетки, спеціально адаптовані до циклічної експлуатації з автоматичним навантаженням та розвантаженням. Особливо в двоканатних системах, де тяговий і несучий канати виконують незалежні функції, конструкція вагонеток потребує високого рівня інженерної адаптації [7].

На практиці найчастіше застосовують вагонетки з перекидним типом кузова, які дозволяють здійснювати автоматизоване розвантаження в кінцевих точках маршруту без потреби ручного втручання. Перекидні кузови можуть працювати у вертикальній або горизонтальній площині, в залежності від типу вантажу та архітектури станції розвантаження.

Завдяки наявності шарнірного з'єднання, кузов вагонетки здатен зберігати стабільне вертикальне положення навіть на похилих ділянках траси, що особливо важливо для забезпечення стійкості вантажу під час руху. Така конструктивна особливість дозволяє кузову автоматично вирівнюватися під дією сили тяжіння, не потребуючи додаткових механізмів стабілізації.

Ключову роль у функціонуванні перекидного механізму відіграють цапфи - опорні елементи, на яких обертається кузов. Вони розміщуються нижче центру мас порожнього кузова, але вище центра ваги у завантаженому стані. Крім того, цапфи спеціально зміщені відносно вертикальної осі симетрії кузова, що створює момент перекидання під дією ваги вантажу.

Завдяки такому розташуванню, при досягненні певного кута нахилу або при взаємодії з розвантажувальним пристроєм, заповнений кузов перекидається легко і природно, використовуючи власну масу. Після розвантаження центр ваги змінюється, і кузов автоматично повертається у початкове положення під дією гравітації, без застосування сторонніх приводів або силових елементів [4].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

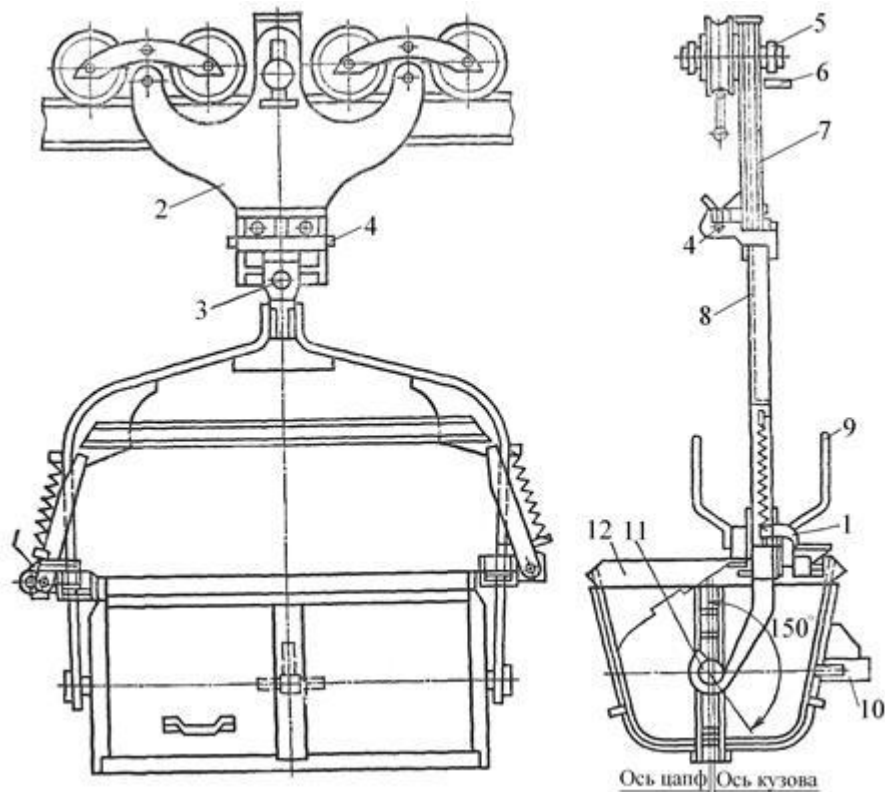


Рисунок 1.2 – Вагонетка з перекидним кузовом

На зображенні представлено основні елементи конструкції вагонетки, обладнаної кузовом із функцією перекидання для автоматичного розвантаження. Позначення елементів: 1 - фіксувальний замок, що утримує кузов у робочому положенні; 2 - візок, що слугує несучою частиною для переміщення вагонетки по опорній системі; 3 - шарнірне з'єднання, яке забезпечує обертання кузова; 4 - затискний механізм, який утримує вагонетку у складі тягової системи; 5 - бічний напрямний ролик, що забезпечує стабільність руху по рейках або канатних опорах; 6 - опорна шина, яка є частиною ходової системи; 7 - з'єднувальна тяга, що передає зусилля від приводного пристрою; 8 - підвісна система, яка сполучає кузов із візком; 9 - запірний важіль, що активує механізм фіксації кузова; 10 - фіксувальний палець, який виконує роль замикального елемента в шарнірному вузлі; 11 - цапфа, навколо якої обертається кузов під час перекидання; 12 - кузов, призначений для розміщення та перевезення вантажу [6].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У вітчизняній практиці проектування та експлуатації пасажирських канатних доріг, особливо крісельного типу з одноканатною схемою, основним видом рухомого складу є невідчіпні посадкові модулі — зокрема одномісні та двомісні крісла, а також двомісні кабіни. Конструкція крісел може мати підніжку для ніг або обходитися без неї, а також виконуватись у правому або лівому варіанті підвісу, залежно від конфігурації маршруту та орієнтації пасажиропотоку.

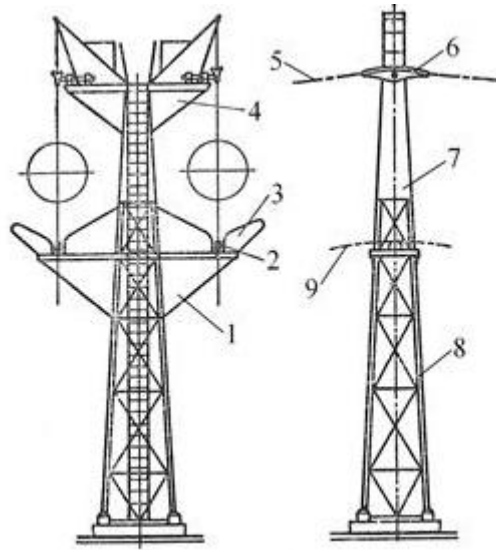
Крісла й кабіни з'єднуються з основним несуче-тяговим канатом за допомогою пружинно-гвинтових затискачів, що забезпечують постійне, нероз'ємне зчеплення під час експлуатації. Конструктивно такий затискач взаємодіє з підвіскою, яка у свою чергу закріплена до сидіння крісла або каркасу кабіни.

Варто зазначити, що параметри і характеристики ведучих шківів, що застосовуються в пасажирських канатних системах, регламентуються стандартами, які встановлюють вимоги до діаметру, профілю струмка, типу футерування, допустимих навантажень і методів контролю зношування [7].

У переважній більшості підвісних канатних доріг, особливо пасажирського призначення, використовується електричний тип приводу, який відзначається надійністю, високим ККД і можливістю точного регулювання швидкості. Такий привід найчастіше підключається до стаціонарних енергомереж з напругою, що відповідає вимогам обладнання.

Відстань між осями несучих канатів на опорі - тобто ширина колії - зазвичай становить 3, 4 або 6 метрів, і визначається вимогами до стійкості та конструкції рухомого складу [6].

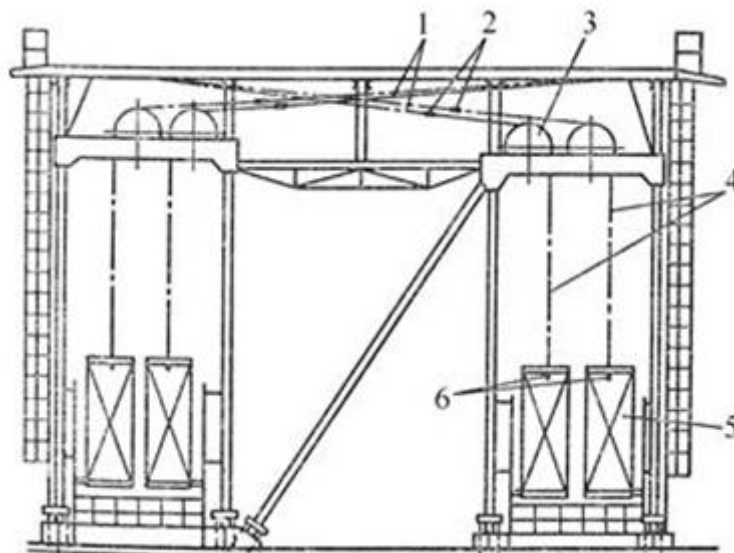
					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Малюнок. 1.3 – Опори підвісних канатних доріг

Лінійні станції у канатних транспортних системах встановлюються в місцях, де відбувається стикування окремих секцій несучих або несуче-тягових канатів, і виконують важливу роль в утриманні, компенсації натягу та фіксації канатної лінії. Їхнє призначення полягає не лише в технічному розділенні траси на окремі функціональні ділянки, а й для забезпеченні стабільної роботи системи.

Таке конструктивне розмаїття дозволяє адаптувати систему до конкретних умов експлуатації, включно з довжиною траси, типом приводу, кліматичними характеристиками та особливостями рельєфу [8].



Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕМКС 191002 000 ПЗ

Арк.
16

Рисунок 1.4 - Станція з лінійним подвійним натягненням: 1 - головний канат; 2 – муфта перехідна; 3 - блок; 4 - канат; 5 - контрвантаж; 6 - муфта.

У системах канатного транспорту подвійна натяжна станція виконує функцію компенсації змін довжини несучих канатів та підтримання стабільного натягу на обох ділянках маршруту, які вона з'єднує. Кінці несучих канатів, що підходять до станції з обох боків, заводяться у внутрішню зону станції через спеціальні направляючі башмаки (відхиляючі черевики). Це дозволяє забезпечити необхідний кут введення каната та зменшити навантаження на його конструкцію [6].

У конструкції канатних доріг передбачені спеціальні захисні елементи, метою яких є запобігання травмам персоналу, пошкодженню інфраструктури та втраті вантажу в аварійних ситуаціях.

Системи безпеки є обов'язковим елементом відповідно до вимог нормативної документації з експлуатації канатного транспорту й мають бути передбачені ще на етапі проектування [7].

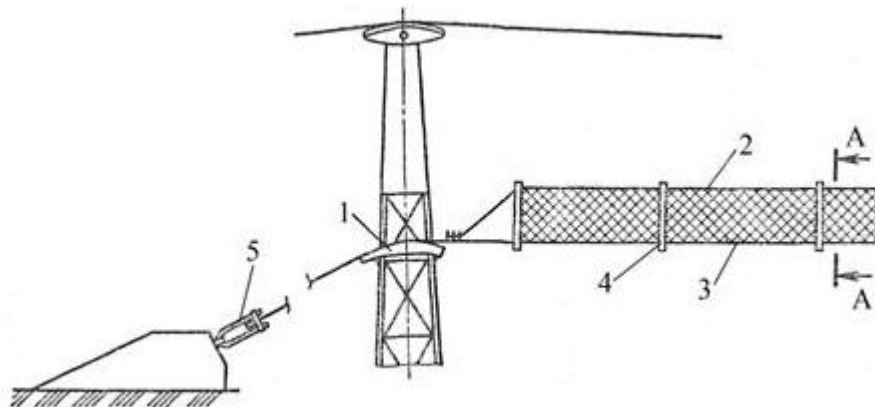


Рисунок 1.5 - Захисна мережу: 1 - башмак; 2 - каркас; 3 - мережеві канати; 4 - поперечки; 5 - пристрій.

Проектування профілю підвісної канатної дороги здійснюється відповідно до вимог, викладених у "Правилах будови і безпечної експлуатації

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вантажних та пасажирських підвісних канатних доріг", що регламентують як конструктивні, так і експлуатаційні аспекти безпеки. В процесі формування траси необхідно дотримуватися ряду критично важливих умов, серед яких:

З метою уникнення зіткнення рухомого складу з інфраструктурними об'єктами або природними перешкодами, проектом повинні бути враховані зони габаритного наближення, з урахуванням поперечного відхилення вагонеток до 20% від ширини траси через бокове гойдання [6].

Дотримання цих параметрів є обов'язковим для забезпечення безпеки під час експлуатації канатної дороги в умовах вітрових навантажень або нерівномірного завантаження вагонеток.

На увігнутих ділянках профілю, де несучі канати переходять через опорні черевики (башмаки), має бути гарантовано стійке прилягання каната до поверхні опори. Для цього застосовують розрахунок із коефіцієнтом запасу, що враховує можливі зусилля від вітру, зміну температури, вагу навантаження та динамічні впливи під час руху вагонеток [5].

Це дозволяє уникнути відриву каната від опори, що може спричинити порушення стабільності роботи системи або навіть спричинити аварійну ситуацію.

Міська канатна дорога нового типу представляє собою інноваційну транспортну систему повітряного типу, що забезпечує зв'язок між кінцевими та проміжними пасажирськими станціями. Ці станції об'єднані між собою лінійними маршрутами, які включають один або декілька тягових і несучих сталевих канатів. На канатах підвішені пасажирські вагони, що кріпляться до тягового каната за допомогою спеціалізованої каретки, роликів і знімного затискача. Переміщення вагонів здійснюється виключно за рахунок приводу, що діє через тяговий канат [6].

Тяговий елемент огинає всі ролики балансирної системи, забезпечуючи стабільний і контрольований рух по всьому маршруту.

У межах даного розділу було здійснено систематизований аналіз підвісних канатних доріг як особливого виду транспортної інфраструктури, що поєднує в собі інженерну складність і високу ефективність при роботі в умовах

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складного рельєфу або щільної урбаністичної забудови. Здійснено класифікацію різновидів підвісних канатних систем залежно від конструктивних особливостей, способу підвісу рухомого складу, типу тяги, а також призначення — вантажне, пасажирське чи комбіноване.

Окрему увагу приділено вивченню базових компонентів таких систем, включаючи несучо-тягові канати, вагонетки, опори, приводи, посадкові платформи та вузли з'єднання. Встановлено зв'язки між конструктивними параметрами канатної дороги та умовами її експлуатації в різних середовищах - гірських, міських, промислових [5].

У ході дослідження проаналізовано практичний досвід реалізації підвісних канатних доріг у сучасних інфраструктурних проєктах, а також вивчено положення актуальної патентної документації, яка відображає сучасні тенденції у проєктуванні та модернізації таких систем.

Комплексний аналітичний огляд наявних технічних рішень дозволив сформулювати узагальнені вимоги до електромеханічного приводу, який є критично важливою складовою системи. Зокрема, визначено потребу у високій енергоефективності, стабільності тягового зусилля, синхронності руху та адаптивності приводу до змінних навантажень і зовнішніх чинників [6].

Таким чином, проведене дослідження створює основу для подальшої розробки оптимальної конфігурації електроприводу для підвісної канатної дороги із урахуванням сучасних нормативів, умов експлуатації та вимог до безпеки пасажирських перевезень.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ЗАГАЛЬНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У сфері безперервного транспорту, зокрема для підвісних канатних доріг, найбільш широко застосовуються електроприводи на базі асинхронних електродвигунів із фазним ротором. Такий тип приводу обумовлює високу надійність, добру регульованість та здатність витримувати значні механічні навантаження. Основними експлуатаційними вимогами до систем електроприводу канатних доріг є забезпечення плавного запуску й гальмування, що особливо актуально у зв'язку з значною масою рухомого складу та інерційністю всього механізованого комплексу [6].

Раптові зміни швидкості або ривкові навантаження можуть спричинити перенапруження канатів, що, у свою чергу, підвищує ризики пошкодження або навіть аварійного виходу системи з ладу. Тому ключова умова ефективного функціонування приводу - контрольованість перехідних процесів. Тривалість пуску та зупинки приводу визначається індивідуально для кожної конкретної установки в технічному завданні, проте зазвичай цей інтервал становить від 10 до 30 секунд, залежно від габаритів і типу транспортної лінії [7].

Потужність електроприводу, яка необхідна для ефективного функціонування системи, розраховується, виходячи з максимального тягового зусилля на канаті та номінальної швидкості руху. Особливу увагу слід приділяти системам маятникового типу, де інерційні моменти приводу мають вагомий вплив на загальну динаміку системи, особливо у фазах розгону та гальмування.

Комплекс ключових технічних вимог до електроприводів канатних доріг включає [8]:

- Забезпечення плавного пуску електродвигуна з обмеженим значенням пускового моменту та прискорення;
- Можливість реверсивного режиму роботи приводу (тобто зміни напрямку руху без механічного втручання);
- Тривалість перехідного процесу має бути мінімальною — не більше 1 секунди, що забезпечує оперативність реакції системи;

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Статичне відхилення швидкості при стабільному навантаженні не повинно перевищувати 5% від номінального значення;
- Стабільне утримання заданого значення швидкості при постійному моменті навантаження;
- Широкий діапазон регулювання швидкості — не менше ніж 10:1, що дозволяє адаптувати систему до змінного режиму роботи;
- Висока якість динамічних характеристик: під час регулювання не допускається поява стрибків струму або швидкості, усі зміни параметрів повинні відбуватись плавно й стабільно;
- Рівень перерегулювання (максимальне тимчасове відхилення швидкості під час перехідного процесу) не повинен перевищувати 5%.

Таким чином, електроприводи, що застосовуються в канатних транспортних системах, повинні бути не лише енергоефективними, а й відповідати підвищеним вимогам щодо динамічної стабільності, безпеки, надійності та плавності керування усіма етапами руху — від запуску до повної зупинки.

Процес формування вимог до електропривідної системи підвісної канатної дороги базується на глибокому аналізі особливостей відповідного технологічного процесу. Всі необхідні технічні параметри та функціональні обмеження повинні бути враховані ще на етапах аналізу й синтезу системи, що дозволяє досягти високої ефективності, безпеки та стабільності в роботі [7].

До основних вимог, що висуваються до системи автоматизованого керування електроприводом, належать [8]:

- Наявність повноцінної системи блокувань і захисних функцій, що запобігають аварійним ситуаціям та забезпечують безпечну взаємодію людини з обладнанням;
- Компактність конструкції та мінімізація масогабаритних характеристик, що особливо актуально для розміщення в обмеженому технологічному просторі станцій і щитів керування;

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Зручність у процесах монтажу, технічного обслуговування, налагодження, діагностики й ремонту, що сприяє зменшенню простоїв обладнання;
- Повна відповідність нормативам з техніки безпеки та електробезпеки, у тому числі в умовах експлуатації на відкритих майданчиках або в складних кліматичних зонах.

Система автоматизації має забезпечувати кілька рівнів захисту, зокрема:

- від перевищення струмових навантажень, які можуть призвести до перегрівання обмоток двигуна чи пошкодження пускової апаратури;
- від раптового зникнення напруги як у силовому колі, так і в колі керування;
- від неправильного порядку чергування фаз, що може призвести до реверсування напрямку обертання;
- від перевищення допустимого рівня швидкості обертання, що є критичним для безпеки транспортної лінії.

При проектуванні канатної дороги надзвичайно важливо заздалегідь визначити передбачуваний режим експлуатації електроприводу, який безпосередньо залежить від профілю траси (ухилів) і режиму завантаження протягом усього циклу роботи.

Можливі такі типові режими роботи [8]:

1. Тяговий режим (руховий) - коли привод здійснює підйом вантажів у напрямку вгору;
2. Генераторний режим - коли привод функціонує як генератор, сповільнюючи спуск вантажів вниз і повертаючи частину енергії назад у систему;
3. Режим змінного навантаження (знакозмінний) - коли упродовж робочого циклу характер навантаження неодноразово змінюється, змушуючи двигун чергувати між тяговим і генераторним режимами.

У випадках, коли система працює винятково в тяговому режимі, доцільним є застосування асинхронного двигуна з фазним ротором, що характеризується стабільною роботою в умовах змінних механічних

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантажень. Для забезпечення плавного пуску в таких системах використовується багатоступеневий пусковий реостат, який дозволяє контролювати струм і момент, що розвивається на валу двигуна.

Процес керування пуском реалізується за допомогою командоконтролера, який замикає кола реверсивних контакторів і контакторів прискорення. Всі фази пуску автоматизовані за рахунок використання електромагнітних реле часу, що забезпечують послідовну активацію кожного ступеня реостатного регулювання.

Такий підхід дозволяє значно зменшити динамічні коливання моменту під час перемикань, а також знизити імпульсні прискорення, що виникають у фазі розгону. Завдяки цьому досягається стабільність роботи механічної частини системи, зменшується знос канатів і вузлів з'єднання, а також покращується комфорт та безпека при транспортуванні.

Система електроприводу, що реалізується у сучасних канатних транспортних установках, як правило, побудована на основі асинхронного електродвигуна, керованого тиристорним перетворювачем частоти (ТПЧ). Така конструкція забезпечує ефективне регулювання швидкості та динаміки механізму, зберігаючи при цьому високу енергоефективність та експлуатаційну надійність.

До основних елементів ТПЧ, який входить до складу електроприводу, належать:

- Трифазний керований випрямляч, що виконує перетворення змінного струму в постійний (формує так звану «ланку постійного струму»);
- Автономний інвертор напруги, який генерує змінну напругу заданої частоти;
- Фільтрувальні пристрої для згладжування пульсацій у ланці постійного струму;
- Блок заряджання комутуючих конденсаторів, який живиться від незалежного джерела;
- Силовий обмежувач струму, що виконує захист у разі коротких замикань або перенавантажень;

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Системи вимірювання струму, які забезпечують реалізацію зворотного зв'язку в автоматизованому контурі керування.

Електропривод функціонує в замкнутій системі керування, яка реалізована за принципом порівняння опорного сигналу струму із фактичним значенням, отриманим із датчика зворотного зв'язку. Це дозволяє забезпечити точне керування робочим струмом двигуна та гарантує динамічну стійкість при змінних навантаженнях [7].

У складі ТПЧ застосовується автономний інвертор напруги з пофазною комутацією, де реалізується поетапне вмикання тиристорних ключів, які утворюють два вентиляльні плеча для кожної фази. Це забезпечує рівномірне перемикання струмів у фазах двигуна, зменшує електромагнітні навантаження та знижує ризики перенапруг.

Типова схема інвертора включає [8]:

- Комутаційний міст, який складається з кількох силових тиристорів;
- Розділові діоди, що виконують функцію захисту від паразитних струмів та перехідних процесів;
- Комутуючі конденсатори, що накопичують енергію для забезпечення коректного перемикавання.

Важливою особливістю даної системи є незалежність напруги на комутуючому конденсаторі від рівня основного живлення. Це досягається шляхом використання спеціалізованого модуля підзарядки, який подає енергію через тиристири із зовнішнього джерела одразу після завершення комутаційного циклу.

Щоб підтримувати стабільну комутаційну здатність незалежно від зміни параметрів навантаження чи частоти вихідної напруги, джерело підзарядки виконується у вигляді некерованого або напівкерованого випрямляча, що реалізується за трифазною мостовою схемою. Сигнали з виходу цього модуля проходять через Т-подібний фільтр, який згладжує імпульси та стабілізує подану на комутаційний вузол енергію [8].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення довговічної та безпечної експлуатації електропривідної системи у ній передбачено багаторівневу захисну інфраструктуру, яка включає [9]:

- Максимально-струмовий захист - спрацьовує при перевищенні встановлених порогів навантаження;
- RC-ланцюги демпфування - використовуються для захисту від імпульсних перенапруг як робочих, так і комутаційних тиристорів, а також діодів у розділювальному ланцюзі;
- Захист комутуючих елементів - відбувається через стабілізацію напруги на комутуючих конденсаторах;
- Додаткові апаратні обмежувачі, що запобігають неконтрольованому пробію тиристорних ключів унаслідок стрибків напруги.

Завдяки такій побудові, електропривід забезпечує не лише високоточне керування асинхронним двигуном, а й відповідає сучасним вимогам до надійності, безпеки та енергоефективності систем приводів у транспортних технологіях.

Особливості та динаміка технологічного процесу мають вирішальне значення для визначення режимів функціонування системи електроприводу. Саме структура процесу, його циклічність, навантажувальні умови та вимоги до точності й плавності регулювання обумовлюють головні технічні критерії, які повинна задовольняти система приводу [9].

У сучасних автоматизованих комплексах найбільш оптимальним рішенням є застосування регульованих електроприводів із можливістю безступеневої зміни частоти обертання. Такі приводи забезпечують не лише гнучке налаштування швидкісного режиму, а й створюють передумови для адаптивного керування в умовах змінного технологічного навантаження.

Одним із найпоширеніших типів виконавчих механізмів, що широко застосовуються в електроприводних системах, є асинхронний двигун із короткозамкненим ротором. Популярність цього типу двигуна зумовлена його технічною простотою, економічністю, широким діапазоном потужностей (від

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількох сотень ват до десятків мегават), високою надійністю та мінімальними експлуатаційними витратами [10].

До ключових переваг асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором належать [9]:

- Простота конструктивного виконання, що мінімізує ймовірність поломок;
- Високий коефіцієнт корисної дії при роботі в сталому режимі;
- Відсутність потреби в складному технічному обслуговуванні;
- Низька вартість виробництва та монтажу;
- Сумісність із різноманітними системами частотного керування.

Керування основними механічними параметрами приводу — передусім швидкістю обертання валу та електромагнітним моментом — може бути реалізовано кількома принципово різними способами. Серед найбільш поширених методик регулювання, які застосовуються для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, виділяють такі [9]:

1. Регулювання шляхом зміни напруги при постійній частоті живлення
Такий підхід є найпростішим, однак має обмежений діапазон ефективності. Він доцільний для систем, де не вимагається точна стабілізація моменту при змінній швидкості.
2. Скалярне керування ($U/f = \text{const}$)
Цей метод базується на одночасному регулюванні амплітуди та частоти поданої на статор напруги. Він дозволяє зберігати оптимальний магнітний потік у машині, забезпечуючи відносно стабільну характеристику моменту. Найчастіше використовується в системах, де не критичне динамічне навантаження, але необхідна плавність та широкий діапазон регулювання.
3. Векторне керування (орієнтоване на поле)
Найпрогресивніший підхід, який забезпечує незалежне керування потоковою та моментною складовими струму. Завдяки цьому реалізується високоточне керування моментом у реальному часі, що дозволяє застосовувати цей метод у системах з підвищеними динамічними вимогами, наприклад, у транспортних і підйомних механізмах.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Описаний метод доцільно застосовується у тих технологічних установках, де навантажувальні характеристики не перевищують допустимих значень електромагнітного моменту, що розвивається на валу двигуна. В такому випадку можливе забезпечення стабільної роботи механізму без значних втрат у продуктивності та енергоспоживанні [9].

Оскільки цей спосіб керування не потребує складного силового обладнання, він отримав широке поширення у промисловості як засіб полегшеного пуску асинхронних двигунів, особливо для електричних машин середньої та великої потужності. На практиці, його реалізація дозволяє зменшити пускові струми та згладити ударні навантаження на приводний механізм.

Слід зазначити, що сучасні системи на основі даного методу керування зазвичай мають у своєму складі інтегровані функції захисту й автоматизації, зокрема [11]:

- автоматичне відключення при перевищенні допустимого рівня струму (захист від перевантажень і коротких замикань);
- вбудовану функцію реверсування обертання двигуна;
- можливість підключення до централізованих систем керування на базі ПЛК, SCADA чи промислових шин передачі даних (наприклад, Modbus, Profibus, CAN та ін.).

Однак, попри свою універсальність і простоту, зазначений метод не забезпечує повноцінного функціонального й енергетичного контролю в умовах складного динамічного навантаження. З цієї причини для задач, що вимагають гнучкого та ефективного регулювання швидкості, історично почали використовуватись частотні перетворювачі з прямим енергетичним зв'язком.

Перетворювачі частоти з безпосереднім (непосереднім) зв'язком, як перші у своєму роді системи, дозволяли здійснювати зміну частоти живлення асинхронного двигуна без проміжного перетворення напруги в постійну. Завдяки своїй конструктивній простоті такі перетворювачі мають мінімальну кількість силових елементів та забезпечують надійну передачу енергії з високої частоти на нижчі діапазони. Це дозволяє створювати енергоефективні системи

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у тих випадках, коли не потрібно широкого діапазону регулювання частоти обертання [10].

Однак варто враховувати, що верхня межа регулювання у таких перетворювачах обмежена частотою мережі живлення (наприклад, 50 Гц у більшості промислових мереж), що знижує гнучкість їх використання для технологічних задач із високими динамічними вимогами.

Незважаючи на ці обмеження, перетворювачі з безпосереднім зв'язком і сьогодні зберігають свою актуальність, особливо для великих асинхронних машин, де необхідно забезпечити [11]:

- плавний запуск двигуна з поступовим зростанням швидкості,
- обмеження пускового струму при запуску електроприводу великої потужності,
- частотне регулювання у вузькому діапазоні обертів.

У таких системах головним критерієм є енергетична ефективність та стабільність роботи при фіксованих або передбачуваних навантаженнях, а не гнучке налаштування робочого діапазону чи швидке реверсування.

З позиції теоретичного підходу, найбільш оптимальною схемою управління електроприводом на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором вважається метод змінювання частоти живлення одночасно з корекцією амплітуди напруги. Цей принцип відомий у технічній літературі як скалярне керування (або управління за амплітудно-частотною характеристикою) [11].

У практичному виконанні таке управління реалізується за допомогою частотного перетворювача, до складу якого входить автономний інвертор напруги, здатний генерувати змінну частоту та напругу відповідно до заданого алгоритму.

Завдяки скалярному методу забезпечується плавне та безударне регулювання частоти обертання ротора електродвигуна в широкому діапазоні. Основний принцип дії цієї системи полягає у співвідношенні між амплітудою напруги (U) і частотою (f), що подається на статор двигуна. Найчастіше використовується лінійна залежність між цими параметрами, відома як закон

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

“ $U/f = \text{const}$ ”. Застосування цього закону дозволяє зберігати відносно стабільні умови намагнічування машини в усьому робочому діапазоні швидкостей, що, у свою чергу, забезпечує сталі значення крутного моменту.

Однак, при зниженні частоти живлення нижче номінального значення, виникає проблема зниження вентиляції електродвигуна, оскільки внутрішній вентилятор працює повільніше. У таких умовах стандартні двигуни загальнопромислового призначення не здатні забезпечити належний рівень тепловідведення, що призводить до перегріву обмоток та зниження довговічності ізоляції.

Щоб уникнути перегріву при експлуатації двигуна в умовах низьких частот при збереженні номінального навантаження, необхідно [11]:

1. Або використовувати спеціально сконструйовані асинхронні машини з посиленням теплозахистом і розширеним робочим діапазоном частот;
2. Або забезпечити примусове охолодження шляхом встановлення зовнішнього незалежного вентилятора, який не залежить від швидкості обертання ротора.

Такий підхід дозволяє ефективно використовувати асинхронні приводи з частотним регулюванням навіть у тривалому сталому режимі роботи при частотах, що значно нижчі від номінальних, зберігаючи необхідний рівень крутного моменту і не перевищуючи допустимі теплові навантаження на двигун.

На основі проведеного детального аналізу особливостей технологічного процесу функціонування підвісної канатної дороги були сформульовані ключові технічні вимоги до системи електроприводу. Врахування цих вимог дозволило здійснити обґрунтований вибір можливих варіантів електромеханічного забезпечення приводу [12].

У результаті аналітичного дослідження встановлено, що найбільш доцільним є використання асинхронних електродвигунів як із короткозамкненим ротором, так і з фазним ротором, оскільки ці типи машин забезпечують необхідний рівень надійності, економічності та технічної

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

придатності до регульованого режиму роботи, який є характерним для підвісних канатних систем.

У відповідності до сформованих вимог, як з точки зору енергетичних характеристик, так і з урахуванням динамічних особливостей процесу транспортування, було обґрунтовано вибір електропривідної системи на базі частотного перетворювача в комбінації з асинхронним двигуном (ПЧ–АД). Така система дозволяє реалізувати плавне керування швидкістю обертання, забезпечити високу точність стабілізації руху, а також підвищити енергоефективність у всьому діапазоні навантажень.

Таким чином, вибір конфігурації електроприводу типу ПЧ–АД повністю відповідає технічним і експлуатаційним вимогам, що висуваються до привідної частини підвісної канатної дороги сучасного типу.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З РОЗРАХУНОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Далі у розділі цієї роботи буде послідовно представлено низку розрахункових параметрів, необхідних для повноцінного аналізу та моделювання електромеханічної системи з асинхронним двигуном у складі приводу підвісної канатної дороги. Зокрема, увагу буде зосереджено на обчисленні таких ключових характеристик [12]:

- Кутова швидкість обертання магнітного поля статора, яка є базовим параметром для визначення частотних характеристик двигуна та застосовується при формуванні законів керування напругою та частотою;
- Синхронна швидкість обертання (ідеальний режим холостого ходу), що дозволяє встановити граничні можливості приводу без навантаження;
- Номінальна механічна швидкість ротора, яка визначається з урахуванням ковзання і є важливою при узгодженні двигуна з навантаженням;
- Номінальний електромагнітний момент двигуна, що характеризує здатність приводу витримувати тривале навантаження без перевантаження;
- Критичне значення моменту (максимальний момент), який оцінюється за допомогою коефіцієнта перевантажувальної здатності λ , отриманого з технічного каталогу виробника електродвигуна;
- Амплітудні значення фазної напруги на обмотках статора та амплітудні значення струмів у фазах, що є необхідними для побудови електромагнітного режиму машини;
- Амплітудні значення потокозчеплення, що формуються між обмотками статора й ротора при номінальному та змінному режимах експлуатації.

Ці розрахунки відіграють критичну роль при проектуванні системи керування електроприводом, дозволяючи обґрунтовано вибрати структуру регуляторів, параметри захисту, а також забезпечити відповідність динамічних

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик заданим вимогам до безпеки та енергоефективності транспортної системи [11].

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с} \quad (3.1)$$

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{4} = 78.54 \text{ рад/с} \quad (3.2)$$

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_n) = 78.54 \cdot (1 - 0.013) = 77.519 \text{ рад/с} \quad (3.3)$$

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = 315 \cdot 10^3 / 77.519 = 2.58 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.4)$$

$$M_k = M_n \cdot \lambda = 2.2 \cdot 2.58 \cdot 10^3 = 5.676 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.5)$$

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 219.393 \text{ В}, \quad (3.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^3}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.94 \cdot 0.92} = 351.374 \text{ А} \quad (3.7)$$

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.269 \text{ В} \quad (3.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 351.374 = 496.918 \text{ А} \quad (3.9)$$

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310.269}{314.159} = 0.988 \text{ Вб} \quad (3.10)$$

Побудова математичної моделі асинхронного електродвигуна (АД) на основі еквівалентного представлення у вигляді так званої Т-подібної схеми

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						32
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заміщення, яка широко використовується в теорії електричних машин для аналізу сталих і перехідних режимів роботи.

Цей тип схеми дозволяє умовно поділити електричну структуру асинхронної машини на три головні частини: вхідний ланцюг (елементи, пов'язані з обмотками статора), магнітну зв'язуючу ланку (потокозчеплення) та еквівалентне коло ротора, приведенне до сторони статора. У межах даного підходу основні електричні параметри, що визначаються і підлягають розрахунку, включають [13]:

- активний опір обмотки статора, що враховує теплові втрати під час проходження струму;
- визначає рівень реактивних втрат у процесі створення магнітного поля;
- представлена активною провідністю G_m , що моделює втрати на гістерезис та вихрові струми, і магнітною індуктивністю B_m , яка відповідає за зв'язок магнітних потоків;
- активний і реактивний опір, які моделюють поведінку струму ротора в заміщеній схемі;
- критичний динамічний параметр, що описує відносну різницю між швидкістю обертання поля та ротора.

Графічне зображення Т-подібної еквівалентної схеми, що служить основою для математичного моделювання та подальших розрахунків, наведено на рисунку 3.1.

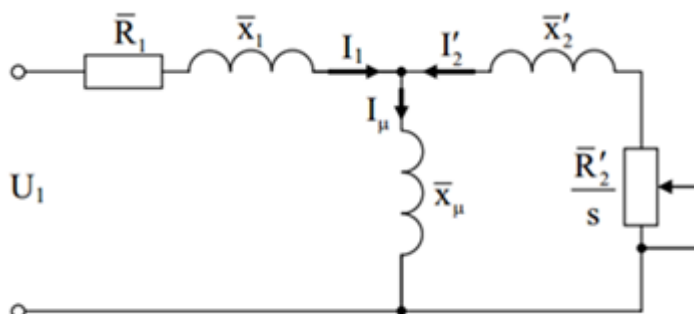


Рисунок 3.1. - Т-подібна схема

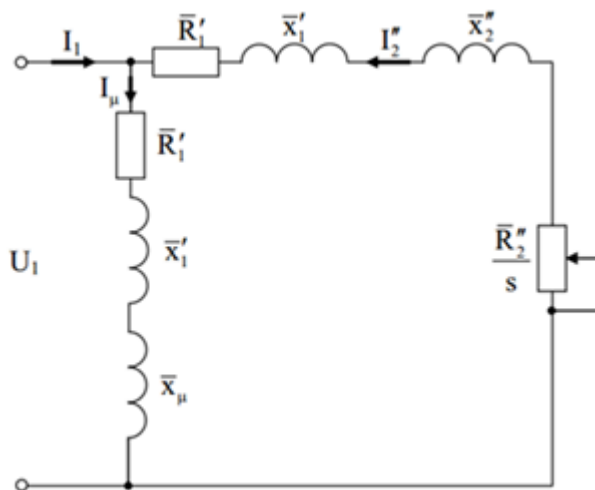


Рисунок 3.2 - Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

У цьому розділі буде представлена методика обчислення параметрів асинхронного двигуна при переході від Г-подібної (π-подібної) до Т-подібної еквівалентної електричної схеми заміщення, яка є базовою для подальшого моделювання і аналізу характеристик електроприводу [14].

Для узгодження параметрів між двома схемами заміщення (π- та Т-типу) використовуються певні коефіцієнти еквівалентності, що враховують специфіку розподілу електричних величин в схемі. Ключовим завданням є отримання нових значень опорів і індуктивностей, що описують [14]:

- Опір і індуктивність розсіювання обмотки статора;
- Опір і індуктивність обмотки ротора, приведені до сторони статора;
- Індуктивність магнітного кола або намагнічувальна індуктивність.

Усі ці параметри повинні бути виражені в абсолютних одиницях, з урахуванням масштабуючих коефіцієнтів, які залежать від номінальних технічних характеристик двигуна таких як напруга, струм, потужність та кутова швидкість.

Індуктивності, що використовуються при моделюванні, поділяються на [14]:

- Індуктивність розсіювання статора;
- Індуктивність розсіювання ротора;
- Індуктивність намагнічувального контуру;

- Загальні індуктивності статора і ротора - обчислюються як сума відповідних розсіювальних і магнітних складових.

Для здійснення коректного переходу від π -схеми до Т-схеми виконується перетворення згідно з наступними співвідношеннями [14]:

$$X_1 = X'_{\sigma 1} \quad ; \quad X'_2 = X'_{\sigma 2} \quad ; \quad X_m = X'_m$$

де всі параметри виражаються в абсолютних одиницях, які розраховуються за формулою:

$$X_{absol} = 2\pi f \cdot L$$

Після завершення перетворення параметрів з π -схеми до Т-схеми, на основі отриманих індуктивностей і опорів проводиться числове моделювання динаміки електроприводу, що дозволяє дослідити [15]:

- Поведінку струмів у статорі та роторі;
- Динамічні переходи під час пуску та гальмування;
- Залежність швидкості та моменту від навантаження.

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{(\bar{x}_\mu)^2 + 4 \cdot \bar{x}_1^{\parallel} \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{4.1 + \sqrt{5.7^2 + 4 \cdot 0.086 \cdot 4.1}}{2 \cdot 4.1} = 1.0206 \quad (3.11)$$

$$\bar{X}_1 = \frac{\bar{X}_1^{\parallel}}{c_1} = \frac{0.086}{1.021} = 0.084 \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1^{\parallel}}{c_1} = \frac{0.014}{1.021} = 0.014 \quad (3.12)$$

$$\bar{X}_2^{\parallel} = \frac{\bar{X}_2^{\parallel}}{c_1^2} = \frac{0.12}{1.021^2} = 0.115 \quad \bar{R}_2^{\parallel} = \frac{\bar{R}_2^{\parallel}}{c_1^2} = \frac{0.014}{1.021^2} = 0.013$$

$$X_1 = \bar{X}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0843 \cdot \frac{219.393}{351.3744} = 0.0526 \text{ Ом}$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0137 \cdot \frac{219.393}{351.3744} = 0.0086 \text{ Ом}$$

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						35
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_2^{\downarrow} = \bar{X}_2^{\downarrow} \frac{U_n}{I_n} = 0.1152 \cdot \frac{219.393}{351.3744} = 0.0719 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \bar{R}_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.0134 \cdot \frac{219.393}{351.3744} = 0.0084 \text{ Ом}$$

$$X_{\mu} = \bar{X}_1 \frac{U_n}{I_n} = 4.1 \cdot \frac{219.393}{351.3744} = 2.56 \text{ Ом}$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.052616}{314.159} = 1.67 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.12)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2^{\downarrow}}{\omega_0} = \frac{0.071939}{314.159} = 2.29 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{\omega_0} = \frac{2.559981}{314.159} = 8.149 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.13)$$

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 8.149 \cdot 10^{-3} + 1.67 \cdot 10^{-4} = 8.361 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.14)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 8.149 \cdot 10^{-3} + 2.29 \cdot 10^{-4} = 8.378 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.00839}{0.00838} = 1.00181 \text{ Ом/Гн} \quad (3.15)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.008565}{0.008316} = 1.02997 \text{ Ом/Гн}$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.008316 \cdot \left(1 - \frac{(0.008149)^2}{0.008316 \cdot 0.008378} \right) = 3.902 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.16)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2} = \frac{8.149 \cdot 10^{-3}}{0.008378 \cdot 0.00039} = 2492.673592 \text{ Ом/Гн} \quad (3.17)$$

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						36
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot \beta \cdot L_m = \frac{0.00857}{0.00039} + 1.00181 \cdot 0.00815 \cdot 2492.67359 = 42.29943 \text{ Ом/Гн (3.18)}$$

$$\mu = \frac{3 \cdot p \cdot L_m}{2 \cdot L_2} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 8.15 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.00838} = 5.836 \quad (3.19)$$

Як правило, конструктивна схема частотного перетворювача передбачає його поділ на дві ключові функціональні частини: силову та керуючу.

Цей модуль виконує функцію безпосередньої трансформації електричної енергії та складається з таких основних компонентів [16]:

- Вхідний фільтр - здійснює попередню фільтрацію напруги мережі, зменшуючи високочастотні перешкоди, що можуть виникати як від навантаження, так і від самого перетворювача;
- Некерований (напівпровідниковий) випрямляч - призначений для перетворення змінного струму у постійний, створюючи базу для подальшої інвертації;
- Ланцюг зарядки фільтруючих конденсаторів - забезпечує контрольований запуск системи, запобігаючи перенавантаженню;
- Ємнісний фільтр випрямленої напруги - виконує роль згладжувача пульсацій напруги в ланці постійного струму;
- Клампер - вузол обмеження перенапруг, який захищає силову частину при різких змінних навантаженнях або аварійних ситуаціях;
- Датчики напруги і струму в ланці постійного струму - забезпечують необхідну зворотну інформацію для контролера;
- Інвертор - ключовий функціональний блок, що формує керовану змінну напругу заданої частоти й амплітуди для живлення електродвигуна;
- Системи драйверів силових ключів та гальванічна розв'язка - відповідають за коректне відкриття/закриття транзисторів інвертора і ізоляцію керуючих сигналів;
- Стабілізоване джерело живлення сигової та керуючої електроніки.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Центральна обчислювальна частина системи базується на цифровому сигнальному процесорі (ЦСП) або мікроконтролері з високою обчислювальною потужністю, що відповідає за [16]:

- Обробку сигналів зворотного зв'язку;
- Формування керуючих імпульсів для інвертора;
- Реалізацію алгоритмів ПІ-регулювання, векторного керування або скалярного методу.

До складу керуючої частини також входять [16]:

- Інтерфейсні вузли узгодження сигналів (аналогово-цифрові та цифрово-аналогові перетворювачі, логічні узгоджувачі рівнів);
- Внутрішня пам'ять для збереження параметрів налаштувань і діагностичних даних;
- Системи аварійного реагування та діагностики несправностей.

Для виконання розрахунків, що стосуються визначення ключових параметрів елементів частотного перетворювача, перш за все необхідно задати і врахувати ряд вхідних технічних характеристик. Ці параметри формують основу для побудови електричної моделі перетворювального пристрою та вибору відповідних компонентів.

До необхідного вихідного набору відносяться такі значення [17]:

- Номінальна напруга мережі живлення — визначає рівень вхідного електричного потенціалу, що подається на силову частину перетворювача;
- Кількість фаз мережі - зазвичай становить три (трифазна мережа), що важливо для симетричного живлення асинхронного двигуна;
- Номінальна потужність електродвигуна - один із базових параметрів, який визначає загальну енергетичну спроможність системи;
- Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна - враховується для точного розрахунку реального споживання енергії при заданій потужності;
- Номінальний струм, який споживає двигун - необхідний для підбору силових компонентів перетворювача (тиристорів, діодів, трансформаторів струму тощо).

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково, для точного розрахунку роботи інверторної частини, визначаються такі параметри [18]:

- Фазні діючі значення напруги та струму на обмотках статора - дають змогу оцінити режим роботи машини та рівень електромагнітних навантажень;
- Амплітудні (пікові) значення фазної напруги та струму - використовуються у моделюванні гармонічних складових та визначенні допустимих перевантажень по струму;
- Частота мережі (зазвичай 50 Гц в Україні) - береться до уваги при налаштуванні інвертора на відповідну частоту вихідного сигналу.

Зазначені параметри стають основою для виконання повного розрахунку силової частини частотного перетворювача, визначення режимів роботи інвертора, а також оцінки навантажувальної здатності всієї системи електроприводу [19].

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}, \quad (3.20)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.92} = 366 \text{ А}. \quad (3.21)$$

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 \approx 311 \text{ В}, \quad (3.22)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 365.979 = 517.572 \text{ А}. \quad (3.23)$$

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} \cdot P_n}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1.4 \cdot 200 \cdot 10^3}{540 \cdot 0.94 \cdot 0.95} = 580.648 \text{ А}, \quad (3.24)$$

$$U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} = \sqrt{2} \cdot 380 = 537.401 \approx 540 \text{ В}. \quad (3.25)$$

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{ce} = 1.5U_{dc\max} = 1.5 \cdot 800 = 1200, \text{ В.} \quad (3.26)$$

$$I_{VD} > I_{\max}, U_{VD\max} > U_{ce},$$

$$I_{VD} = 600 \text{ А} > I_{\max} = 580 \text{ А}, \quad U_{VD\max} = 1200, \text{ В} \geq U_{ce} = 1200.$$

$$I_{\max} = k_{ovl} I_{na} = 1.4 \cdot 580 = 804.35 \text{ А.} \quad (3.27)$$

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{580} = 0.931 \text{ Ом.} \quad (3.28)$$

$$C = \frac{1}{2\pi k_p mf R_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.045 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0.93} = 253000 \text{ мкФ.} \quad (3.29)$$

Один із ключових елементів захисту силової частини частотного перетворювача – це зарядний (обмежувальний) резистор, який виконує надзвичайно важливу роль під час початкової фази запуску пристрою. Його основне завдання полягає в обмеженні пускового струму, який виникає в момент підключення перетворювача до мережі змінного струму. Такий обмежувальний захід запобігає надмірному імпульсному струму, що міг би спричинити перевантаження або навіть пошкодження діодів у випрямлячі [17].

При першому вмиканні перетворювача ємнісні елементи фільтру ланки постійного струму мають нульову напругу, і на них подається зарядний струм, що природно прагне до дуже високого значення. Щоб уникнути значного кидка струму через діодний міст, цей струм у перші мілісекунди проходить через зарядний резистор, який тимчасово включається в коло.

У процесі зарядки напруга на фільтрувальних конденсаторах поступово зростає. Коли ця напруга досягає заздалегідь встановленого порогового значення (що визначається алгоритмом контролера), система формує команду на вмикання зарядного реле. Це реле виконує функцію шунтування зарядного

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

резистора, виводячи його з кола, після чого подальша робота випрямляча відбувається вже без його участі, що забезпечує нормальну провідність основної енергетичної гілки [20].

Таким чином, застосування зарядного резистора дозволяє ефективно захистити силові компоненти перетворювача частоти від шкідливих струмових перевантажень у момент пуску, забезпечуючи довговічність і надійність усієї системи.

$$R_z = \frac{U_{dcn}}{(0.8 \div 0.9) I_{vdn}} = \frac{540}{0.8 \cdot 530.42} = 1.27 \text{ Ом} . \quad (3.30)$$

У цьому розділі було проведено комплексний технічний аналіз, який охоплював визначення необхідної потужності приводу та відповідний вибір електродвигуна, що найкраще відповідає заданим початковим параметрам та умовам експлуатації. Після того як було обрано оптимальний тип електричної машини, виконано обчислення її електромагнітних і динамічних характеристик, що є необхідною підготовкою для подальшого створення математичної моделі системи в середовищі MATLAB Simulink [19].

Отримані результати розрахунків лягли в основу формування вхідних даних для моделювання, яке буде виконано у наступному розділі роботи. Це дозволяє забезпечити максимальну відповідність моделі реальним умовам експлуатації системи та гарантувати достовірність результатів симуляції.

Крім того, в даному розділі було реалізовано вибір силових частини системи, включаючи обґрунтування типу частотного перетворювача (інвертора) відповідно до обраного електродвигуна. Проведено розрахунок ключових параметрів елементної бази, зокрема вхідного фільтра, випрямляча, конденсаторів фільтра постійного струму, зарядного резистора, системи захисту, а також інвертора як такого.

На завершення, виконано аналіз ринку з метою вибору апаратної реалізації силового контуру - шляхом порівняння характеристик продукції провідних світових виробників, таких як Siemens, ABB, Schneider Electric,

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						41
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Danfoss, Mitsubishi Electric тощо. Це дало змогу підібрати найбільш ефективні та технічно обґрунтовані рішення, які забезпечують відповідність проекту як технічним, так і економічним вимогам [20].

В результаті проведеного енергетичного аналізу навантаження було здійснено вибір електричного двигуна, що відповідає розрахованій потужності. З урахуванням технічних характеристик системи, умов експлуатації та режимів роботи, оптимальним варіантом було обрано асинхронний двигун типу 4A355M4Y3 з номінальною потужністю 200 кВт. Цей електродвигун забезпечує необхідний обертальний момент і стійку роботу у всьому передбаченому діапазоні навантажень.

Паралельно з цим було здійснено детальний розрахунок електромагнітних і частотних параметрів обраного електродвигуна, що є необхідною базою для створення математичної моделі електромеханічної системи. Ці розрахункові дані включають визначення номінальної та критичної швидкостей обертання, моментів, струмів, напруг, а також інших характеристик, необхідних для побудови достовірної симуляції в середовищі MATLAB/Simulink.

Також було виконано повноцінне технічне обґрунтування та розрахунок компонентів силового контуру, що включає в себе вибір схеми живлення, силових елементів, фільтрації, захисту та систем керування. На основі технічного аналізу та порівняння параметрів обладнання різних виробників, для керування даним електродвигуном було обрано частотний перетворювач моделі ACS580-01-363A-4+B056 від компанії ABB [21].

Цей перетворювач має наступні ключові характеристики [20]:

- Номінальна потужність (P_n): 200 кВт
- Номінальний вихідний струм (I_{2n}): 363 А
- Клас захисту корпусу: IP55, що забезпечує надійну роботу навіть в умовах підвищеної запиленості та вологості
- Клас електромагнітної сумісності (ЕМС): С2, що відповідає сучасним вимогам до індустріального електрообладнання.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазначене обладнання повністю відповідає критеріям енергоефективності, стабільності роботи при динамічних навантаженнях і забезпечує необхідну точність керування параметрами електроприводу, що дозволяє інтегрувати його до складу високотехнологічної системи автоматизованого управління.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						43
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Нижче представлено функціональну структурну схему замкненого контуру системи автоматизованого управління роботою ескалатора. Дана схема ілюструє взаємодію основних функціональних елементів системи керування, включаючи виконавчі механізми, датчики зворотного зв'язку, блоки регулювання та контролю, а також джерела командних сигналів. Система працює за принципом зворотного зв'язку, що дозволяє забезпечити стабільну, безпечну та адаптивну роботу ескалаторного комплексу відповідно до заданих режимів експлуатації [23].

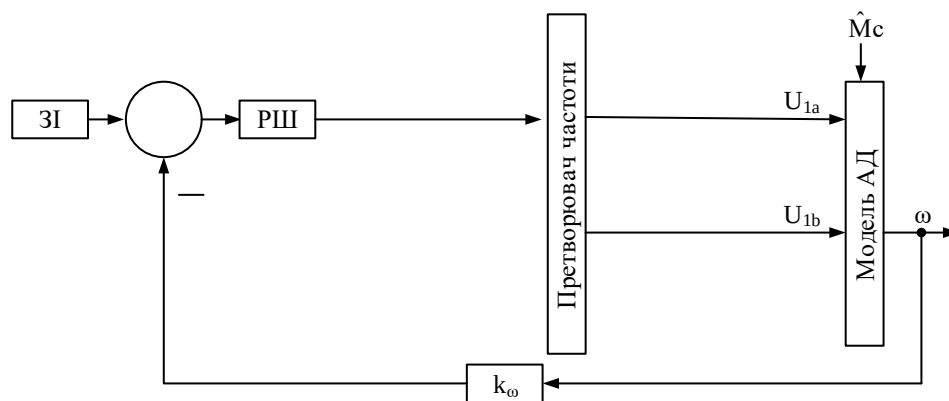


Рисунок 4.1 – Функціональна схема управління.

Для побудови адекватної математичної моделі асинхронного двигуна (АД) у системі координат α - β (альфа-бета), що є ортогональною двовимірною системою, доцільно скористатися підходом, заснованим на перетвореннях Кларка та Кирхгофових законах електричних кіл.

З метою опису динаміки електричних процесів у фазних обмотках статора і ротора, вихідною базою слугують рівняння електромагнітної рівноваги, сформульовані у вигляді законів Кірхгофа для електричних контурів. Ці рівняння дозволяють врахувати як миттєві значення струмів та напруг у фазах, так і взаємозв'язок між ними, що є критичним для точного моделювання перехідних режимів роботи машини [22].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						44
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехід до координат α - β забезпечує спрощення моделі за рахунок зменшення кількості диференціальних рівнянь та усунення залежності від кутової позиції ротора в початковій фазі. Це дозволяє більш ефективно реалізовувати модель у середовищах чисельного моделювання (наприклад, MATLAB Simulink), а також спрощує розробку систем керування.

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= R_1 \cdot \vec{i}_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt}; \\ \vec{U}_2 &= R_2 \cdot \vec{i}_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2,\end{aligned}\quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}\vec{\psi}_1 &= L_1 \cdot \vec{i}_1 + L_m \cdot \vec{i}_2; \\ \vec{\psi}_2 &= L_2 \cdot \vec{i}_2 + L_m \cdot \vec{i}_1.\end{aligned}\quad (4.2)$$

$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \cdot \vec{i}_1}{L_2}; \quad (4.3)$$

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \cdot \vec{i}_1 + L_m \left(\frac{\vec{\psi}_2 - L_m \cdot \vec{i}_1}{L_2} \right) = \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \cdot \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{\psi}_2. \quad (4.4)$$

$$\vec{U}_2 = R_2 \cdot \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \cdot \vec{i}_1}{L_2} + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2. \quad (4.5)$$

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \cdot \vec{\psi}_2 + J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2 + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1 + \vec{U}_2. \quad (4.6)$$

$$\vec{U}_1 = R_1 \cdot \vec{i}_1 + \frac{d}{dt} \left(\left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \cdot \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{\psi}_2 \right); \quad (4.7)$$

$$\vec{U}_1 = R_1 \cdot \vec{i}_1 + \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \cdot \frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{d\vec{\psi}_2}{dt}, \quad (4.8)$$

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{d\vec{i}_1}{dt} = -\frac{R_1 \cdot \vec{i}_1}{\sigma} - \frac{L_m}{\sigma L_2} \cdot \left(-\frac{R_2}{L_2} \cdot \vec{\psi}_2 + J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2 + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1 + \vec{U}_2 \right) + \frac{\vec{U}_1}{\sigma}. \quad (4.9)$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2},$$

$$\frac{d\vec{i}_1}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} \cdot \vec{i}_1 - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot \vec{i}_1 + \alpha \cdot \beta \cdot \vec{\psi}_2 - \beta \cdot J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2 - \beta \cdot \vec{U}_2 + \frac{\vec{U}_1}{\sigma}; \quad (4.10)$$

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = -\alpha \cdot \vec{\psi}_2 + J \cdot \omega \cdot p_n \cdot \vec{\psi}_2 + \alpha \cdot L_m \cdot \vec{i}_1 + \vec{U}_2. \quad (4.11)$$

З метою подальшої побудови математичної моделі електромеханічної системи, доцільно перейти до формального запису похідних за часом для основних змінних, що характеризують електромагнітні процеси в асинхронному двигуні. Зокрема, мова йде про тимчасові похідні струмів у фазах обмотки статора та потокозчеплення в контурі ротора.

На основі раніше отриманих виразів, що описують взаємозв'язки між напругами, струмами, індуктивностями та потокозчепленнями у відповідних обмотках, формулюємо систему диференціальних рівнянь у вигляді [24]:

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1a} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1a} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2a} + \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} - \beta \cdot U_{2a} + \frac{U_{1a}}{\sigma};$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1b} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1b} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2b} - \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} - \beta \cdot U_{2b} + \frac{U_{1b}}{\sigma}; \quad (4.12)$$

$$\frac{d\psi_{2a}}{dt} = -\alpha \cdot \psi_{2a} - \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1a} + U_{2a};$$

$$\frac{d\psi_{2b}}{dt} = -\alpha \cdot \psi_{2b} + \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1b} + U_{2b}. \quad (4.13)$$

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						46
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У рамках векторного підходу до опису асинхронного електроприводу в двофазній ортогональній системі координат (α - β), рівняння електромагнітного моменту, що генерується електромеханічним перетворювачем енергії, формулюється з урахуванням взаємодії між потокозчепленням ротора та струмами статора. Такий підхід дозволяє більш наочно досліджувати процеси, що відбуваються в асинхронній машині, особливо при моделюванні в режимах, далеких від усталеного.

Електромагнітний момент, створюваний двигуном, може бути записаний у такому вигляді [25]:

$$\begin{aligned} M &= L_m \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{i}_2 = \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot (\vec{\psi}_2 - L_m \cdot \vec{i}_1) = \\ &= \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{\psi}_2 - \frac{L_m^2}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{i}_1. \end{aligned} \quad (4.14)$$

У зв'язку з тим що $\vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{i}_1 = 0$, ми отримуємо

$$\begin{aligned} M &= \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{\psi}_2 = \frac{L_m}{L_2} \cdot (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot i_{1a}). \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot i_{1a}) - M_c \right]; \\ \frac{di_{1a}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1a} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1a} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2a} + \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1b} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1b} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2b} - \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \cdot \psi_{2a} - \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1a}; \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \cdot \psi_{2b} + \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1b}, \end{aligned}$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}, \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, \quad L_1 = L_m + L_{1\sigma}, \quad L_2 = L_m + L_{2\sigma}.$$

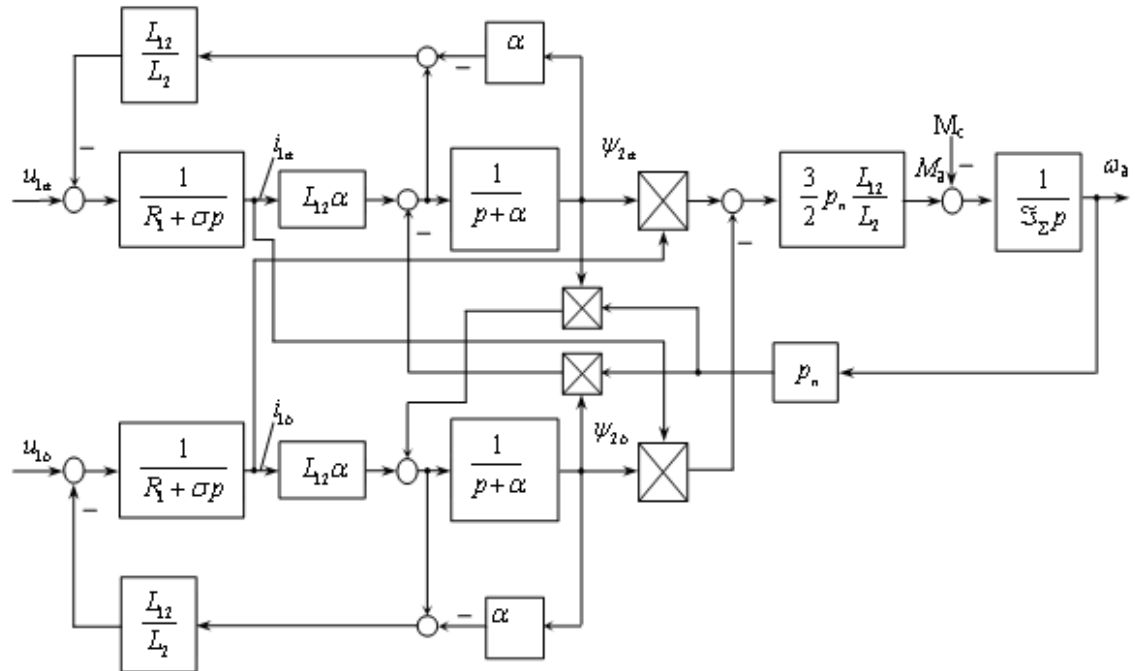


Рисунок 5.2. - Структурна схема АД

$$k' = \frac{U_{m1} - U_0}{f_1^2} = \frac{310 - 18.6}{50^2} = 0.1166 \quad (4.16)$$

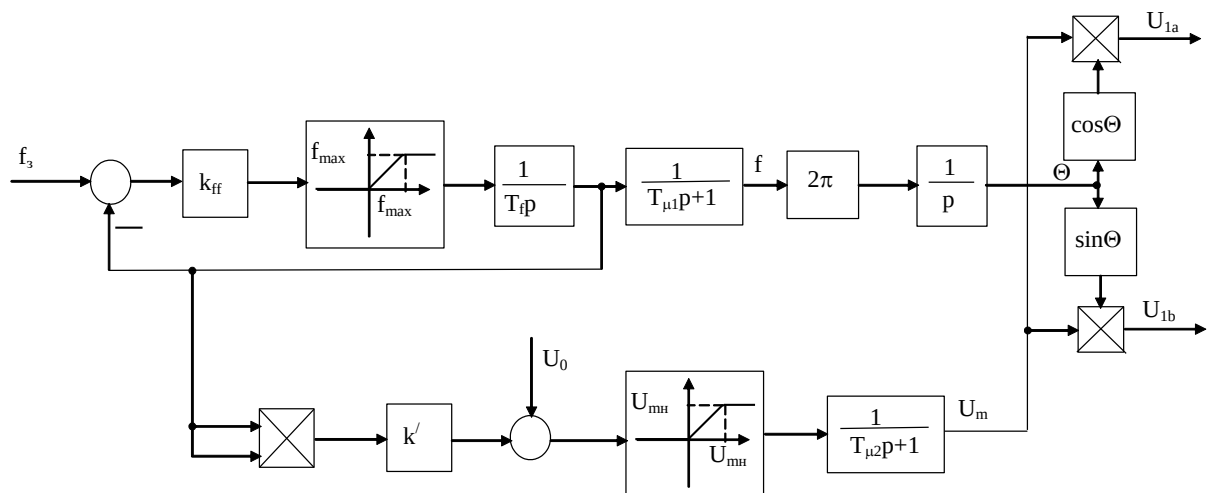


Рисунок 5.3 - Перетворювача частоти

У випадках, коли відкрита система автоматичного керування не забезпечує достатнього рівня точності регулювання у сталому режимі, що є критично важливим для стабільності технологічного процесу, виникає необхідність запровадження зворотного зв'язку за контрольованим параметром - тобто формування замкненого контуру регулювання. Такий підхід дозволяє суттєво знизити похибки та компенсувати вплив зовнішніх збурень або внутрішніх нелінійностей [20].

Сучасні частотно-регульовані електроприводи, оснащені вбудованими модулями цифрового керування, як правило, підтримують підключення сигналу зворотного зв'язку безпосередньо від технологічного сенсора (наприклад, енкодера, тахогенератора, датчика тиску чи температури). Вбудований ПД-регулятор у складі такого інтелектуального перетворювача дозволяє реалізувати ефективне замкнене керування частотою або швидкістю обертання виконавчого механізму [21].

Однак при переході до такого режиму керування втрачається можливість використання окремого механізму формування S-подібної (плавної) траєкторії наростання частоти, оскільки частотний перетворювач уже безпосередньо керується з урахуванням зворотного сигналу. У зв'язку з цим змінюється функціональна структура системи - перетворювач частоти перестає бути самостійним модулем генерації команди, а перетворюється на виконавчу ланку у більш складному контурі автоматичного регулювання.

Модифікована структурна схема електроприводу при цьому передбачає включення ПД-регулятора в замкнений контур, у якому сигнал завдання порівнюється зі зворотним сигналом від об'єкта керування, а результат цього порівняння використовується для формування керувального впливу на перетворювач частоти [23].

.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

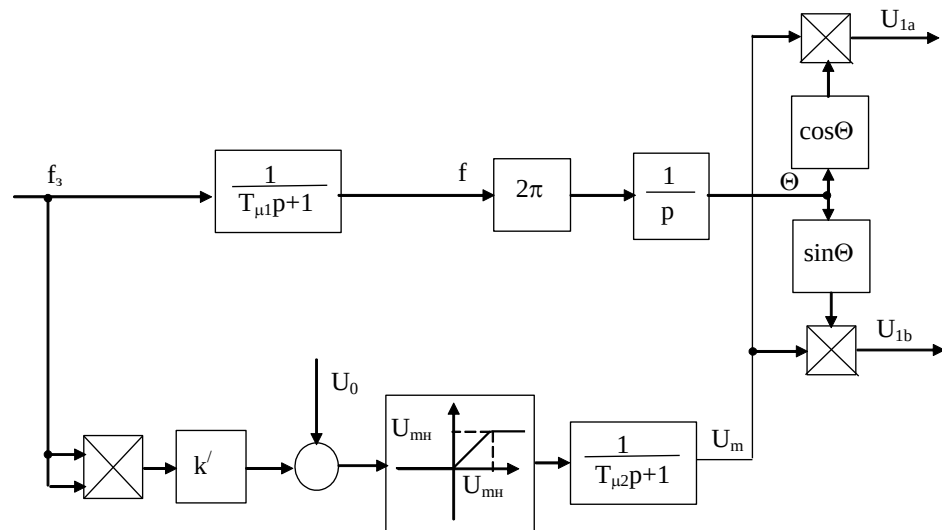


Рисунок 5.4. - Структурна схема перетворювача частоти

Передатну функцію електричного двигуна, що працює в системі автоматизованого регулювання, доцільно представити у вигляді передатної функції аперіодичної ланки першого порядку. Такий підхід відображає динамічну поведінку об'єкта керування за умов лінеаризації системи поблизу робочої точки та дозволяє враховувати інерційність виконавчого механізму при побудові моделі системи регулювання. [24]

$$W(p) = \frac{M_D}{\omega_0 - \omega} = \frac{\beta}{T_\vartheta \cdot p + 1}, \quad (4.17)$$

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_\mu \cdot p + 1} \quad (4.18)$$

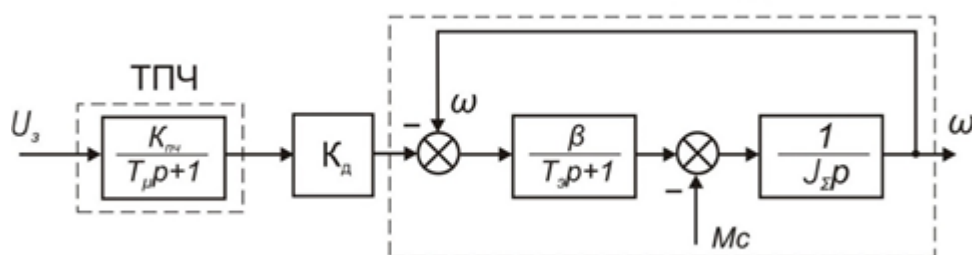


Рисунок 5.5 - Об'єкта регулювання

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{5}{0,01 \cdot p + 1}, \quad (4.19)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0C} \cdot S_{KH}} = \frac{1}{314 \cdot 0.104} = 0,031; \quad (4.20)$$

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{3.6}{2526.93} = 1.425 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (4.25)$$

$$K_d = \frac{2 \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 3,14}{4} = 1.57. \quad (4.26)$$

Проектування системи автоматичного регулювання швидкості передбачає впровадження внутрішнього зворотного зв'язку за сигналом швидкості. Такий підхід дозволяє суттєво покращити динамічні характеристики приводу, забезпечуючи підвищену точність та стабільність при змінних навантаженнях. Введення зворотного зв'язку за швидкістю формує внутрішній регулятор, який компенсує збурення та дозволяє системі оперативно реагувати на відхилення від заданого режиму, зменшуючи перехідні процеси за часом та амплітудою [20].

$$K_{\omega} = \frac{U_3}{1,3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1,3 \cdot 77.519} = 0,052 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (4.27)$$

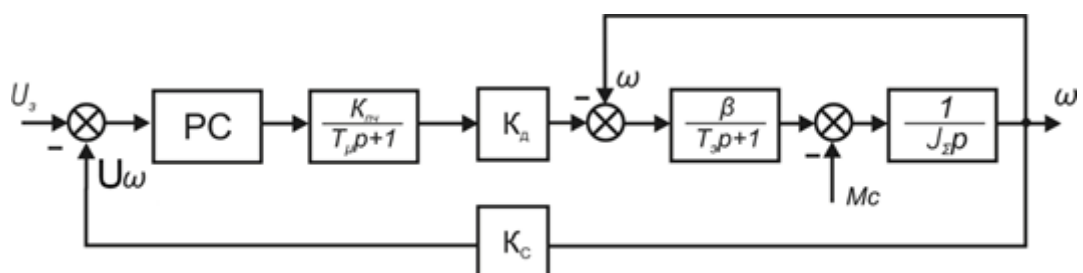


Рисунок 5.6 - Структурна схема частотного регулювання

$$\begin{aligned}
 W_d(p) &= \frac{\frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_\Theta \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_\Theta \cdot p + 1)}} = \frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot T_\Theta \cdot p^2 + J_\Sigma \cdot p + \beta} = \\
 &= \frac{K_d}{T_M \cdot T_\Theta \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \frac{1.57}{4.363 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 1.425 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}
 \end{aligned} \quad (4.28)$$

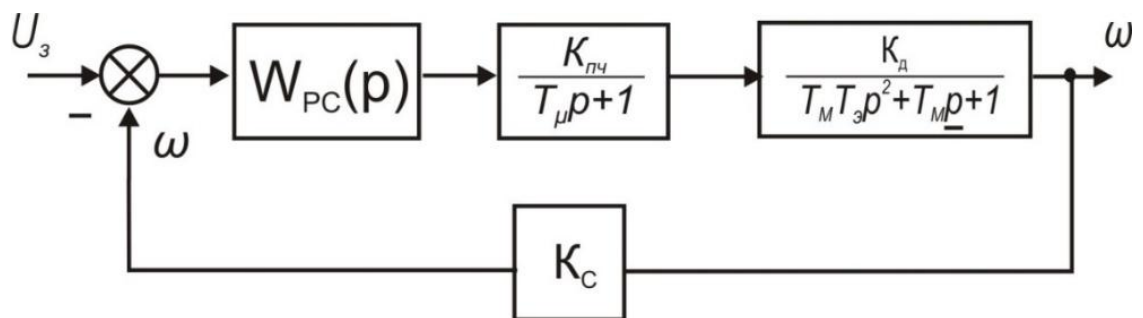


Рисунок 5.7 - Структурна схема регулювання контуру швидкості

$$\begin{aligned}
 W_{ОПШ}(p) &= \frac{K_{ПЧ} \cdot K_d}{(T_\mu \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot T_\Theta \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{5 \cdot 1.57}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (4.363 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 1.425 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}
 \end{aligned} \quad (4.29)$$

У результаті впровадження внутрішнього зворотного зв'язку вдається трансформувати відкриту (розімкнену) систему регулювання в еквівалентну за підсиленням систему, де загальний коефіцієнт передачі дорівнює одиниці. Така система моделюється за допомогою одиничного зворотного зв'язку, що дозволяє реалізувати необхідні технічні параметри регулювання. При цьому новоутворений контур характеризується властивостями астатизму першого порядку, що дає змогу ефективно компенсувати сталу складову похибки та гарантувати високу швидкодію системи. Цього ефекту досягають завдяки

зменшеним часовим сталим, що залишаються частково некомпенсованими в структурі системи, але не мають істотного впливу на динамічну стійкість і точність у перехідних режимах [25].

$$W_{PA3C}(p) = W_{OPC}(p) \cdot W_{PC}(p) = \frac{1}{T_O p \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} W_{PC}(p) &= \frac{W_{PA3C}(p)}{W_{OPC}(p)} = \frac{T_M \cdot T_{\mathcal{O}} \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \\ &= \frac{4.363 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 1.425 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{0,001155 \cdot p}, \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$W_{PC}(p) = 0,038 \cdot p + 1,234 + \frac{1}{0,001155 p}. \quad (4.32)$$

У цьому розділі було здійснено побудову математичної моделі електромеханічної підсистеми, яка забезпечує функціонування приводу підвісної канатної дороги. До складу цієї моделі входять ключові компоненти: математичне представлення асинхронного електродвигуна, модель частотного перетворювача, а також алгоритмічна реалізація контуру регулювання швидкості з використанням ПІД-регулятора.

На основі розрахованих у попередньому розділі технічних параметрів вдалося реалізувати повнофункціональну електромеханічну модель, адаптовану до специфіки обраного об'єкта керування. Окрему увагу було приділено процедурі синтезу регулятора швидкості, в результаті чого були отримані числові значення коефіцієнтів ПІД-регулятора, що забезпечують задані динамічні властивості системи [23].

Сформована модель є підґрунтям для проведення подальших імітаційних досліджень, які будуть реалізовані в наступному розділі з використанням платформи MATLAB Simulink. Мета подальшого моделювання полягає у верифікації розробленого технічного рішення, аналізі його

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк. 53
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працездатності та визначенні динамічних характеристик електромеханічної системи в умовах, наближених до реальних.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						54
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Далі зображено реалізований у середовищі моделювання зовнішній вигляд створеної електромеханічної системи. Графічна модель демонструє структуру взаємозв'язку між основними компонентами системи, що дозволяє наочно оцінити її архітектуру та функціональні вузли. Така візуалізація є важливою складовою процесу аналізу, оскільки дає змогу переконатися у правильності конфігурації елементів перед переходом до імітаційного моделювання [24].

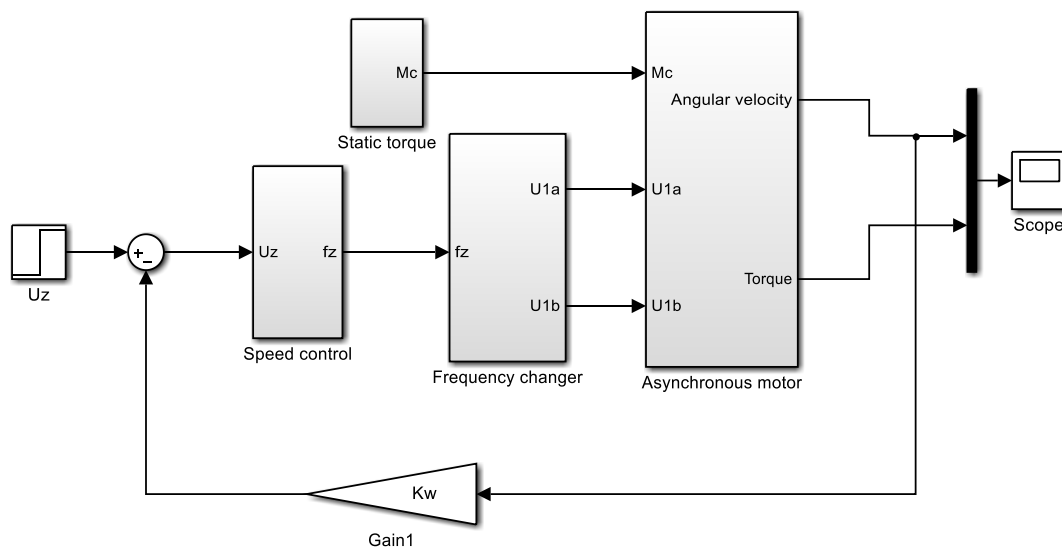


Рисунок 5.1 - Зовнішній вигляд електромеханічної системи .

Конструйована електромеханічна система включає в себе низку взаємопов'язаних функціональних блоків, кожен із яких виконує свою специфічну роль у забезпеченні стабільного та регульованого функціонування. Зокрема, блок Uz виступає у ролі задавача інтенсивності або опорного сигналу, що визначає бажану швидкість обертання. Блок Kw реалізує зворотний зв'язок за швидкістю, порівнюючи фактичну швидкість з заданою для формування сигналу регулювання [25].

Основний контур керування швидкістю представлено підсистемою Speed Control, яка координує взаємодію між різними елементами системи,

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						55
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечуючи точну адаптацію частоти обертання відповідно до технологічних вимог. Модуль Static Torque моделює дію сталого навантаження у вигляді постійного моменту, що впливає на вал електродвигуна. Компонент Frequency Changer виконує функцію перетворення частоти та амплітуди напруги для живлення асинхронного двигуна відповідно до команди регулятора. Сам електродвигун представлений у вигляді математичної моделі Asynchronous Motor, описаної в двофазній системі координат (a–b) зі сторони статора [26].

На наведеній нижче схемі зображено внутрішню структуру підсистеми Speed Control, яка відповідає за регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна відповідно до заданих параметрів. У склад цієї підсистеми входять блоки K_p та K_i , в які вводяться значення коефіцієнтів пропорційної (K_p) та інтегральної (K_i) дії, що формують основу ПІ-регулятора. Зазначені коефіцієнти були попередньо визначені в рамках аналітичного розрахунку, що проводився на попередньому етапі проєктування. Їх правильне налаштування відіграє ключову роль у забезпеченні точного та стабільного функціонування системи автоматичного керування, дозволяючи ефективно компенсувати відхилення фактичної швидкості від заданого значення та підтримувати динамічну рівновагу в електромеханічному контурі [24].

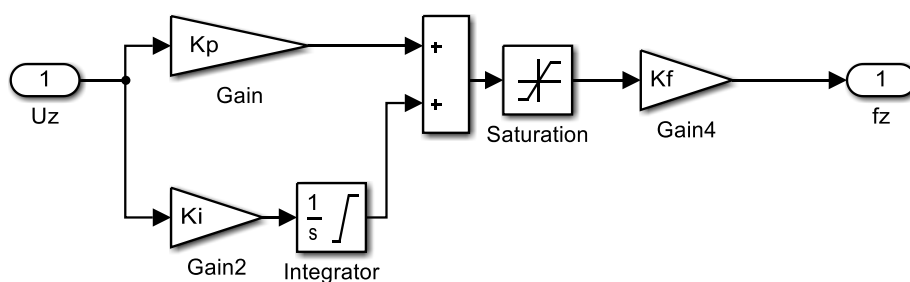


Рисунок 5.2 - Speed control.

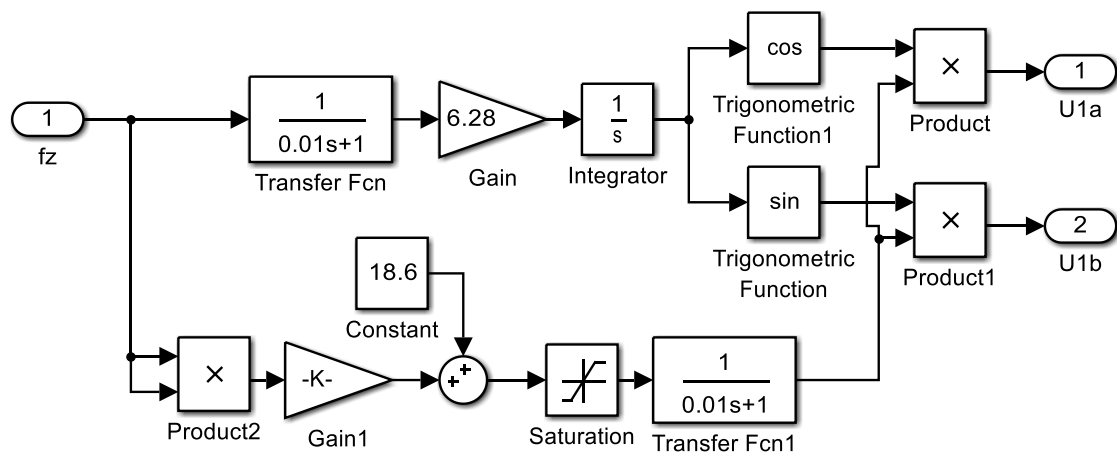


Рисунок 5.3 –Frequency changer.

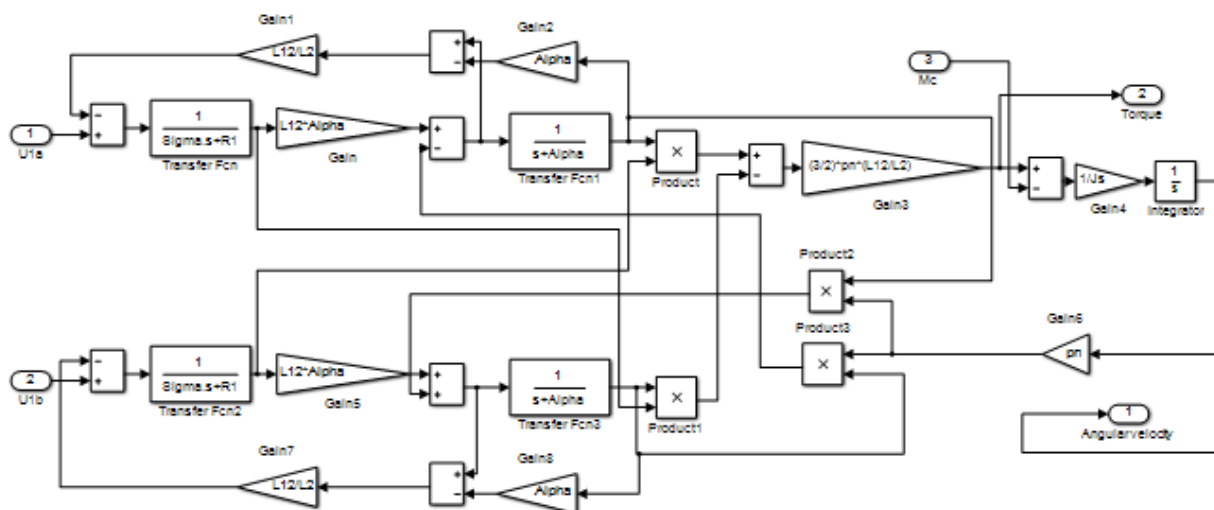


Рисунок 5.4 – Asynchronous motor.

У подальшій частині роботи представлено графічні результати моделювання перехідних процесів під час частотного запуску асинхронного двигуна, який функціонує в контурі автоматичного регулювання швидкості. В експериментальних умовах було встановлено значення бажаної кутової швидкості обертання ротора, що дорівнює $\omega = 77,4$ рад/с, а також накладено навантаження, еквівалентне номінальному значенню моменту навантаження, яке становить $M = 2580$ Н·м [22].

На відповідному графічному матеріалі наведено дванадцять характерних залежностей, які відображають основні параметри роботи електромеханічної системи. Зокрема, графіки ілюструють зміну у часі кутової швидкості ротора, моменту двигуна, модуля струму в обмотках статора, а також динаміку механічної, активної та реактивної потужності на валу двигуна.

Процес розгону електроприводу розпочинається на другій секунді та триває до четвертої секунди моделювання, що демонструє поступове досягнення встановленого режиму роботи. На п'ятій секунді в систему вводиться навантаження, що відповідає номінальному моменту, після чого, на тому ж часовому відрізку, момент миттєво скидається, і система повертається у режим холостого ходу. Таке відображення змінних дозволяє оцінити ефективність дії регулятора швидкості, а також реакцію системи на раптові зміни навантаження.

Аналізуючи отримані графіки перехідних процесів, можна зробити висновок, що система автоматичного регулювання ефективно забезпечує підтримку заданої кутової швидкості. Відхилення фактичного значення швидкості від еталонного є мінімальним - похибка становить приблизно 0,15 рад/с, що свідчить про високу точність роботи регулятора та добре налаштовану систему управління [24].

Крім того, з результатів моделювання видно, що електромеханічна система стійко витримує навантаження, еквівалентне номінальному моменту. У момент прикладання навантаження механічна потужність на виході двигуна досягає значення 200 кВт, що є очікуваним при заданих умовах. Водночас активна електрична потужність, яка споживається з мережі, становить 200,5 кВт, що підтверджує ефективну роботу перетворювача частоти та мінімальні втрати в силовому контурі.

Загалом, представлені результати демонструють стабільність роботи системи в динамічних режимах та підтверджують доцільність використання даної схеми управління в реальних умовах експлуатації підвісної канатної дороги [26].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						58
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

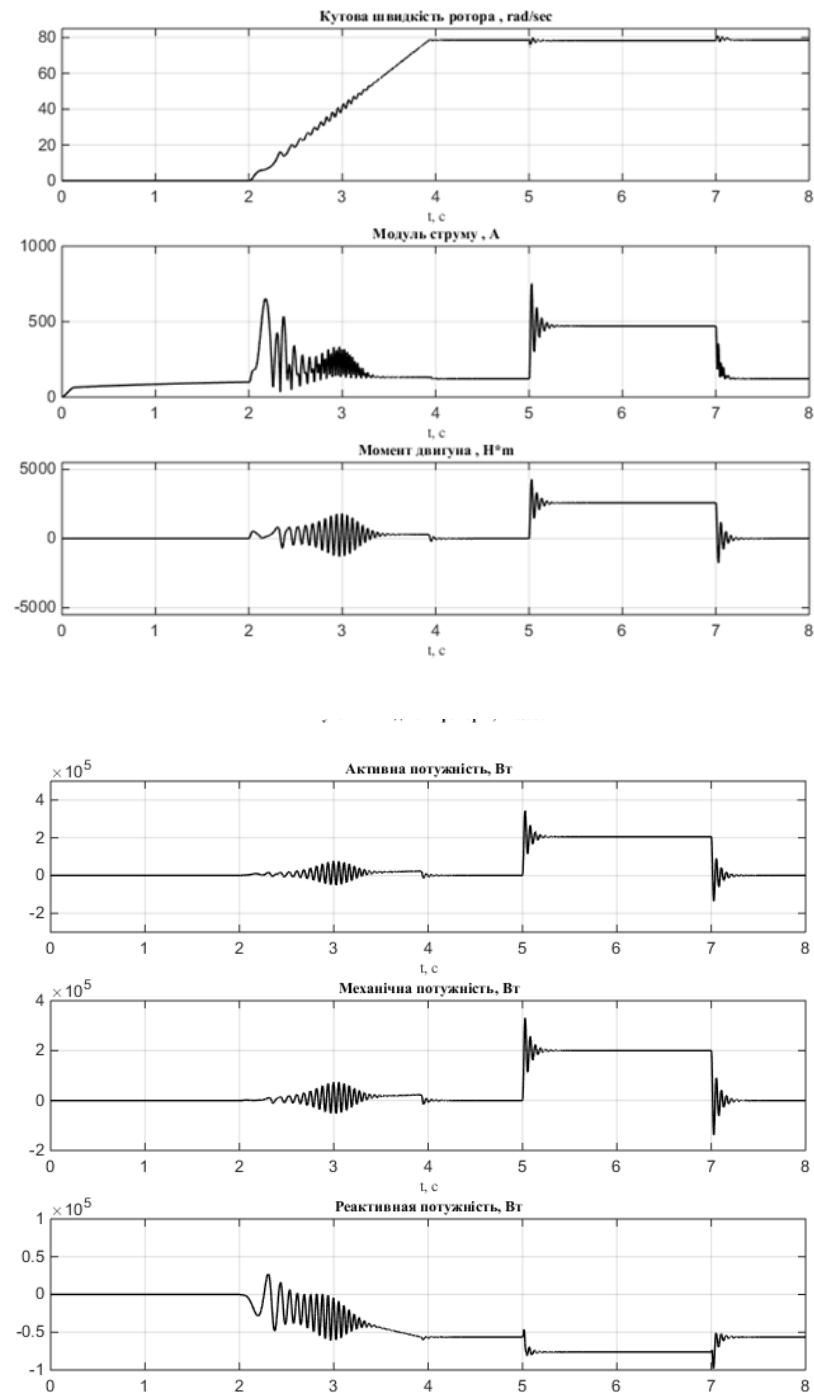


Рисунок 5.5 - Перехідних процесів частотного пуску

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_H}{\omega_H} \cdot 100\% = \frac{78.81 - 78.54}{78.54} \cdot 100\% = 0.3\%; \quad (5.1)$$

$$\psi = \left(1 - \frac{\omega_{\max 2}}{\omega_{\max 1}} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{78.6}{78.81} \right) \cdot 100\% = 0.2\%; \quad (5.2)$$

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_H}{\omega_H} \cdot 100\% = \frac{81 - 78.54}{78.54} \cdot 100\% = 3.1\%; \quad (5.3)$$

$$\psi = \left(1 - \frac{\omega_{\max 2}}{\omega_{\max 1}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{79.6}{81}\right) \cdot 100\% = 1.7\%; \quad (5.4)$$

$$\Delta\omega_{M_n} = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} \cdot 100\% = \frac{(78.54 - 77.48)}{78.54} \cdot 100\% = 1.3\% \quad (5.3)$$

З метою проведення всебічного дослідження поведінки електромеханічної системи підвісної канатної дороги в умовах змінного навантаження, було виконано моделювання її роботи в середовищі MATLAB Simulink. Для цього використано попередньо створену та апробовану математичну модель, яка описує роботу системи з урахуванням асинхронного двигуна, перетворювача частоти та контуру регулювання швидкості.

Аналіз проводився для ряду різних значень навантажувального моменту: 0.2Мн, 0.4Мн, 0.6Мн, 0.8Мн, 1.0Мн та 1.2Мн, де Мн - номінальне значення моменту. Таке варіювання дозволило оцінити динамічні й статичні характеристики системи в умовах часткового, повного та перевищеного навантаження [20].

У подальшому представлені відповідні графічні залежності основних змінних перехідного процесу, що дозволяють оцінити стійкість, динаміку, швидкодію та точність регулювання електроприводу залежно від прикладеного моменту навантаження [27].

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						60
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

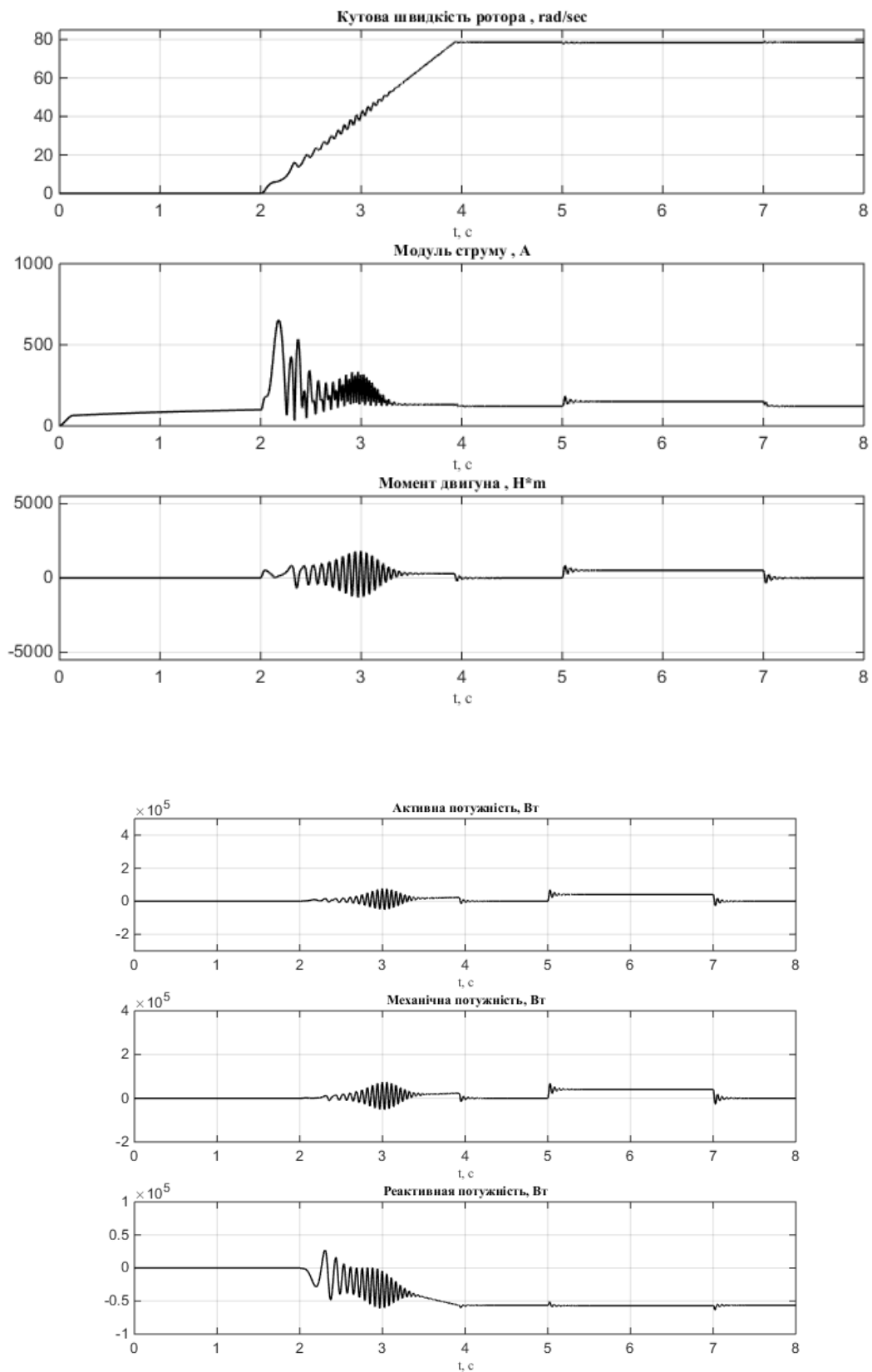


Рисунок 5.6 - Перехідні процеси пуску двигуна

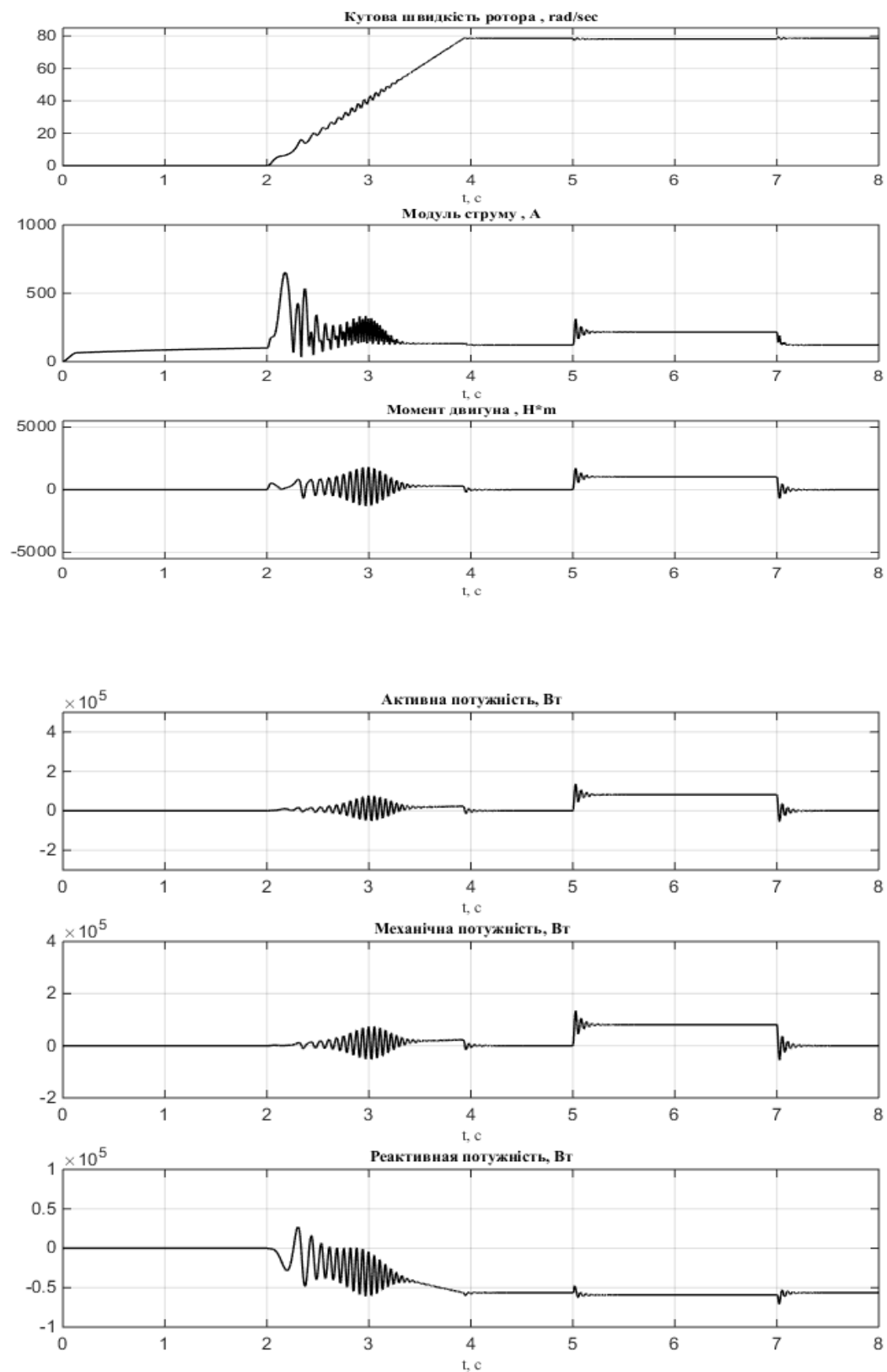


Рисунок 5.7 - Перехідні процеси частотного пуску двигуна

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕМКС 191002 000 ПЗ

Арк.
62

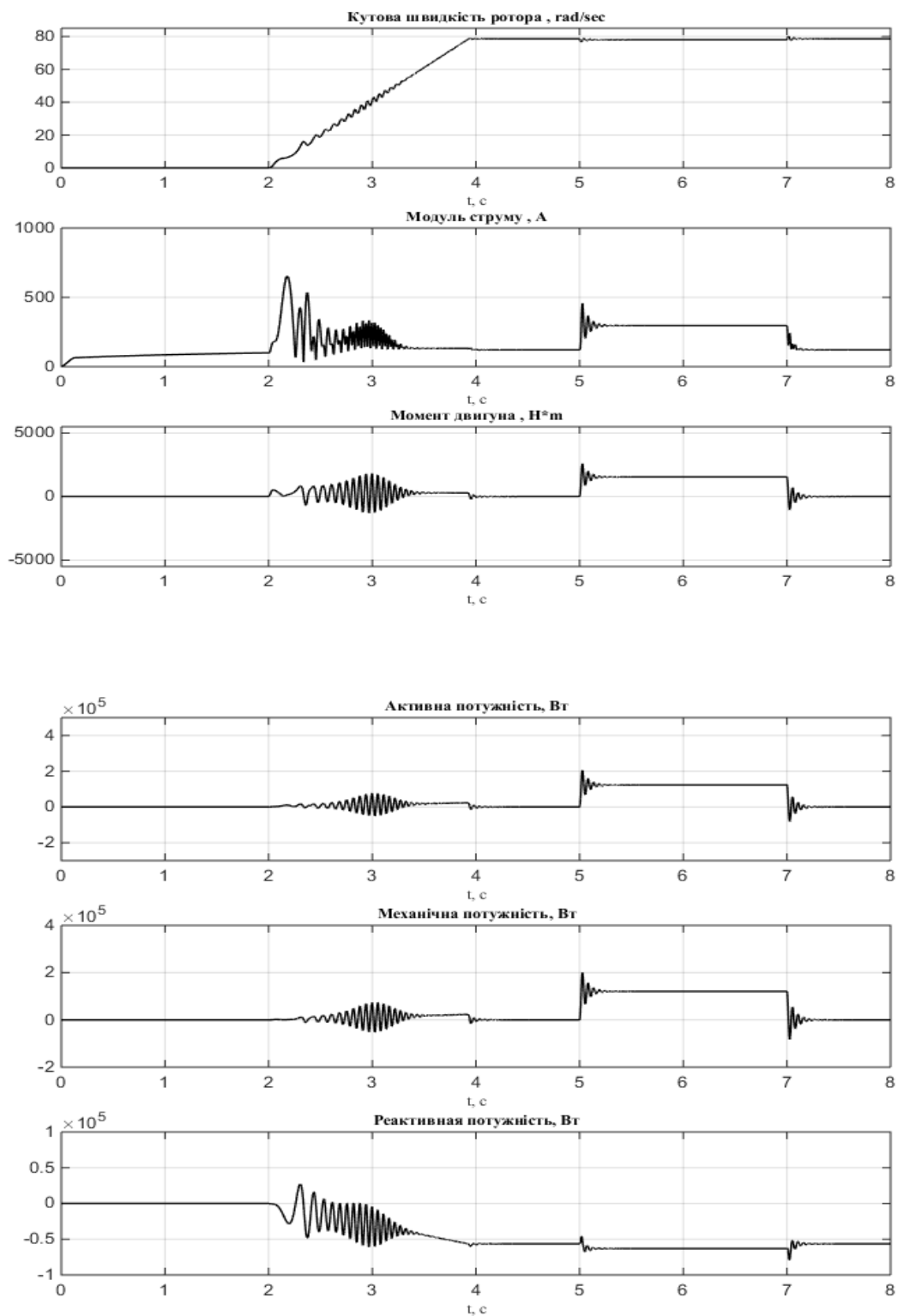


Рисунок 5.8 - Перехідні процеси частотного пуску двигуна

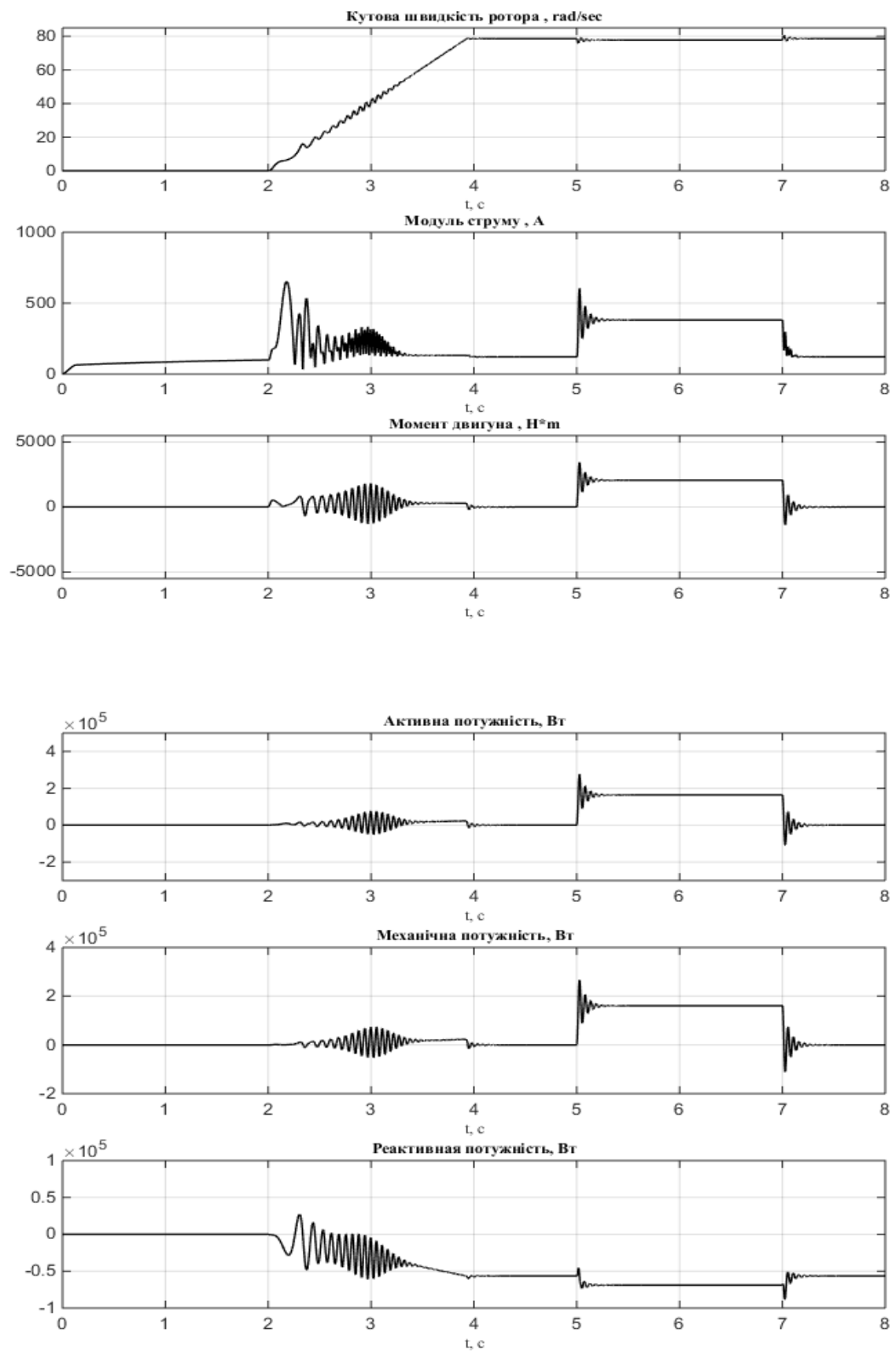


Рисунок 5.9 - Перехідні процеси

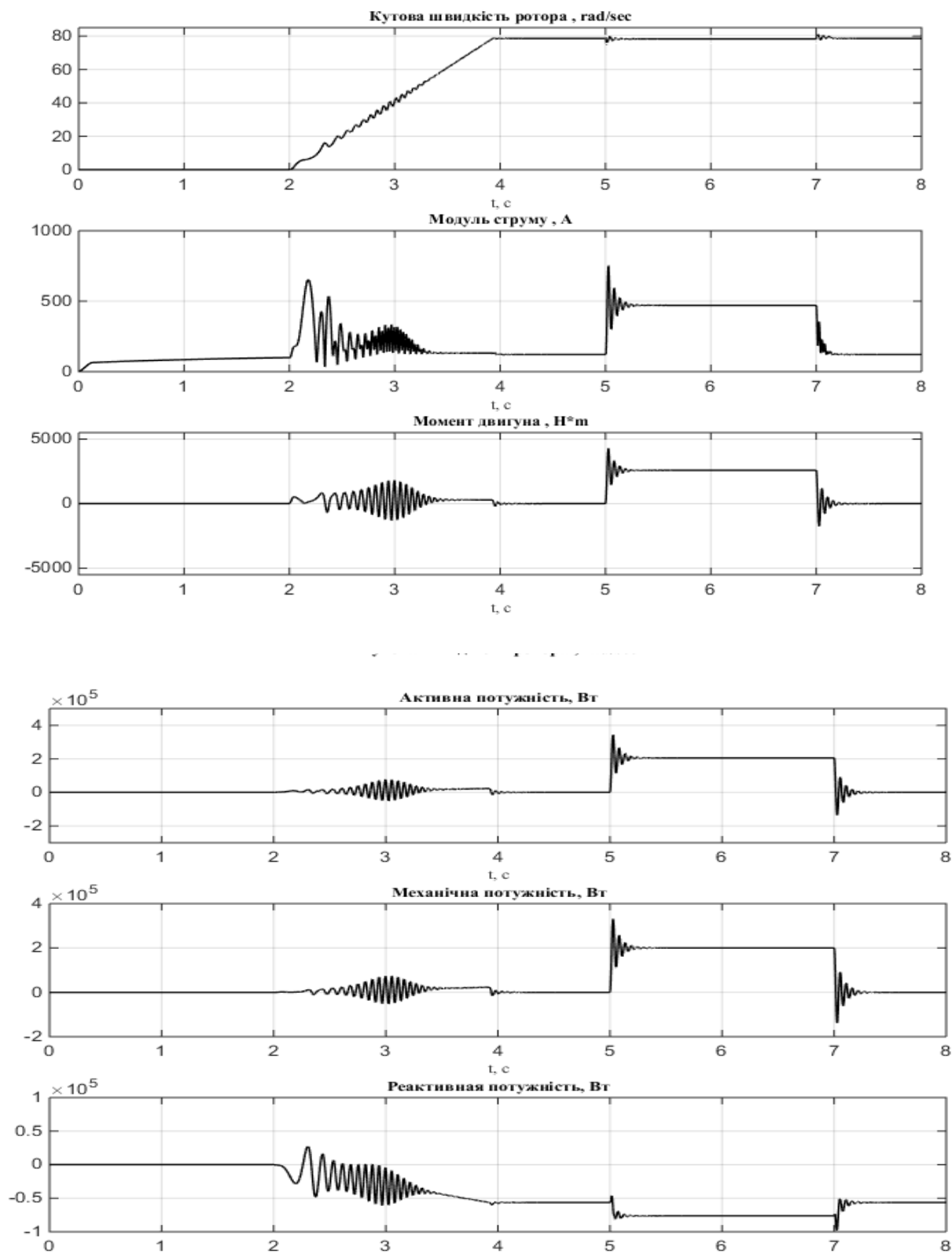


Рисунок 5.10 - Перехідні процеси

У цьому розділі було здійснено детальне моделювання та аналіз поведінки електромеханічної системи підвісної канатної дороги в середовищі MATLAB Simulink на основі побудованої математичної моделі. Дослідження охоплювало оцінку динамічних і статичних режимів функціонування системи при різних значеннях прикладеного статичного навантажувального моменту: $0.2M_n$, $0.4M_n$, $0.6M_n$, $0.8M_n$, $1.0M_n$ та $1.2M_n$, де M_n позначає номінальний момент двигуна.

Аналіз отриманих графіків перехідних процесів дозволив зробити висновок, що система ефективно виконує задану команду керування, демонструючи стабільну та надійну роботу у всьому діапазоні розрахованих навантажень. Особливу увагу було приділено визначенню показників якості автоматичного регулювання, таких як ступінь перерегулювання, рівень коливальності та статична похибка швидкості в моменти прикладення навантаження [27].

Результати симуляцій свідчать, що система демонструє задовільні динамічні характеристики, оскільки всі вищезазначені параметри залишаються в межах допустимих норм і не перевищують 5% порогу, що відповідає вимогам до точності та якості сучасних електромеханічних систем такого типу.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						66
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було підтверджено актуальність і доцільність застосування електромеханічних систем регулювання швидкості з використанням асинхронного електродвигуна в поєднанні з частотним перетворювачем у сучасних технічних умовах. У вступній частині було окреслено загальні тенденції розвитку таких систем, обґрунтовано їх ефективність у забезпеченні високої продуктивності, надійності, енергоефективності та адаптивності до змін умов експлуатації, що є особливо важливим для підвісних канатних доріг [25].

1. Аналіз літературних джерел дав змогу сформувати цілісне уявлення про типові конструктивні рішення, основні елементи та функціональні вузли електромеханічних систем керування швидкістю. Зокрема, було уточнено вимоги, що висуваються до систем із асинхронними двигунами та частотними перетворювачами, які безпосередньо впливають на ефективність та стабільність роботи системи.

2. На основі аналізу сучасних реалізацій електроприводу у підвісних канатних дорогах було встановлено, що найбільш поширеним і технічно виправданим варіантом є система на базі частотного перетворювача і асинхронного двигуна (ПЧ–АД). Це дозволило обґрунтовано обрати зазначену комбінацію як оптимальне рішення для реалізації поставленої задачі.

3. У ході розрахункової частини було проведено вибір потужності електродвигуна згідно з вимогами заданого технологічного процесу. В результаті було підібрано двигун 4A355M4Y3 номінальною потужністю 200 кВт. Паралельно було здійснено розрахунок параметрів елементів силового кола та вибрано частотний перетворювач ACS580-01-363A, що забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики.

4. Було сформовано математичну модель електромеханічної системи, яка включає в себе асинхронний двигун, частотний перетворювач та П-регулятор швидкості. Модель реалізовано у середовищі MATLAB Simulink, що дозволило змодельовати перехідні процеси системи в динаміці. Було проведено

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						67
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

симуляції для різних значень прикладеного моменту навантаження (від 0.2Мн до 1Мн), що дало змогу оцінити точність відпрацювання завдання та стабільність системи.

5. На основі аналізу результатів моделювання встановлено, що система демонструє високу якість регулювання: статична похибка швидкості не перевищує 1.3%, перерегулювання становить 3.7%, а максимальна коливальність – 7%. Ці значення свідчать про ефективну роботу регулятора та надійну динамічну поведінку всієї електромеханічної системи.

У межах даної бакалаврської кваліфікаційної роботи була повноцінно розроблена, математично змодельована та досліджена електромеханічна система регулювання швидкості на базі асинхронного двигуна з частотним перетворювачем. Отримані результати підтверджують відповідність системи технічним вимогам, її стабільність та придатність до впровадження у реальних об'єктах канатного транспорту.

					ЕМКС 191002 000 ПЗ	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		