

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 керування положенням із векторно-керуваним асинхронним двигуном»

Виконав(ла)

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

Станіслав МИХАЛЕЦЬ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

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

_____ (підпис)

Рецензент роботи

д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ
(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 ПОЗИЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ІЗ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ	9
2	СИНТЕЗ ЕТАЛОННИХ ТРАЄКТОРІЙ ВИКОНАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ	29
3	ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	38
4	АСПЕКТИ ПРАКТИЧНОЇ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ СИСТЕМ ПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ	58
	Висновки	67
	Список використаних джерел	69
	Додатки	71

					ЕМКС 010005 000 ПЗ		
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Михалець С.В.			Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		Кобилянський				6	
Т. контр.					БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БЗ-Е21		
Н. Контр.		Кобилянський					
Затверд.		Кузнецов Б.І.					

ВСТУП

Позиційний електропривод призначений для точного керування просторовим положенням виконавчого елемента технологічного або механічного обладнання. Його основною функцією є переміщення виконавчого органу з початкової координати до заданої точки з подальшою стабілізацією положення з визначеним рівнем точності [1].

У режимі малого сигналу, тобто при незначних відхиленнях від заданого положення, робота позиційного електропривода визначається динамікою всіх залучених регуляторів у межах лінійних ділянок їхніх статичних характеристик. Такий режим дозволяє лінеаризувати поведінку системи та здійснювати її аналітичний опис, що є важливим етапом при проектуванні та налаштуванні систем автоматичного керування.

Процес налаштування позиційного електроприводу у режимі великого сигналу, коли один або обидва регулятори — позиційний (РП) і швидкісний (РС) — досягають режиму насичення, значно ускладнюється. Це пояснюється наявністю в системі двох послідовно включених нелінійних елементів із суттєво різними характеристиками. Невідповідність їх нелінійностей динамічним параметрам інших ланок приводу може призвести до виникнення автоколиваний низької частоти з великою амплітудою. Подібне явище суттєво порушує роботу системи, аж до повної втрати її працездатності [2].

Варто зазначити, що в режимі малого сигналу, тобто за умов, коли регулятори працюють у межах своїх лінійних ділянок, обидва контури регулювання — позиційний та швидкісний — можуть демонструвати високу стійкість із достатнім запасом. Проте ця локальна стійкість не гарантує глобальної стабільності всієї системи при переході в нелінійний режим, що потребує особливої уваги на етапі проектування і параметричного налаштування регуляторів.

Для позиційних електроприводів сформульовано низку принципів налаштування регулятора положення, які враховують не лише обмеження за

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмом якоря та максимальною швидкістю, а й забезпечують умови стійкої роботи контуру регулювання положення. Досягнення необхідної точності та динаміки позиціонування вимагає гармонійного поєднання усіх складових системи управління, а також коректного налаштування регуляторів на основі аналізу перехідних процесів.

Ефективність та економічність позиційного електропривода значною мірою визначаються правильним вибором його складових, зокрема виконавчих механізмів, датчиків та систем керування. Важливою задачею при цьому є розробка оптимальних законів руху виконавчого органу, які забезпечують переміщення з початкового положення до кінцевого з мінімальними втратами енергії та динамічними навантаженнями. Формування таких законів зміни швидкості дозволяє не лише підвищити загальну продуктивність системи, а й значно знизити знос механічних компонентів [3].

У складі позиційних електроприводів активно використовуються спеціалізовані пристрої та датчики, що забезпечують контроль за положенням і переміщенням виконавчих елементів. Ці засоби відіграють ключову роль у зворотному зв'язку, необхідному для реалізації точного та надійного керування у закритих системах.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОЗИЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ІЗ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Спостерегаючий електропривод (СЕП) — це електромеханічна система, призначена для автоматичного відтворення кутових (або лінійних) переміщень відповідно до зовнішнього керуючого сигналу, за допомогою силового виконавчого механізму. У загальному випадку СЕП являє собою замкнену систему автоматичного керування з жорстким зворотним зв'язком за положенням, що забезпечує високу точність відтворення вхідного сигналу в режимі реального часу.

На відміну від інших типів автоматизованих електроприводів, СЕП не працює за наперед заданою програмою руху. Його характерною особливістю є постійна адаптація до змін керуючого сигналу, що визначає траєкторію переміщення виконавчого органу. Це забезпечує доцільність використання СЕП у системах, де необхідне точне і швидке реагування на змінні вхідні впливи, таких як системи супроводу, позиціювання, стабілізації або навігації [4].

Відмінною рисою подібного типу електроприводу є наявність замкненого контуру керування з жорстким зворотним зв'язком, який забезпечує високу точність і динамічну стабільність при відтворенні заданих параметрів.

Схема такого електроприводу (умовно наведена на рис. 1.1) складається з декількох функціональних модулів, кожен з яких відіграє критичну роль у забезпеченні ефективного керування [5]:

1. Задавальний елемент (ЗУ) — це пристрій, що формує опорний сигнал керування на основі зовнішніх впливів або змін параметрів технологічного процесу. У ролі такого пристрою можуть виступати датчики положення, температури, тиску або інші сенсори, що транслюють необхідне переміщення виконавчого органу у вигляді електричного сигналу.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Порівнювальний пристрій (СУ) або пристрій виявлення неузгодженості — виконує функцію зіставлення вхідного керуючого сигналу з сигналом, що надходить від виконавчого органу через контур зворотного зв'язку. На основі цього аналізу формується сигнал похибки (ϵ), який слугує критерієм для подальшої дії системи.

3. Підсилювач (П) — підвищує енергетичний рівень сигналу похибки до значення, достатнього для активації виконавчого механізму. Підсилення відбувається за рахунок використання енергії від зовнішнього джерела живлення (ЗДЕ), що гарантує незалежність потужності вихідного сигналу від рівня сигналу управління.

4. Виконавчий механізм (ВМ) — реалізує фактичне переміщення об'єкта керування згідно з вимогами вхідного сигналу. Це може бути електродвигун, гідравлічний або пневматичний привід, залежно від особливостей конструкції.

5. Контур зворотного зв'язку (ЗВ) — надзвичайно важливий елемент у структурі СЕП, що забезпечує безперервну передачу інформації про реальний стан виконавчого механізму (його положення, швидкість, прискорення тощо) до порівнювального пристрою або безпосередньо до підсилювача. Саме завдяки цьому зворотному каналу система здатна коригувати свою поведінку відповідно до дійсного результату.

У такій системі вхідним впливом вважається значення величини $x(t)$, що задається ЗУ, а вихідною — величина $y(t)$, яка формується на виході ВМ. Похибка стеження, або неузгодженість між вхідним і вихідним сигналами, визначається як $\epsilon = x(t) - y(t)$, і саме вона визначає величину та напрямок дії виконавчого механізму в кожен момент часу.

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

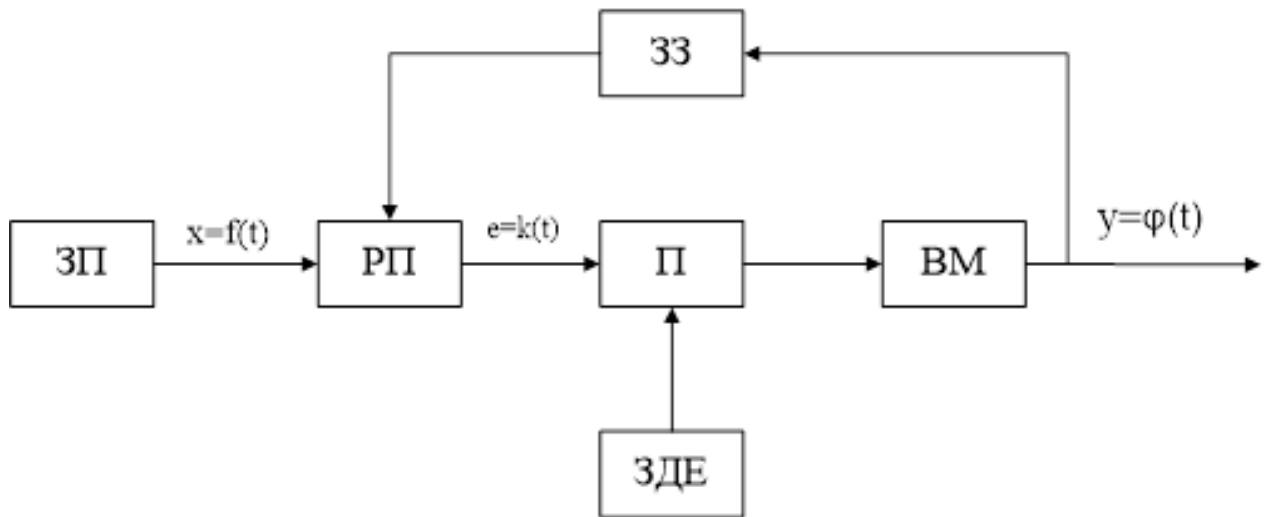


Рисунок 1.1 - Система управління

За своїм функціональним призначенням та принципами дії слідкуючі електромеханічні системи мають певну подібність до автоматичних систем програмного керування (АСПК). Однак між цими класами систем існує принципова відмінність: у слідкуючих системах відсутній програматор — пристрій, що заздалегідь формує визначену траєкторію або закон зміни координати $X(t)$. Іншими словами, поведінка слідкуючої системи не є заздалегідь визначеною чи закладеною наперед. Замість цього, сигнал, який визначає бажаний рух або положення, формується динамічно в ході функціонування системи під впливом зовнішніх умов та змін, які знаходяться поза межами самої системи керування. Ця особливість робить слідкуючі системи особливо ефективними в задачах, де траєкторія змінюється у реальному часі, а адаптивне реагування на непередбачувані зміни є критично важливим. Одним із найбільш поширених напрямів використання таких систем є автоматизація процесів у зварювальному виробництві. Зокрема, у технологіях дугового зварювання слідкуючі системи відіграють ключову роль у забезпеченні точного ведення зварювального електрода вздовж стику зварюваних елементів. Завдяки здатності реагувати на зміну геометрії шва або положення кромки, ці системи забезпечують високу якість з'єднання та знижують ризик відхилення дуги від

зони зварювання. Таким чином, слідкуючі електроприводи, адаптуючись до змінних зовнішніх факторів у режимі реального часу, забезпечують гнучке, точне й ефективне керування в умовах, коли заздалегідь визначити траєкторію руху неможливо або недоцільно. Це відкриває широкі можливості для їх використання не лише у зварювальних процесах, а й у будь-яких технологічних системах, що потребують автоматизованого супроводу або стабілізації параметрів [7].

Функціонування слідкуючого електропривода ґрунтується на замкненому принципі автоматичного коригування положення виконавчого механізму у відповідь на зміну зовнішніх умов або параметрів керованого процесу. У разі виникнення змін у навантаженні, середовищі функціонування або технологічному циклі, відбувається зсув або реакція з боку задавального елемента, який фіксує ці зміни. Унаслідок цього в системі виникає так звана *помилка неузгодженості* — різниця між бажаним (вхідним) і фактичним (вихідним) значенням координати [8].

Ця помилка не є просто індикацією відхилення, а служить активним сигналом, що подається на підсилювальний каскад. Підсилювач, використовуючи енергію від зовнішнього джерела живлення, формує потужний керуючий вплив, який спрямовується на виконавчий механізм. Останній, у свою чергу, здійснює переміщення чи інший вид дії, спрямованої на зменшення або повне усунення виявленої похибки.

Паралельно в процесі бере участь контур зворотного зв'язку, що постійно контролює стан виконавчого органу. Саме завдяки наявності зворотного зв'язку система здатна "відчувати" результати своїх дій і оперативно адаптуватися до нових умов, коригуючи вихідну величину до рівня, який відповідає новому положенню задавального пристрою [9].

У результаті, система повертається до стану динамічної рівноваги, в якому вихідна координата наближається до вхідної з мінімально можливою похибкою. Таким чином, слідкуючий привід забезпечує безперервне, точне і гнучке регулювання, орієнтоване на реальні вимоги об'єкта керування, що змінюються в режимі реального часу.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Позиційні електроприводи є ключовими компонентами в автоматизованих системах, де необхідне високоточне переміщення виконавчих механізмів між наперед визначеними просторовими координатами. Основною функціональною вимогою до таких приводів є забезпечення заданої точності позиціонування в умовах обмеженого часу, що є критичним параметром при реалізації високопродуктивних технологічних процесів [10].

У сучасній практиці проектування систем керування позиційними електроприводами переважають схеми, побудовані на основі концепції багаторівневого регулювання. Така структура передбачає ієрархічне керування параметрами: від струму як базового параметра, через швидкість обертання, до положення виконавчого елемента як кінцевої мети керування. Цей підхід дозволяє досягти більшої точності та динамічної стійкості системи завдяки узгодженій роботі декількох регуляторів, кожен з яких виконує функцію стабілізації свого контрольованого параметра в рамках окремого замкненого контуру.

Завдяки такій структурованості, підлеглі системи регулювання здатні ефективно адаптуватися до зовнішніх збурень і внутрішніх нелінійностей об'єкта, що особливо важливо в умовах змінних навантажень або нестабільних робочих характеристик. Використання цього підходу стало стандартом у проектуванні високоточних електромеханічних систем, які потребують швидкого, плавного та надійного позиціонування виконавчих механізмів [11].

Такі системи, як правило, базуються на математичних моделях, що описують поведінку об'єкта керування у вигляді лінійних диференціальних рівнянь, що значно спрощує процедуру аналізу й синтезу регуляторів. Проте, у реальних умовах експлуатації електроприводів, особливо при реалізації мікропереміщень або повільного руху виконавчого органу, домінуючим чинником у загальному моменті опору часто стають сили тертя. Ці сили формують нелінійний момент опору, математичне моделювання якого неможливо здійснити шляхом звичайної лінеаризації – особливо в режимах

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

малих швидкостей, де характер сил тертя має складну залежність від швидкості та зовнішніх впливів.

З огляду на велику роль сил тертя, що значною мірою формують момент опору виконавчого механізму, традиційні методи моделювання, засновані на лінеаризованих рівняннях, виявляються недостатніми для точного опису динаміки позиційного електроприводу. Особливо це стосується режимів роботи з малими та середніми швидкостями, коли вплив нелінійних фрикційних явищ стає домінуючим. У таких випадках для побудови адекватної системи автоматичного керування виникає необхідність у застосуванні нелінійних математичних моделей, здатних відтворити реальні характеристики опору руху [12].

Використання подібних моделей дозволяє значно підвищити точність чисельного аналізу перехідних процесів, краще передбачити поведінку приводу в умовах змінного навантаження та забезпечити стійке функціонування системи без коливань, перевищення або зниження заданого положення. Застосування такого підходу також сприяє оптимізації параметрів регуляторів, оскільки дає змогу враховувати вплив внутрішніх нелінійностей та адаптувати систему до широкого спектра експлуатаційних умов.

Загалом, моделювання з урахуванням нелінійного моменту опору є критичним чинником при розробці сучасних високоточних позиційних електроприводів, що функціонують у складних або нестандартних умовах експлуатації [13].

У складних автоматизованих системах, що передбачають одночасне або взаємопов'язане функціонування кількох електроприводів для реалізації координованого переміщення виконавчих механізмів, виникає додаткове завдання – зниження загального рівня енергоспоживання поряд із забезпеченням високої точності та швидкодії. Це стає особливо актуальним у багатокординативних системах, де сукупна ефективність визначається найповільнішим елементом – тим приводом, який виконує позиціонування з найбільшою тривалістю. У подібних випадках загальний час технологічного

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						14
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

циклу обмежується саме цим приводом, і він змушений працювати в режимі максимальної швидкості, щоб не затримувати синхронну роботу всієї системи.

Водночас інші приводи, які завершують свої позиційні операції раніше, можуть бути переведені в енергозберігаючі режими за допомогою гальмування із залученням природних дисипативних сил, що дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати без шкоди для загальної координації рухів. Такий підхід передбачає оптимальний розподіл навантаження між виконавчими елементами системи й забезпечує як енергоефективність, так і злагоджену динаміку багатопривідного комплексу [14].

Прикладами технічних об'єктів, у яких реалізується подібна концепція багатокоординатного позиціонування, є координатно-пробивальні верстати, порталні маніпулятори та багатоосьові обробні центри з числовим програмним керуванням. Подібна ситуація виникає й у випадках, коли процес позиціонування виконавчого органу потребує узгодження з іншими технологічними операціями — зокрема, в умовах конвеєрного складання. Тут допустиме деяке збільшення тривалості переміщення, якщо це не впливає на загальну тривалість виробничого циклу. Це дозволяє додатково зекономити енергію за рахунок раціонального вибору режимів роботи електроприводів, адаптованих до умов конкретної задачі.

Крокові електродвигуни представляють собою особливий тип електромеханічних пристроїв, що здійснюють перетворення електричної енергії в кероване обертальне або лінійне переміщення з дискретною (кроковою) структурою. Однією з ключових відмінностей таких двигунів є відсутність традиційного щітково-колекторного вузла, що притаманний колекторним машинам постійного струму. Завдяки цьому крокові двигуни належать до класу безщіткових або безконтактних приводів, що забезпечує їхню високу надійність, довговічність та зниження зносу [15].

З конструктивної точки зору, всі фазні обмотки крокового двигуна розміщені виключно на його статичній частині — статорі. Це дозволяє спростити систему охолодження та уникнути використання рухомих контактів. У свою чергу, роторна частина виконується у двох основних варіантах залежно від типу

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двигуна: або у вигляді постійного магніту, або як зубчаста конструкція, виготовлена з магнітом'якого матеріалу, що змінює магнітний опір під час обертання. Останній варіант реалізується у так званих крокових двигунах із змінним магнітним опором (Variable Reluctance Stepper Motors), де ротор не має постійної намагніченості, а зміна положення здійснюється завдяки чергуванню магнітного потоку в статорі.

Таке конструктивне рішення забезпечує високу точність позиціонування та дозволяє точно визначати кутове положення ротора на основі кількості поданих керуючих імпульсів. Рух ротора реалізується шляхом послідовної активації фаз, і кожен імпульс викликає переміщення на фіксований кут, що визначається геометричними параметрами двигуна (кількість зубців, полюсів тощо).

Відсутність механічної комутації забезпечує гнучкість і точність управління, що робить крокові двигуни особливо привабливими для застосування в системах автоматизації, вимірювальних приладах, приводах числового програмного керування (ЧПК), 3D-принтерах, а також в інших високоточних пристроях, де необхідне керування положенням або швидкістю без використання зворотного зв'язку [16].

Одна з фундаментальних особливостей конструкції крокових електродвигунів полягає у повній відсутності внутрішніх пристроїв для комутації струму — як механічного (наприклад, щіток або колекторного вузла), так і електронного. Усі операції з перемикання струму між фазними обмотками виконуються виключно зовнішнім керуючим пристроєм, яким, як правило, виступає спеціалізований електронний контролер. Це архітектурне рішення дозволяє здійснювати дискретне крокове регулювання положення ротора шляхом подачі керуючих імпульсів у строго визначеній послідовності.

Внаслідок такого принципу роботи, ротор крокового двигуна може стабільно фіксуватися у наперед заданих кутових положеннях, причому кожен крок обертання є наслідком одного імпульсу на вхід контролера. Кут повороту на один крок визначається сукупністю конструктивних параметрів двигуна — зокрема, кількістю полюсних пар, кількістю зубців на статорі й роторі, а також

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

способом збудження обмоток. Додаткову роль відіграє алгоритм формування керуючих сигналів, який може передбачати повнокроковий, напівкроковий або мікрокроковий режими роботи, що дозволяє досягати різної точності й плавності переміщення.

Типова система «кроковий двигун – контролер» проектується з урахуванням потреби у високоточному позиціюванні без використання датчиків зворотного зв'язку, тобто працює в режимі відкритого керування. За умови коректного налаштування та обмеженого навантаження така система забезпечує визначене кутове положення ротора з достатньо високою точністю без необхідності зчитування фактичного положення [17].

Існує кілька основних методів керування кроковими двигунами, що дозволяють змінювати плавність і точність їх руху [18]:

- **Режим повного кроку (Full Step):** У цьому режимі завжди активовані дві обмотки одночасно, створюючи максимальний крутний момент. При кожному імпульсі керування відбувається переміщення ротора на один повний крок, який відповідає певному кутовому зміщенню (наприклад, 1.8° для типового двигуна з 200 кроками на оберт).
- **Режим напівкроку (Half Step):** У цьому варіанті чергується активація однієї та двох обмоток, що дозволяє подвоїти роздільну здатність (наприклад, до 400 кроків на оберт), знижуючи при цьому пульсації моменту. Це досягається за рахунок проміжного позиціювання між повними кроками.
- **Мікрокроковий режим (Microstepping):** У цьому режимі на обмотки подається плавно змінюваний струм, який формується у вигляді синусоїдальних або інших сигналів, що дозволяє реалізувати велику кількість проміжних положень між стандартними кроками. Це забезпечує найвищу точність і плавність ходу, однак вимагає складнішої системи керування та точного контролю струмів.

Таким чином, вибір режиму роботи крокового двигуна залежить від вимог до точності, моменту, плавності руху та складності керуючої електроніки.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електродвигуни асинхронні з конструкцією ротора короткозамкненою впевнено утримують лідируючі позиції серед електромеханічних перетворювачів енергії, які застосовуються у приводних системах як промислового, так і побутового призначення. Широке використання цих машин пояснюється вдалою комбінацією технологічної простоти, довговічності в експлуатації та низького рівня витрат як на виробництво, так і на технічне обслуговування протягом усього життєвого циклу обладнання [17].

Завдяки відсутності складних вузлів управління й регулювання, ці двигуни ідеально підходять для механізмів, які функціонують у стабільному режимі, тобто не потребують зміни швидкості обертання під час виконання технологічного процесу. В таких системах електроприводу параметри руху залишаються постійними, а навантаження не вимагає гнучкого або динамічного регулювання. Це робить короткозамкнені асинхронні двигуни надзвичайно ефективними для стандартних задач з фіксованим режимом роботи — наприклад, у вентиляторах, насосах, компресорах, транспортних лініях та інших типових пристроях.

Серед ключових конструктивних переваг цих двигунів варто відзначити відсутність щіток, контактних кілець і складних регуляторних елементів, що значно зменшує ймовірність механічного зносу, підвищує надійність і дозволяє працювати в умовах забруднення, вібрацій та змін температур. Простота конструкції також полегшує процеси монтажу, демонтажу та технічної діагностики.

З урахуванням вищезазначеного, короткозамкнені асинхронні двигуни є оптимальним вибором для задач, де необхідна економічність, надійність і стабільність обертання при фіксованих умовах навантаження [10].

Доцільність впровадження асинхронних короткозамкнених двигунів у конкретну систему електроприводу визначається низкою техніко-експлуатаційних критеріїв, зокрема:

- відсутністю необхідності в оперативному або плавному регулюванні швидкості обертання під час роботи;

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- допустимістю незначної просадки швидкості (зазвичай у межах 10%) при переході від холостого ходу до повного навантаження;
- обмеженою кількістю пусків за одиницю часу, оскільки багаторазові запуски можуть призводити до перегріву обмоток;
- відносно малим пусковим моментом навантаження, що не перевищує номінального значення моменту опору на робочій частоті;
- номінальною потужністю, яка не перевищує орієнтовно 400 кВт у низьковольтному виконанні або до 8000 кВт — у випадку високовольтних модифікацій.

Конструктивно короткозамкнені ротори є найпростішими за виконанням — їх зазвичай утворюють шляхом заливки алюмінію або міді у канали ротора, утворюючи так звану "білячу клітку". Такий підхід не лише знижує виробничі витрати, а й значною мірою підвищує механічну міцність та зменшує потребу в обслуговуванні впродовж усього терміну експлуатації.

Попри численні переваги, асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають і низку обмежень, які необхідно враховувати при їх інтеграції в складні електропривідні системи. Найбільш суттєвим недоліком є відносно низький коефіцієнт потужності ($\cos \phi$), особливо на холостому ходу або за часткових навантажень. Це негативно позначається на ефективності використання електроенергії та може потребувати застосування коригуючих пристроїв — наприклад, батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності [17].

У порівнянні з двигунами, що мають фазний ротор, короткозамкнені двигуни виграють за простотою конструкції та вартістю, але поступаються в динамічних характеристиках запуску та можливостях регулювання. Двигуни з фазним ротором завдяки додатковим резисторам у колі ротора здатні забезпечити кращий пусковий момент і можливість ступінчастого або плавного регулювання швидкості, що робить їх придатними для використання в системах із високими вимогами до регулювання динаміки.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У сучасному машинобудуванні та енергетиці переважає тенденція до уніфікації, що зумовлює активне використання саме короткозамкнених асинхронних машин у типових умовах, тоді як фазні двигуни залишаються в арсеналі переважно для специфічних, нестандартних завдань із підвищеними вимогами до запуску або регулювання [17].

Електричні двигуни постійного струму (ДПС) широко використовуються в технологічних, транспортних і автоматизованих системах керування, де критично важливими є гнучке, безступінчасте регулювання швидкості обертання вала, а також здатність підтримувати сталу величину крутного моменту в умовах змінного навантаження. Типовими прикладами таких застосувань є прокатні стани, підйомно-транспортне обладнання (зокрема, ліфти), металорізальні верстати, а також різні виконавчі пристрої з високими вимогами до точності й динаміки керування.

Однією з важливих експлуатаційних характеристик двигунів постійного струму є їхній пусковий режим. При безпосередньому підключенні двигуна до джерела живлення в момент запуску через якірну обмотку починає протікати значний струм, що суттєво перевищує номінальне значення. Такий пусковий струм (I_p) може бути у 2–5 разів більшим за номінальний (I_n), тобто $I_p \approx (2-5) \cdot I_n$, що обумовлено відсутністю протидіючої електрорушійної сили на нерухомому роторі [11].

Різке зростання струму на старті несе загрозу для ізоляції обмотки якоря через надмірне тепловиділення. Окрім цього, значне електричне навантаження негативно позначається на роботі щітково-колекторного вузла, що знижує загальну надійність і довговічність двигуна. Щоб уникнути пошкоджень та забезпечити плавний запуск, у коло якоря на час пуску вмикають додатковий активний опір. Цей опір знижує амплітуду струму, що проходить через обмотки, до безпечного рівня, дозволяючи поступово нарощувати швидкість обертання і, відповідно, формування проти-ЕРС, яка автоматично обмежує струм.

Пускові системи двигунів постійного струму часто реалізуються у вигляді контактно-релейних схем або з використанням напівпровідникових пристроїв

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(тиристорних регуляторів), які забезпечують більш точне керування процесом запуску, а також захист від перенавантажень. Вибір конкретного рішення залежить від типу двигуна, особливостей технологічного процесу та вимог до енергоефективності.

У сервоприводах зворотний зв'язок виконує критично важливу функцію — забезпечує точне визначення поточних (реальних) значень параметрів руху, таких як кутова швидкість і просторове положення виконавчого механізму. Ці дані необхідні для формування адекватного сигналу управління, який дозволяє сервосистемі працювати з високою точністю, динамічністю та стабільністю [15].

Функціонування зворотного зв'язку ґрунтується на використанні різноманітних типів датчиків, які реєструють зміну положення та швидкості вала двигуна або інших елементів виконавчого механізму. Дані, отримані від цих сенсорів, надходять у блок керування, де вони порівнюються з еталонними (заданими) значеннями. На основі виявленої різниці (похибки) формується новий керуючий вплив, що забезпечує корекцію руху системи.

До них належать [17]:

- Датчики положення — інкрементні або абсолютні енкодери, потенціометри, лінійні лінійки (наприклад, оптичні або магнітні).
- Датчики швидкості — тахогенератори, енкодери з частотно-часовим аналізом імпульсів.
- Комбіновані сенсори — пристрої, що одночасно забезпечують дані про положення та швидкість (наприклад, резольвери або сучасні багатофункціональні енкодери з цифровим інтерфейсом).

Залежно від типу приводу, точності задачі, складності керуючого алгоритму та вимог до надійності, у практиці застосовується різна конфігурація та комбінація зворотних зв'язків. Ретельний вибір відповідних сенсорів забезпечує не лише точність позиціонування, але й підвищену адаптивність системи до змін навантаження чи зовнішніх впливів, що є ключовим у прецизійних механізмах та роботизованих системах.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролер положення обертового вузла, більш відомий під технічною назвою *енкодер*, є спеціалізованим електромеханічним пристроєм, призначеним для точного визначення просторового положення валу або осі, що здійснює обертальний рух. Основна функція енкодера полягає у перетворенні механічного руху в електричні сигнали, які відображають кутове положення, напрямок обертання, швидкість та інші кінематичні параметри об'єкта.

Принцип дії енкодера базується на фіксації переміщення обертової частини з використанням оптичних, магнітних або інших фізичних ефектів. У результаті обробки сигналів, що генеруються в процесі обертання, формуються дані, які дозволяють точно визначити, наскільки і в який бік повернувся вал, чи перебуває він у заданому положенні, та за потреби — зафіксувати момент зміни напрямку обертання[17].

Енкодери активно застосовуються у високоточних автоматизованих системах, зокрема в сервоприводах, ЧПК-обладнанні, робототехніці, вимірювальній техніці та інших сферах, де необхідне точне керування положенням або рухом. Залежно від конструкції та функціональних можливостей, енкодери поділяються на [10]:

- Інкрементні — фіксують зміну положення, генеруючи імпульси при кожному переміщенні, але не надають абсолютного значення кута.
- Абсолютні — забезпечують інформацію про точне кутове положення навіть після втрати живлення, оскільки кожне положення має унікальний цифровий код.

Крім вимірювання кутового положення, енкодери здатні виконувати функції контролю переміщення, обчислення пройденої відстані, визначення швидкості обертання, а також можуть бути інтегровані в контури зворотного зв'язку для забезпечення високоточного регулювання. Залежно від типу приводу чи технологічного процесу, дані енкодера можуть бути використані як в системах з відкритим, так і з замкненим контуром керування.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У конструкції синхронних електродвигунів з постійними магнітами, що реалізують принцип синусної комутації, для забезпечення точного зворотного зв'язку щодо положення ротора застосовується спеціалізована система на основі аналогових індуктивних перетворювачів, серед яких особливе місце займає *резольвер*. Цей тип датчика є різновидом електромеханічного сенсора, що функціонує за принципом трансформаторного зв'язку і дозволяє з високою точністю відслідковувати безперервну зміну кутового положення ротора, передаючи інформацію у вигляді аналогових синусно-косинусних сигналів [12].

Завдяки своїй надійності, термостійкості, високій роздільній здатності та стійкості до впливу електромагнітних перешкод, резольвери широко застосовуються в приводах, де критичною є синхронізація фаз струму з позицією магнітного поля ротора — зокрема в сервоприводах, електромобілях, аерокосмічних та робототехнічних системах.

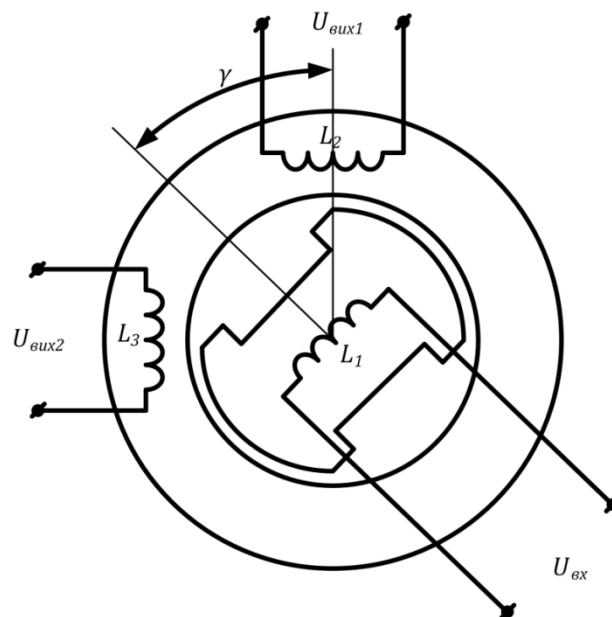


Рисунок 1.2 - Обмотки резольвера

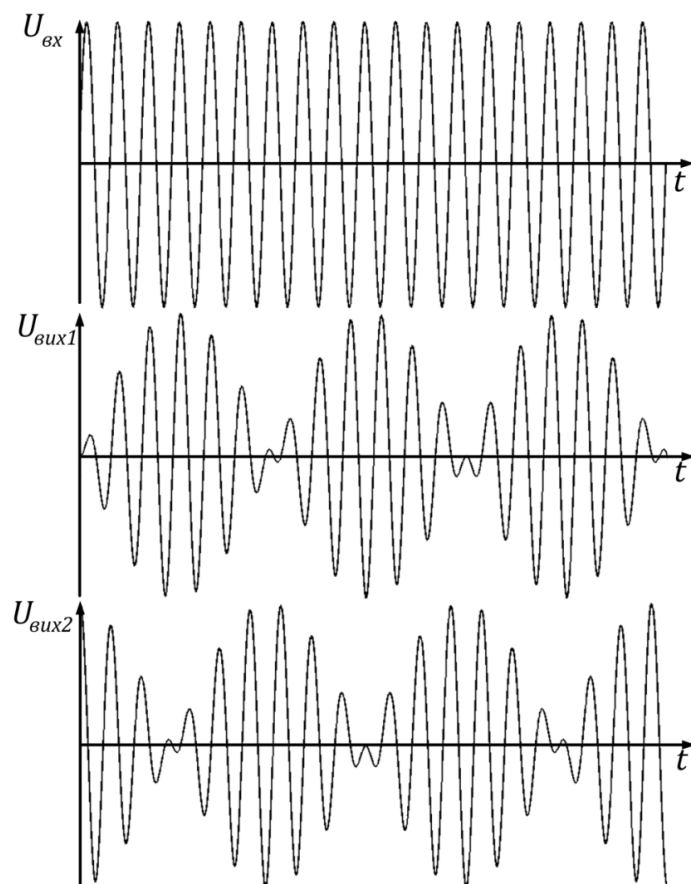


Рисунок 1.3 - Напруги резольвера

Щоб перетворити аналогові сигнали, що генеруються резольвером під час його роботи, у форму, придатну для подальшого цифрового оброблення в системі керування, необхідно здійснити спеціальну процедуру сигналоперетворення. Для цього використовується спеціалізований функціональний блок — резольвер-код перетворювач (скорочено РК-перетворювач). Його завдання полягає в тому, щоб приймати синусоїдальні та косинусоїдальні вихідні напруги від резольвера, виконувати їх демодуляцію, обчислювати фазове співвідношення між сигналами, та на основі цього формувати точне цифрове подання кутового положення ротора [10].

Цифровий вихід РК-перетворювача може бути представлений у вигляді двійкового коду, коду Грея або у формі імпульсних сигналів, що синхронізуються з системою керування приводом. Таким чином, резольвер у поєднанні з РК-перетворювачем забезпечує надійний та безперервний контроль положення вала у системах точного електроприводного позиціонування.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

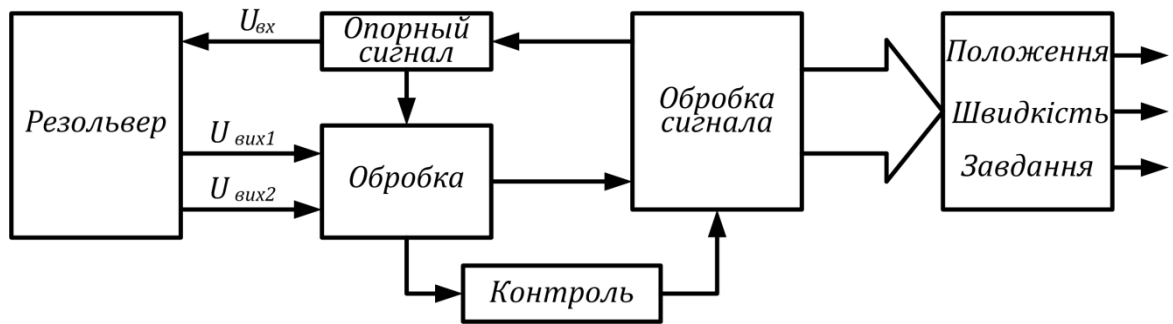


Рисунок 1.4 - Структурна схема

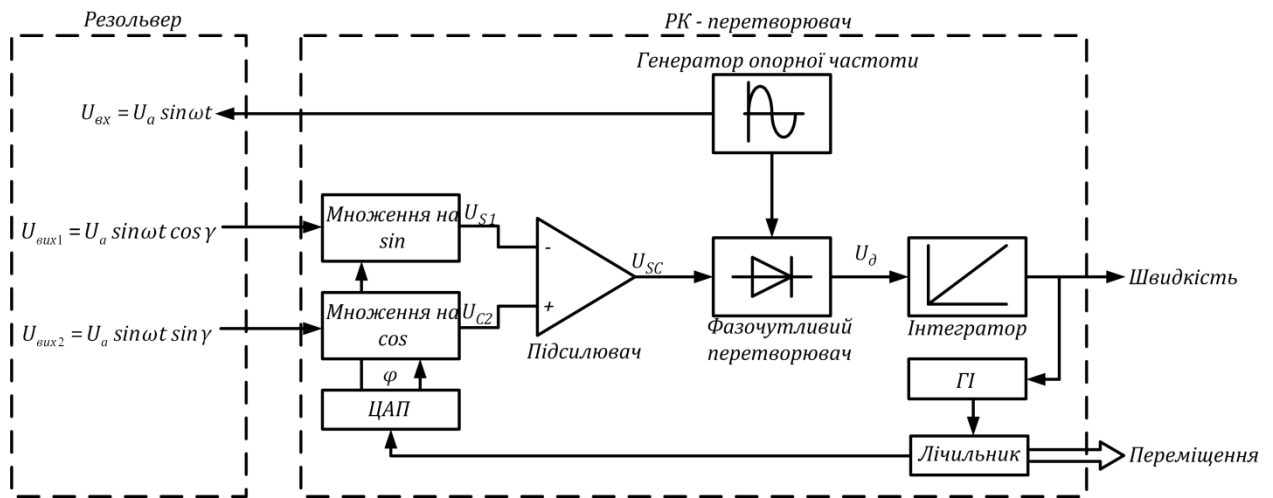


Рисунок 1.4 - Схема перетворювача

Резольвер-код перетворювач (ПК-перетворювач) функціонує за принципом аналогово-цифрової обробки сигналів, що надходять від резольвера. Робочий процес починається з того, що внутрішній генератор формує опорну напругу високої частоти — зазвичай близько 10 кГц при амплітуді приблизно 10 В. Ця змінна напруга подається на обмотку збудження ротора, що позначається як L1, створюючи таким чином магнітне поле змінної інтенсивності [19].

У відповідь на це магнітне збудження на статорних обмотках резольвера виникають два вихідні сигнали, умовно позначені як $U_{вих1}$ та $U_{вих2}$. Ці сигнали мають амплітудно-модульовану форму і відображають зміну кута повороту ротора. Основна особливість полягає в тому, що $U_{вих1}$ і $U_{вих2}$ мають

для аналогових систем або систем з умовною неперервністю. Це призводить до неточності у реалізації сигналу завдання швидкості в дискретній цифровій системі керування. На рисунку 1.10 (за результатами цифрового моделювання) видно, що така дискретна реалізація призводить до спотворення бажаної тахограми, зокрема — до появи помилок позиціонування, коливань або перевищення граничних параметрів.

Щоб уникнути цих недоліків, доцільно використовувати алгоритм корекції часових параметрів тахограми з урахуванням періоду дискретності. Суть цього підходу полягає в тому, що часи основних ділянок — *розгону, руху з постійною швидкістю та гальмування* — округлюються в більший бік до значень, кратних періоду дискретизації. Після цього виконується повторний розрахунок параметрів, зокрема — прискорення, часу дії кожної ділянки та максимальної швидкості. Такий підхід дозволяє зберегти точну форму тахограми в цифровому представленні без втрати узгодженості параметрів у часі.

Переваги методу [17]:

1. Спрощення архітектури системи керування: Відсутність необхідності у реалізації окремого контуру положення знижує складність системи.
2. Апаратна реалізація: Можлива реалізація алгоритму на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) або вбудованих модулів комплектного електропривода, що спрощує впровадження в промислових умовах.
3. Гнучкість налаштувань: Застосування різноманітних алгоритмів — як оптимізованих за швидкодією, так і за тепловим навантаженням або з обмеженням ривка.
4. Підвищена адаптивність: У поєднанні з ПІ-регулятором швидкості забезпечується ефективне позиціонування навіть за умов змінного навантаження, без суттєвого погіршення динамічних характеристик.

Висновок

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, використання адаптованої до дискретного часу реалізації цифрового ЗП дозволяє значно покращити точність формування команд на швидкість, зменшити похибку позиціонування та забезпечити надійну роботу системи електропривода в умовах реального технологічного середовища.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 СИНТЕЗ ЕТАЛОННИХ ТРАЄКТОРІЙ ВИКОНАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

Для адекватного опису поведінки об'єкта управління, необхідно враховувати взаємозв'язок між такими параметрами, як лінійне або кутове положення, швидкість і прискорення. Ці величини не є незалежними одна від одної, а визначаються законами механіки — як класичної, так і прикладної — в контексті специфіки привідної частини. Зокрема, ці залежності можуть мати вигляд похідних або інтегралів положення за часом, з урахуванням передаточних чисел, інерційних характеристик, а також конфігурації кінематичного ланцюга [14].

У системах автоматизованого електроприводу цей взаємозв'язок має вирішальне значення для побудови точних математичних моделей, на основі яких здійснюється синтез систем керування. Від правильного обліку цих координат залежить точність позиціонування, стабільність регулювання та загальна ефективність роботи приводу [17].

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} = \frac{d^3\varphi(t)}{dt^3} = \rho(t)$$

$$M - M_c = M_j = J \frac{d\omega(t)}{dt} = J\varepsilon(t)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \Psi_2 i_q = c_2 i_q$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \Phi_{\max} i_q = c_3 i_q$$

$$Q = R \int_0^t i^2(t) dt = \frac{R}{c} \int_0^t M^2(t) dt$$

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк. 29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_j = R \int_0^t i_j^2(t) dt = \frac{R}{c} \int_0^t M_j^2(t) dt$$

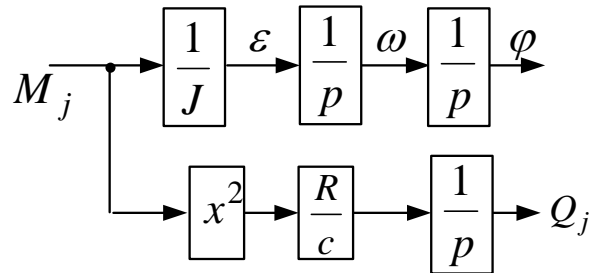


Рисунок 2.1 - Механічна частина

$$\beta = \frac{\tau_p}{\tau_{\max}}$$

$$Q = \frac{4\phi_3^2}{\tau_{\max}^3} \cdot \frac{1}{\beta(1-\beta)}$$

$$Q = \frac{2\phi_3^2}{\tau_{\max}^3} \cdot \frac{1}{\beta(1-\beta)^2}$$

здатності забезпечувати виконання заданого переміщення за найкоротший можливий час при обмеженні рівня енергоспоживання, що безпосередньо впливає на нагрівання елементів приводу, зокрема двигуна.

Якщо система має певний запас у допустимому часі виконання руху, то зменшення теплових втрат стає можливим без потреби змінювати саму форму тахограми (тобто тип траєкторії швидкості). У такому випадку оптимізація здійснюється шляхом регулювання окремих параметрів цієї траєкторії, зокрема за рахунок зменшення граничних значень прискорення або максимальної швидкості. Такий підхід дозволяє знизити пікові навантаження на електропривід і тим самим покращити тепловий режим його роботи, продовжуючи строк експлуатації системи [17].

Таким чином, подібне регулювання параметрів квазіоптимальних діаграм є важливим інструментом у задачах енергоефективного управління електромеханічними системами, що працюють у режимах з повторюваними переміщеннями або в умовах змінного навантаження.

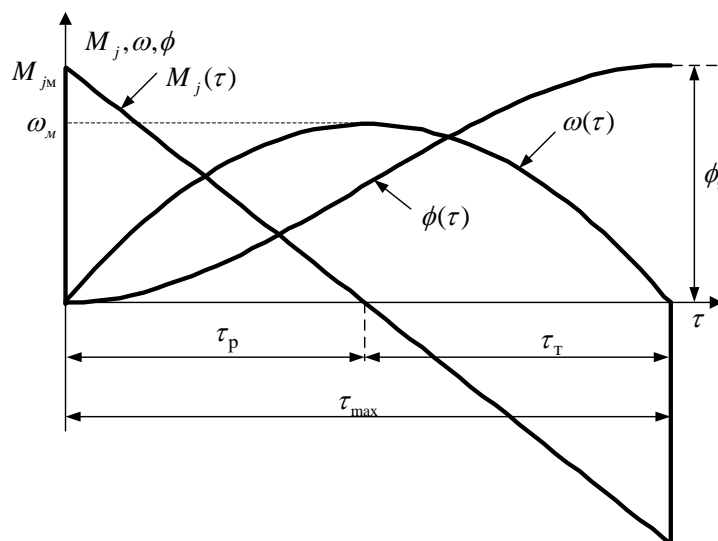


Рисунок 2.4 - Оптимальна до теплових втрат

Поглиблений аналіз енергетичних процесів у системах позиційного електроприводу свідчить про те, що величина теплових втрат, які виникають під час виконання переміщення, знаходиться в оберненій кубічній залежності від

часу, необхідного для його завершення. Іншими словами, теплова енергія, що втрачається у вигляді нагрівання обмоток двигуна та інших елементів системи, суттєво зменшується зі збільшенням часу відпрацювання команди переміщення [19].

Цей факт має важливе прикладне значення, оскільки навіть незначне подовження допустимого інтервалу часу виконання позиціонування може призвести до багаторазового зниження втрат енергії у вигляді тепла. Таким чином, в умовах, коли система керування допускає певний часовий резерв без шкоди для загальної продуктивності технологічного процесу, доцільно реалізовувати стратегії управління, орієнтовані не лише на досягнення максимальної швидкодії, але й на енергоефективність.

Зниження теплових втрат позитивно впливає не лише на енергоспоживання, а й на загальну надійність та довговічність електроприводу, оскільки зменшується ступінь термічного навантаження на електромеханічні компоненти системи. У підсумку, оптимізація часу переміщення, навіть у межах невеликих величин, є одним із ключових чинників підвищення ефективності роботи позиційних приводів у промислових умовах [20].

$$M_{jm} = \frac{6\phi_3}{\tau_{\max}^2}$$

$$\omega_M = \frac{M_{jm}\tau_{\max}}{4} = \frac{3}{2} \frac{\phi_3}{\tau_{\max}}$$

$$\tau_p = \tau_T = \frac{\tau_{\max}}{2}$$

$$|M_{jm}| < M_{\max}$$

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_p = \frac{3}{2} \left(\tau_{\max} - \frac{\phi_3}{\omega_{\max}} \right)$$

$$M_{jM} = \frac{2\omega_{\max}}{\tau_p}$$

$$\tau_1 = \frac{\tau_{\max} - \sqrt{3\tau_{\max}^2 - 12 \frac{\phi_3}{M_{\max}}}}{2}$$

$$\omega_M = \frac{M_{\max}}{4} (\tau_{\max} + 2\tau_1)$$

$$\phi_3 = M_{\max} \tau_1^2 + 2M_{\max} \tau_1 (\tau_p - \tau_1) + \omega_{\max} (\tau_{\max} - 2\tau_p) + \frac{2}{3} M_{\max} (\tau_p - \tau_1)^2$$

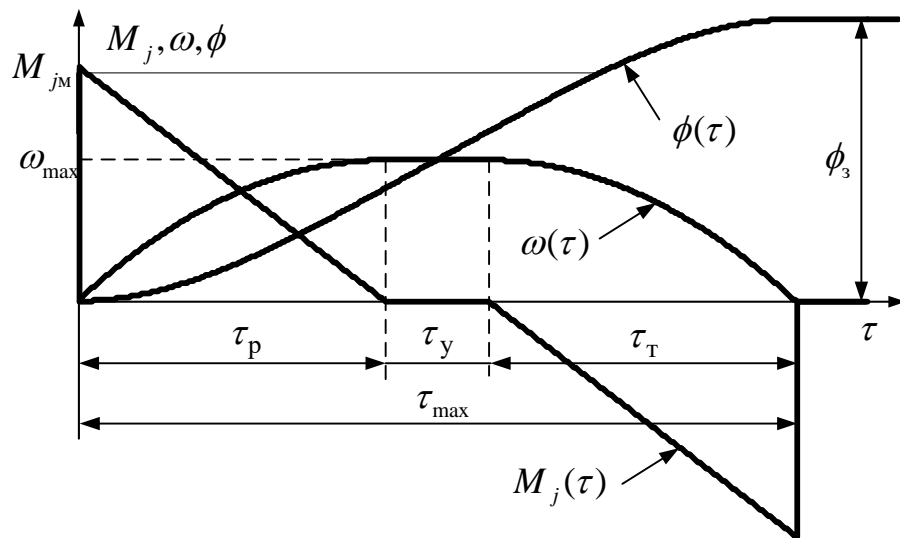


Рисунок 2.5 - Діаграма з обмеженням швидкості

$$\tau_1 = \frac{2\omega_{\max}}{M_{\max}} - \tau_p$$

$$M_{\max} \tau_p^2 - 2\omega_{\max} \tau_p + 4 \frac{\omega_{\max}^2}{M_{\max}} - 3\omega_{\max} \tau_{\max} + 3\phi_3 = 0$$

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк.
						34
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_p = \frac{\omega_{\max} + \sqrt{\omega_{\max}^2 - M_{\max} \left(4 \frac{\omega_{\max}^2}{M_{\max}} - 3\omega_{\max} \tau_{\max} + 3\phi_3 \right)}}{M_{\max}}$$

$$Q = \frac{2}{3} M_{jm}^2 (\tau_p + 2\tau_1)$$

Незважаючи на значну кількість наукових і прикладних праць, присвячених вдосконаленню процесів керування та позиціонування у системах електроприводу, галузь усе ще стикається з рядом складних і невирішених технічних задач. Однією з найбільш актуальних проблем залишається формалізація та реалізація аналітичних методів, що дозволяють з високою точністю обчислювати координати характерних точок еталонних діаграм переміщення. Йдеться про траєкторії, які б водночас відповідали двом ключовим критеріям оптимізації: мінімізації втрат електроенергії у вигляді теплового навантаження на виконавчі елементи системи та забезпеченню максимальної швидкодії процесу позиціонування [20].

Особливу складність викликає необхідність врахування комплексу технологічних обмежень, зокрема: максимального допустимого прискорення, обмеження на величину струму якоря або електромагнітного моменту, а також можливих обмежень на ривок — зміну прискорення у часі. Побудова таких квазіоптимальних або комбінованих діаграм переміщення вимагає застосування складних математичних моделей, що адекватно відображають не лише механічні, а й електромагнітні характеристики приводу, а також дозволяють враховувати взаємодію між ними в динаміці.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку є не лише доцільними, а й необхідними для підвищення ефективності, точності та енергоощадності сучасних систем автоматизованого електроприводу, особливо в умовах високих вимог до адаптивності та точного позиціонування [21].

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

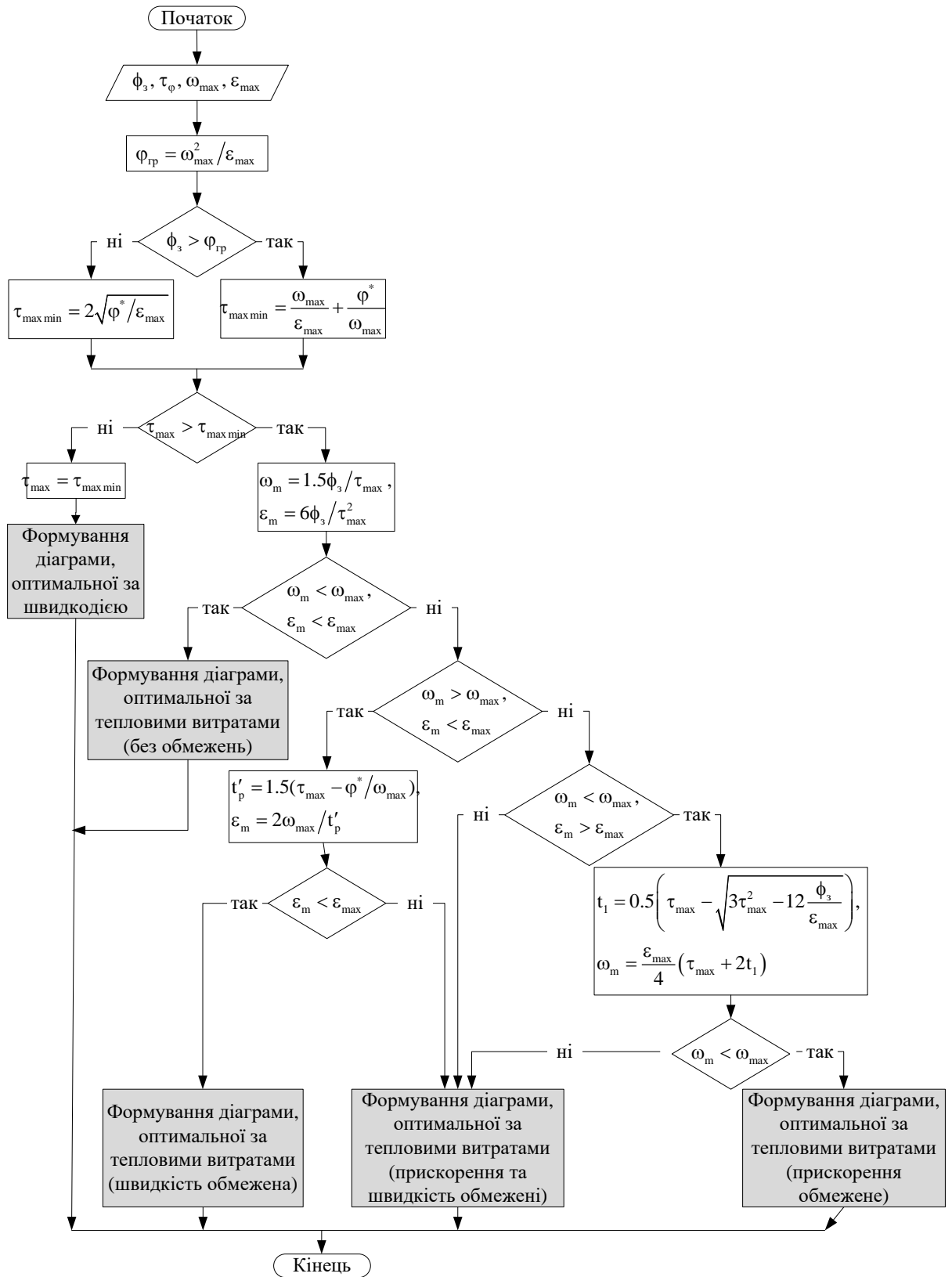


Рисунок 2.6 Алгоритм вибору

До невирішених завдань, зокрема, слід віднести [22]:

- а) Побудову оптимальних діаграм руху з урахуванням обмежень на максимальну швидкість переміщення та прискорення виконавчого механізму, що є типовими в промислових приводах загального призначення.

- б) Розширення попереднього випадку шляхом урахування обмеження на ривок (тобто зміну прискорення у часі), що особливо важливо для підвищення ресурсу механічних вузлів та зменшення динамічних навантажень.

- в) Аналіз режимів руху з обмеженням не тільки на швидкість, але й на струм якірного кола або електромагнітний момент, при цьому враховується наявність постійного за значенням моменту статичного навантаження, що моделює реальні умови роботи двигуна.

- г) Складніший варіант попереднього пункту, де вводяться додаткові обмеження на ривок, а також враховується обмеження на момент, створюваний електродвигуном, у присутності статичного навантаження, що дозволяє забезпечити більш реалістичну і надійну модель функціонування електроприводу у відповідальних режимах роботи.

Таким чином, ефективне вирішення наведених задач відкриває шлях до синтезу високоточних, енергоефективних та надійних систем керування для сучасних позиційних електроприводів.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

У межах цього розділу було поставлено задачу дослідити методи реалізації точного відпрацювання заданого переміщення протягом наперед визначеного інтервалу часу. В рамках аналізу було розглянуто два основні підходи до реалізації цієї задачі, кожен з яких передбачає оптимізацію різних параметрів системи [20]:

- Перший підхід орієнтований на досягнення максимальної швидкодії, тобто мінімального часу виконання переміщення, що є критичним у динамічних або високопродуктивних технологічних процесах;
- Другий підхід акцентується на мінімізації активних (теплових) втрат в електромашинному обладнанні, що дозволяє підвищити енергоефективність і зменшити теплове навантаження на виконавчі механізми.

У ході аналізу було встановлено, що залежно від величини необхідного переміщення та допустимого часу на його реалізацію, бажану кутову траєкторію можна відпрацювати за допомогою трьох типів тахограм — трикутної, трапецеїдальної або параболічної. Кожен із цих типів забезпечує відповідний баланс між динамічними характеристиками руху та енергетичними витратами системи.

Сформовані графічні профілі переміщення є універсальними за своєю суттю та можуть бути адаптовані до різних типів електроприводів, включаючи системи із змінними навантаженнями, приводами постійного струму, а також сучасними векторними системами керування [21].

Далі розглядається специфічний приклад впровадження розроблених еталонних діаграм у векторну систему керування асинхронним електродвигуном, де незалежно регулюються магнітний потік збудження та кутова швидкість. Такий підхід дає змогу реалізувати високоточне, енергоощадне позиціонування ротора з урахуванням обмежень на струм, швидкість та момент, що є надзвичайно

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

актуальним для промислових сервоприводів та автоматизованих виробничих ліній.

Асинхронні електродвигуни (АД) по праву вважаються найбільш масово застосовуваними електромеханічними агрегатами в різних галузях промисловості, енергетики, транспорту й побутового сектору. Вони займають провідні позиції серед засобів електромеханічного перетворення енергії завдяки своїй конструктивній простоті, високій надійності у процесі експлуатації, тривалому строку служби, а також економічній доцільності як у виробництві, так і в технічному обслуговуванні. Саме ці характеристики зробили АД незамінним елементом у численних автоматизованих і напівавтоматизованих системах.

З впровадженням векторного керування (ВК) — сучасної технології управління електроприводами змінного струму — з'явилася можливість суттєво підвищити ефективність використання асинхронних двигунів. Цей підхід забезпечує точне регулювання моменту та швидкості обертання, завдяки чому стало можливим адаптувати АД до складних, динамічно змінюваних навантажень і технологічних вимог. У результаті асинхронні приводи, які раніше переважно функціонували у сталому режимі, тепер можуть успішно конкурувати з дорогими системами на основі двигунів постійного струму [20].

Станом на сьогодні асинхронні двигуни відповідальні за споживання приблизно 50% всієї виробленої у світі електричної енергії. Аналогічна ситуація спостерігається і в Україні, де частка енергоспоживання АД у загальному обсязі також є критично значущою. Ще однією показовою статистикою є те, що близько 80% встановлених АД працюють у нерегульованому режимі, тобто не мають функціональних можливостей зміни частоти обертання валу в залежності від поточних потреб технологічного процесу. Такий підхід є застарілим і малоефективним, адже призводить до перевитрати електроенергії, надмірного зношування механізмів і зниження загальної продуктивності.

Якщо ж інтегрувати векторне керування в систему електроприводу з асинхронним двигуном, можна досягти зниження енергоспоживання на рівні до 50–60% — це підтверджено численними експериментальними дослідженнями та

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделями. Така оптимізація є особливо важливою у контексті глобальної тенденції до енергоефективності, зменшення промислових викидів та переходу на технології сталого розвитку.

Отже, застосування новітніх методів керування, зокрема векторного керування, відкриває нові горизонти для модернізації існуючих електроприводів на базі асинхронних двигунів. Це не лише підвищує енергетичну ефективність виробничих систем, а й забезпечує адаптивність, точність і стабільність роботи в умовах змінних технологічних режимів [10, 15, 19].

У зв'язку з постійно зростаючими вимогами до енергоефективності та точності керування електроприводними системами, особливої актуальності набуває розробка та впровадження інноваційних методів регулювання роботи асинхронних електродвигунів. З огляду на це, пріоритетним завданням сучасної електропривідної техніки є створення адаптивних систем керування, здатних забезпечити високу точність, стабільність та гнучкість у широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

Одним із найперспективніших напрямів у цьому контексті є використання векторного керування (ВК), яке принципово змінює підхід до управління асинхронним двигуном. Завдяки застосуванню ВК стає можливим реалізувати незалежне регулювання моменту та магнітного потоку, що дозволяє досягати динамічних характеристик, порівнянних з електроприводами на основі двигунів постійного струму. Такий рівень точності та адаптивності відкриває нові можливості для використання АД у високотехнологічних процесах, де раніше застосовувалися лише дорогі та складні приводи постійного струму.

На світовому ринку електроприводів уже спостерігається чітка тенденція до активного впровадження систем на основі ВК. Провідні закордонні виробники, зокрема компанії з Німеччини, Японії, США та інших технологічно розвинених країн, налагодили серійне виробництво таких приводів, пропонуючи готові комплексні рішення для промисловості, транспорту та автоматизації. Їхні вироби демонструють високу ефективність, надійність та функціональність,

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однак мають істотний недолік — високу вартість як самого обладнання, так і його обслуговування.

На жаль, в Україні ситуація є менш сприятливою: власне виробництво електроприводів з векторним керуванням наразі відсутнє. Це змушує підприємства залежати від імпортного обладнання, що не тільки підвищує загальні витрати на модернізацію, але й створює складнощі з технічною підтримкою, ремонтом та адаптацією під специфічні умови вітчизняного виробництва [7].

У зв'язку з цим стає очевидною необхідність розробки та налагодження серійного виробництва вітчизняних систем електроприводу з використанням технології векторного керування, що забезпечить не лише енергетичну та технологічну незалежність, а й дасть змогу зменшити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність виробництва та інтегрувати українські підприємства у світовий простір високих технологій.

Структурно-функціональна схема реалізації алгоритму непрямого векторного керування асинхронним електроприводом включає в себе сукупність взаємозалежних модулів, які забезпечують узгоджену роботу системи для точного регулювання динамічних параметрів електродвигуна.

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

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

$$\ddot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \ddot{\psi}^* + \dddot{\psi}^*)$$

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

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu\psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v\omega^*)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega t} \tilde{\omega}$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu\psi^*} [-k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \mu\psi^* \tilde{i}_q) + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v\omega^*] - \frac{\dot{\psi}}{\psi^*} i_{1q}^*$$

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

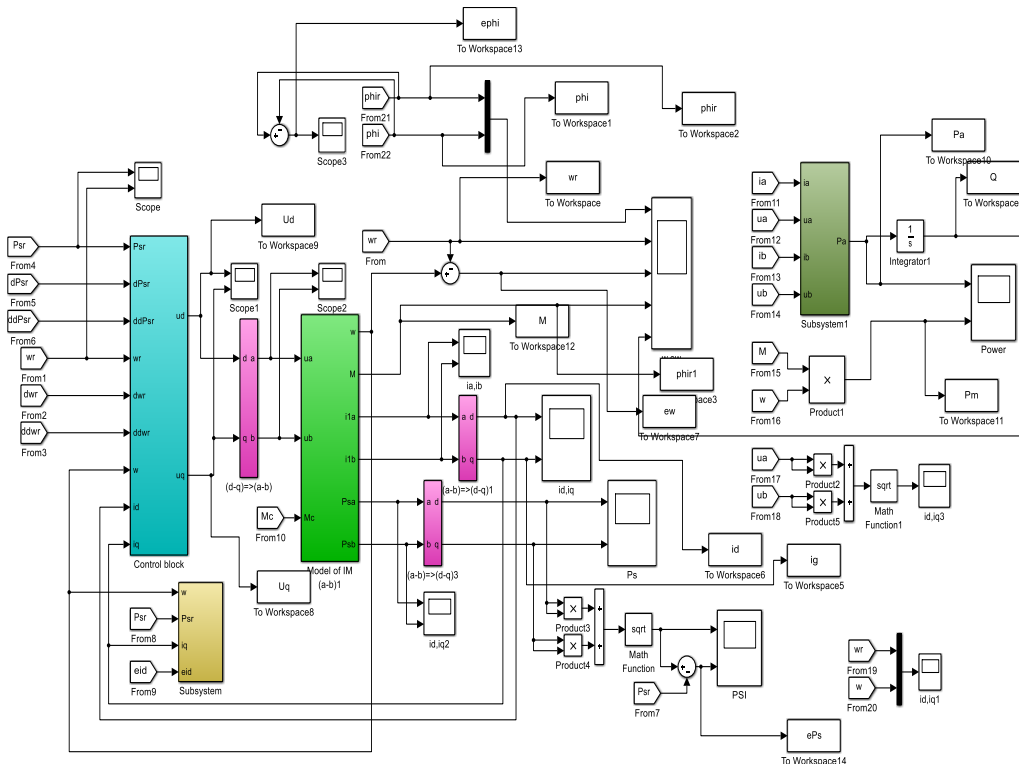


Рисунок 3.1 - Структурна схема

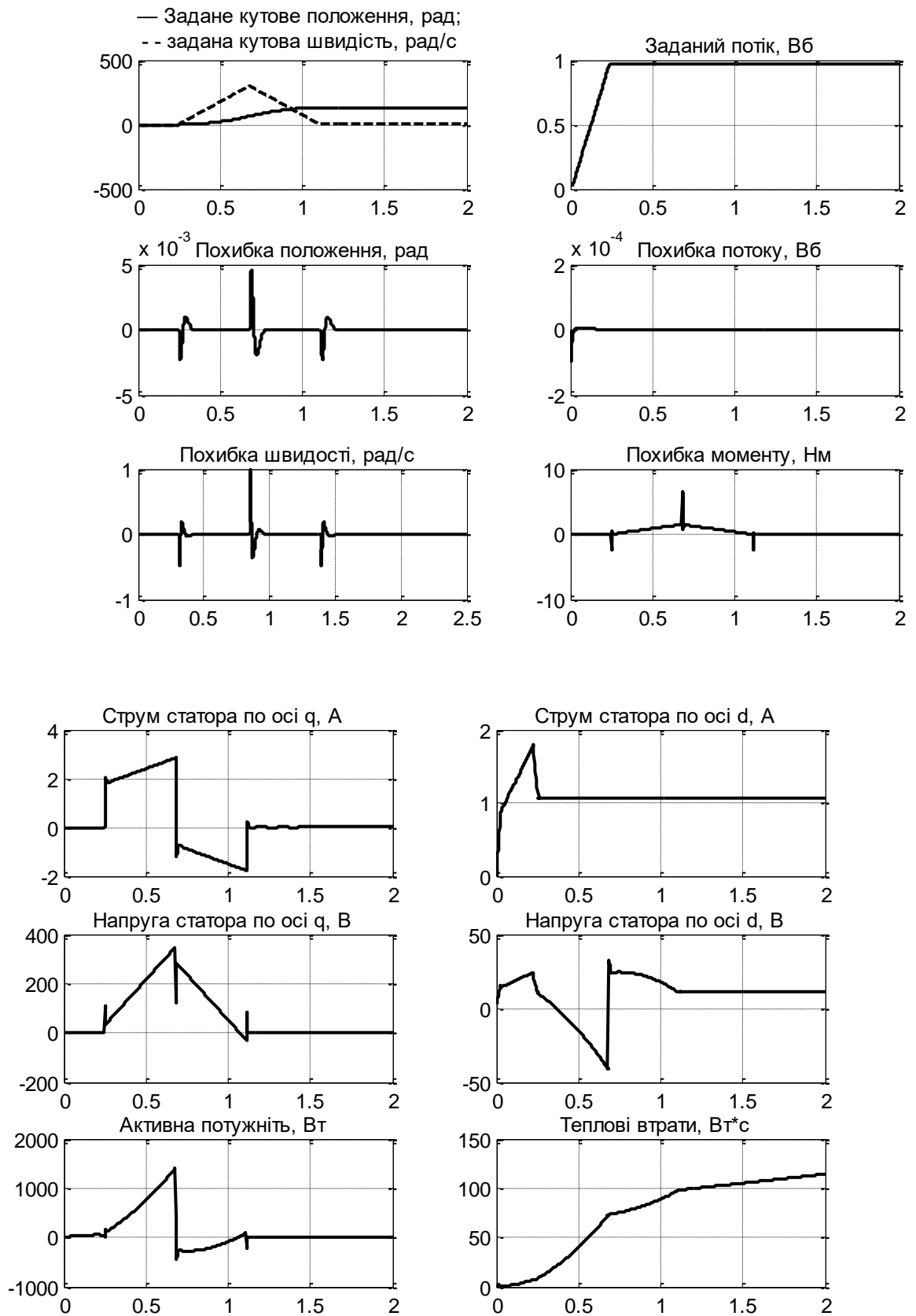


Рисунок 3.3 - Перехідні процеси $\varphi_3 = \varphi_{gr}$.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

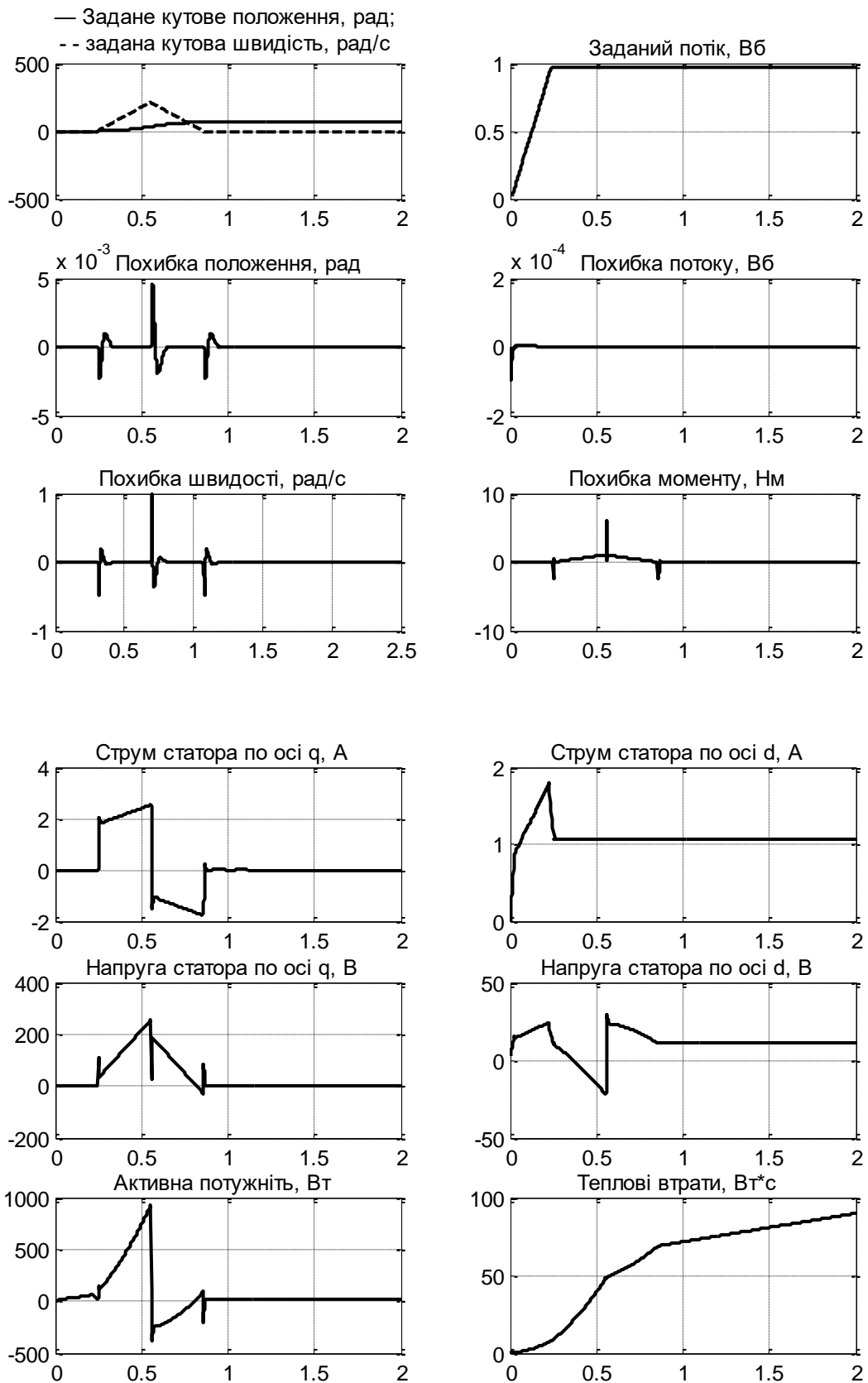


Рисунок 3.3 - Перехідні процеси $\varphi_3 < \varphi_{gr}$.

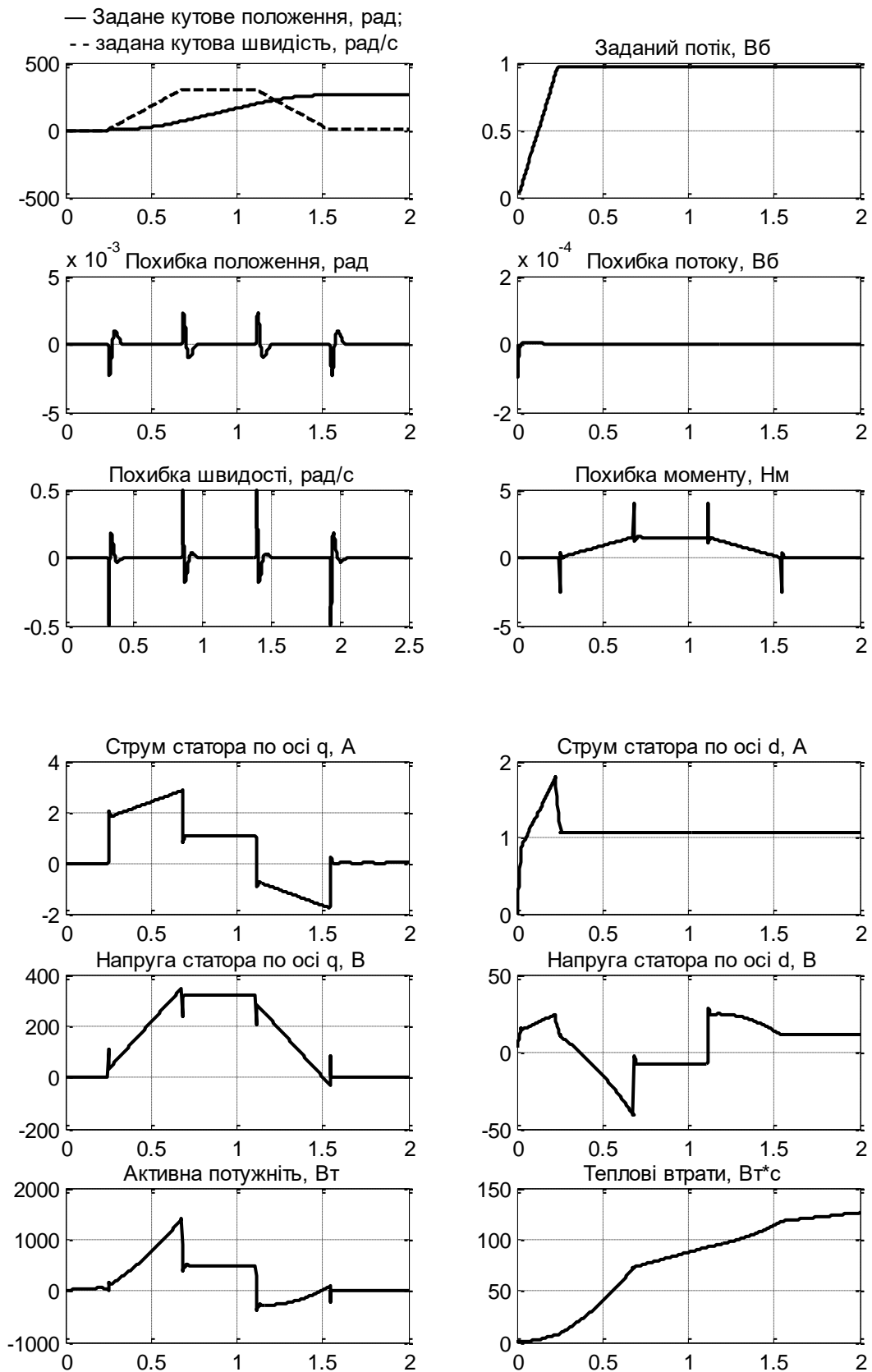


Рисунок 3.4 - Перехідні процеси відпрацювання переміщення $\varphi_3 > \varphi_{сп}$.

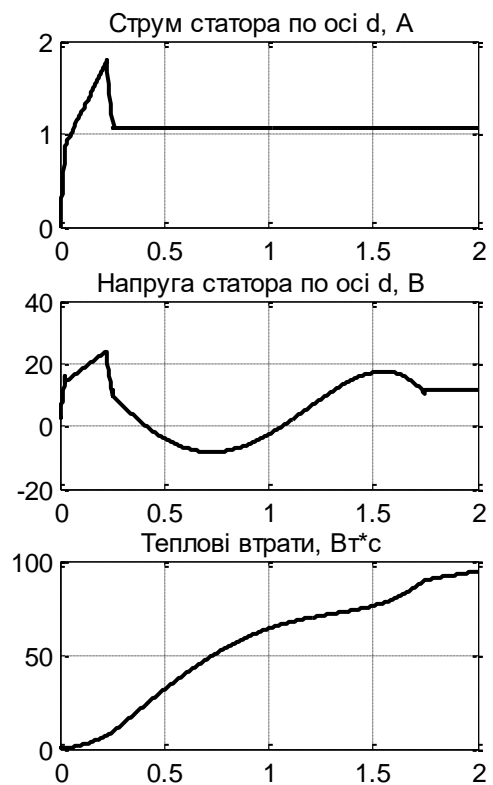
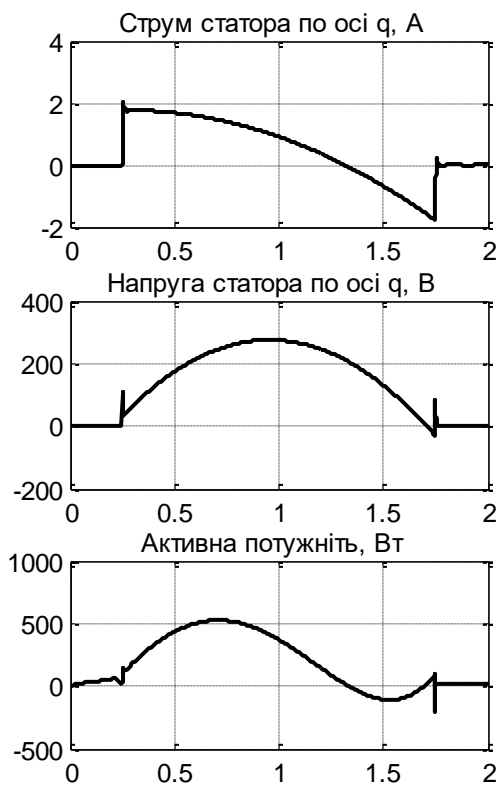
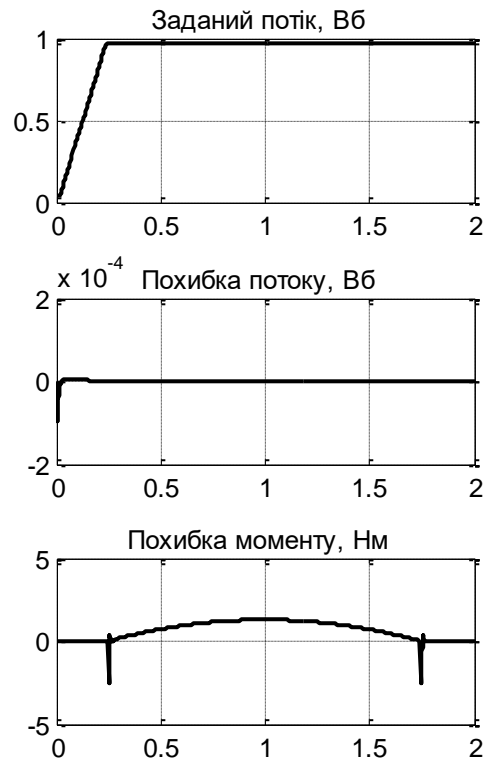
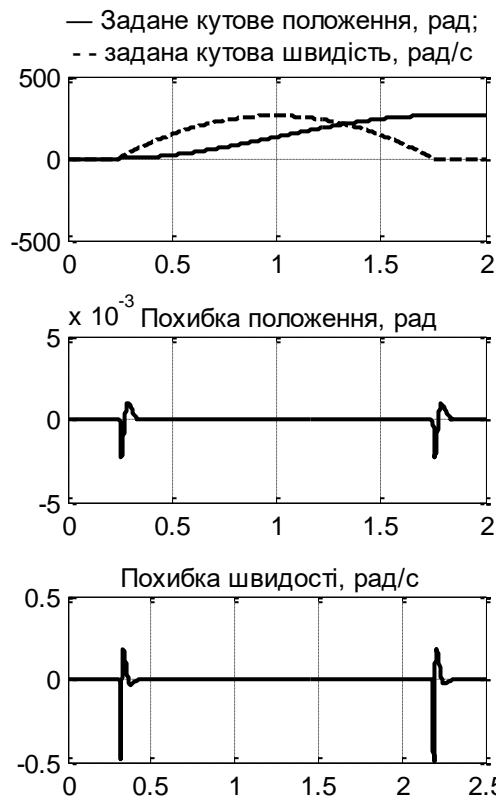


Рисунок 3.5 - Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

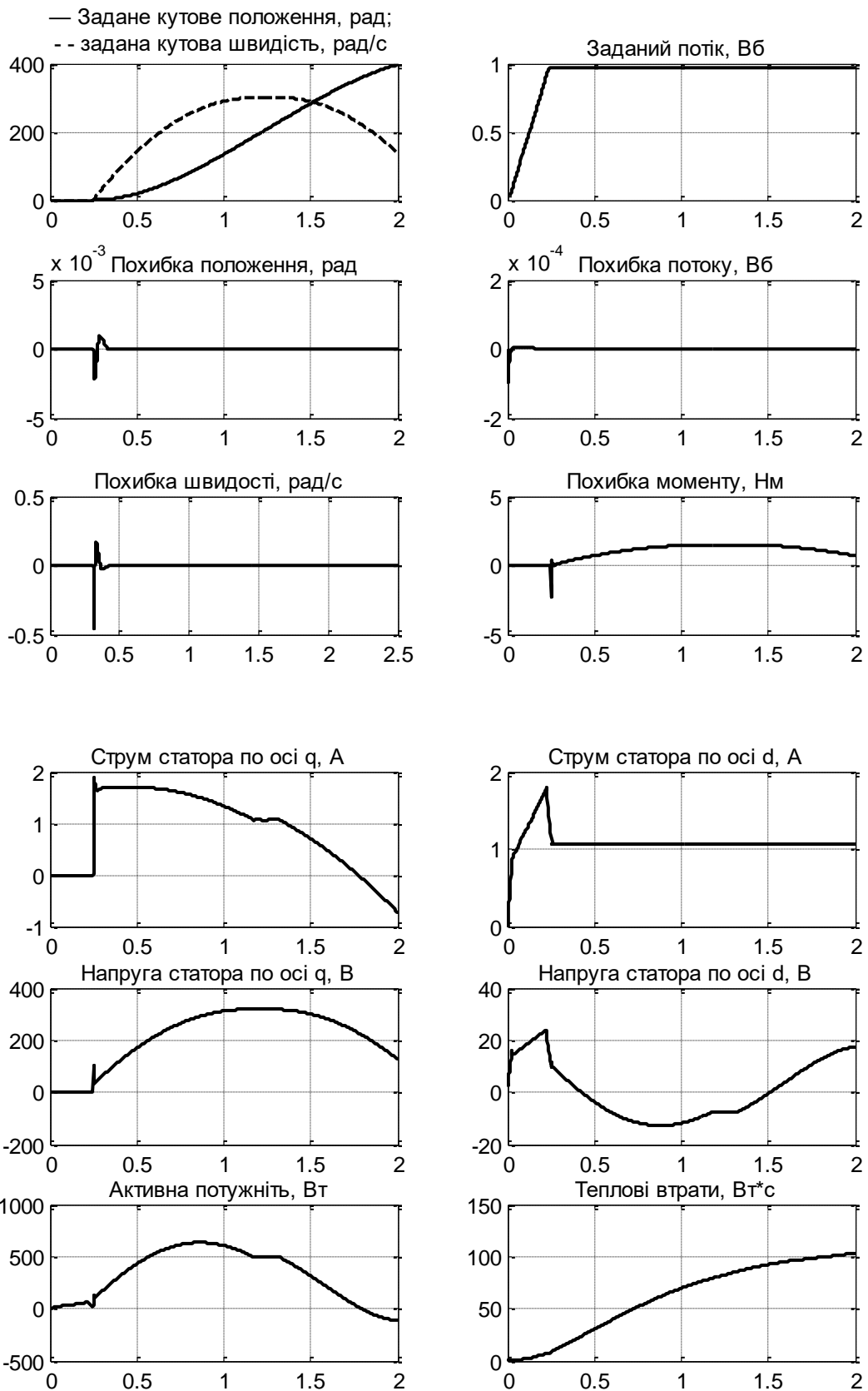


Рисунок 3.6 - Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

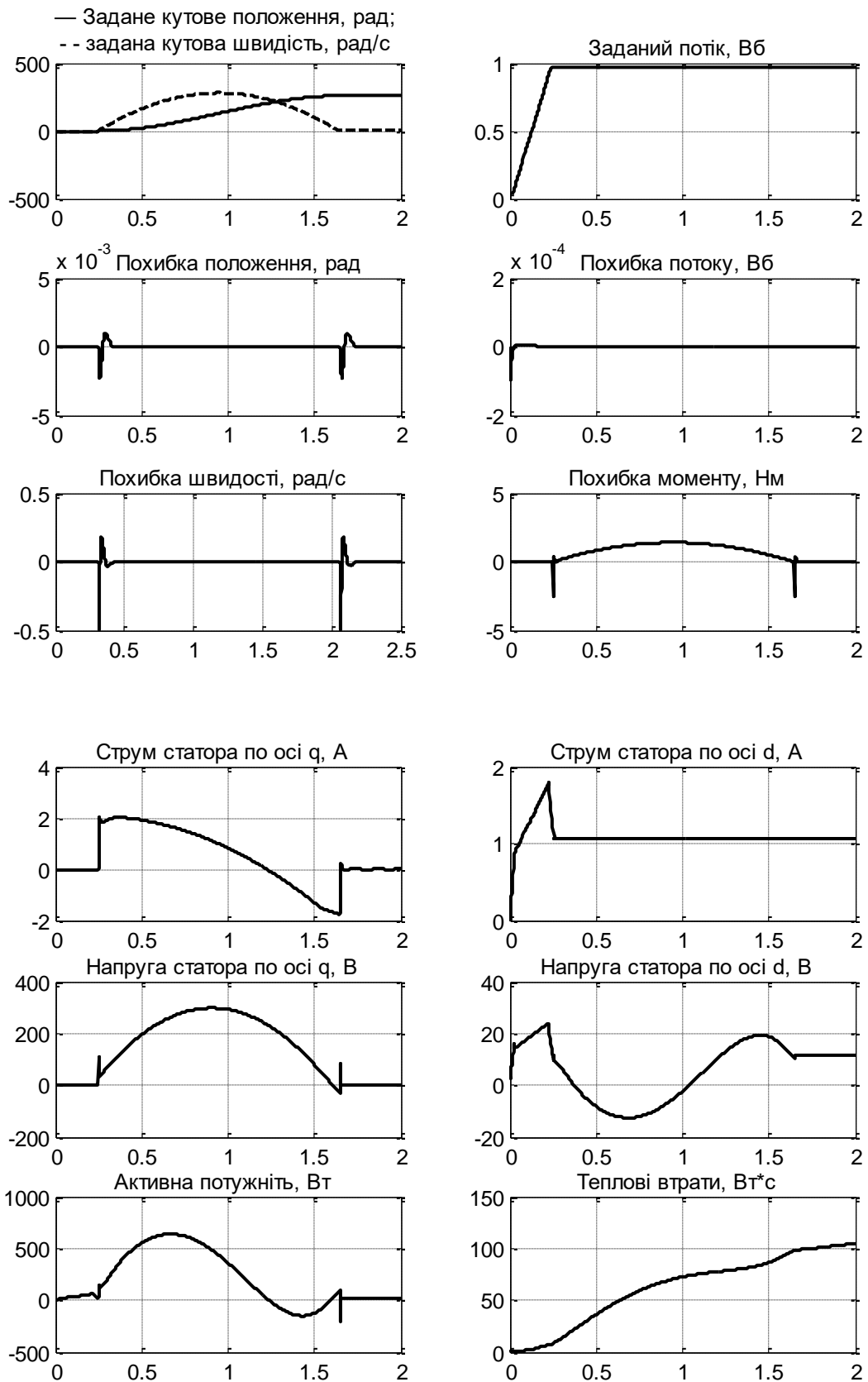


Рисунок 3.7 - Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

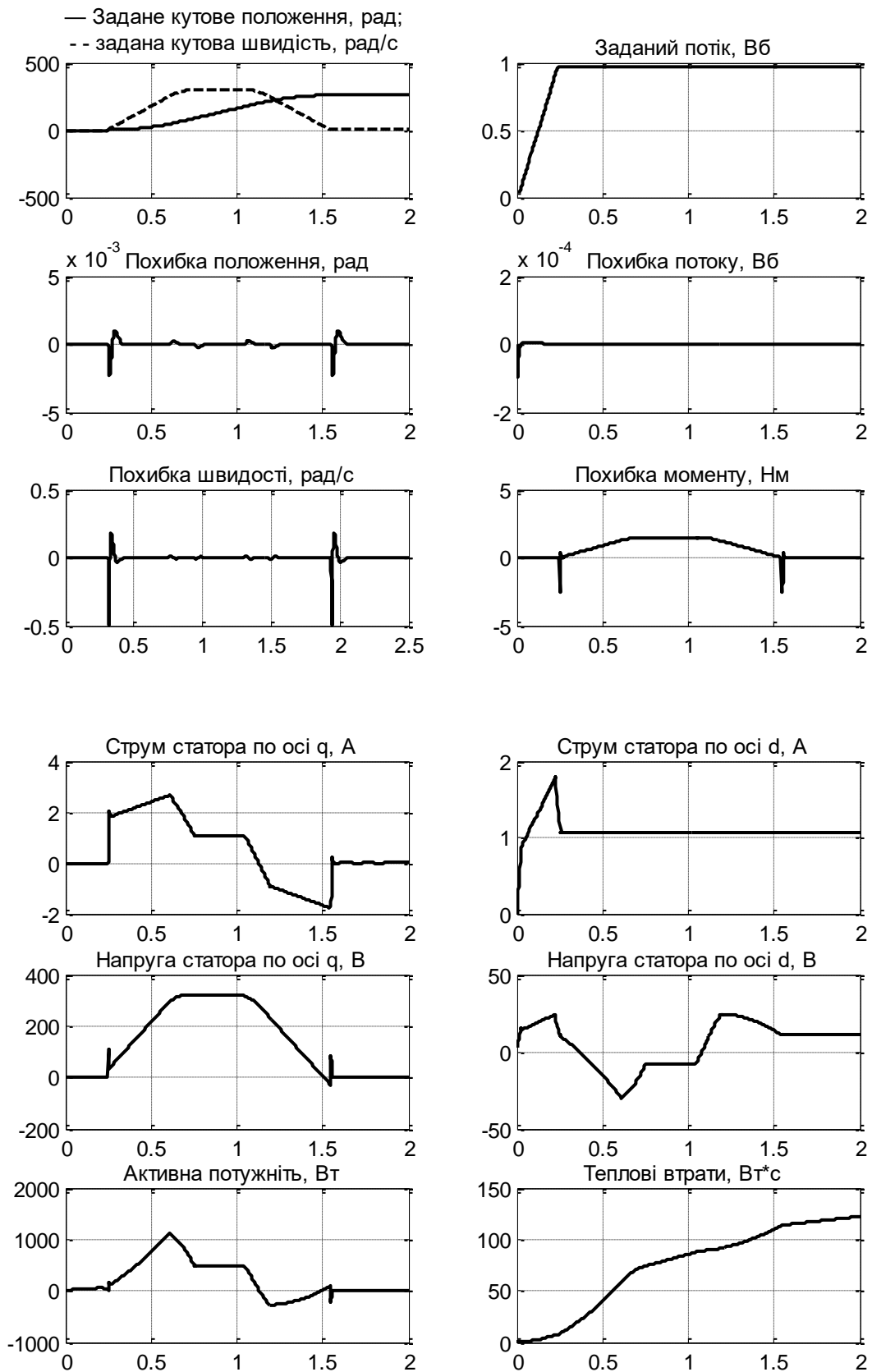


Рисунок 3.8 - Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

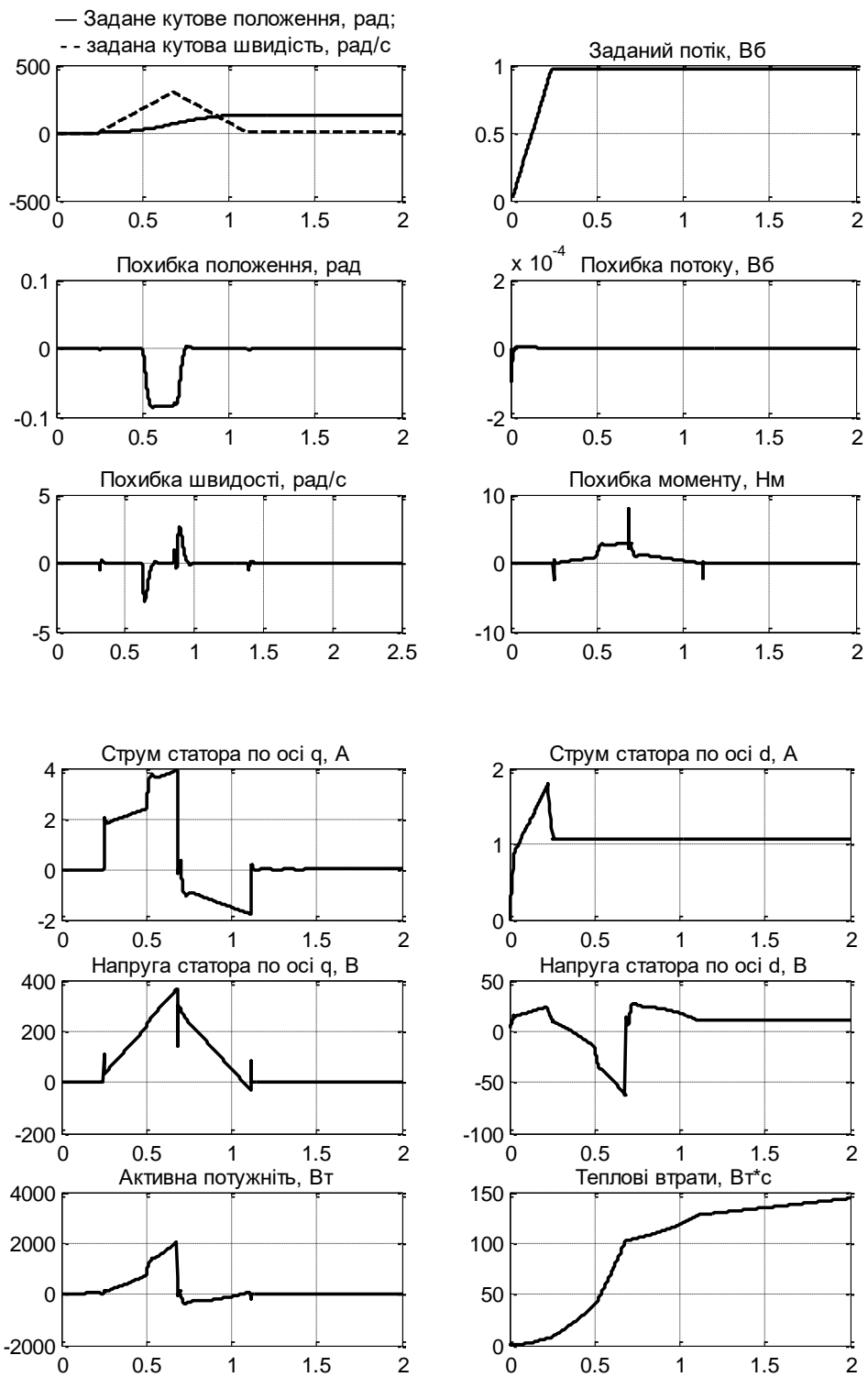


Рисунок 3.9 - Перехідні процеси $\varphi_3 = \varphi_{gr}$

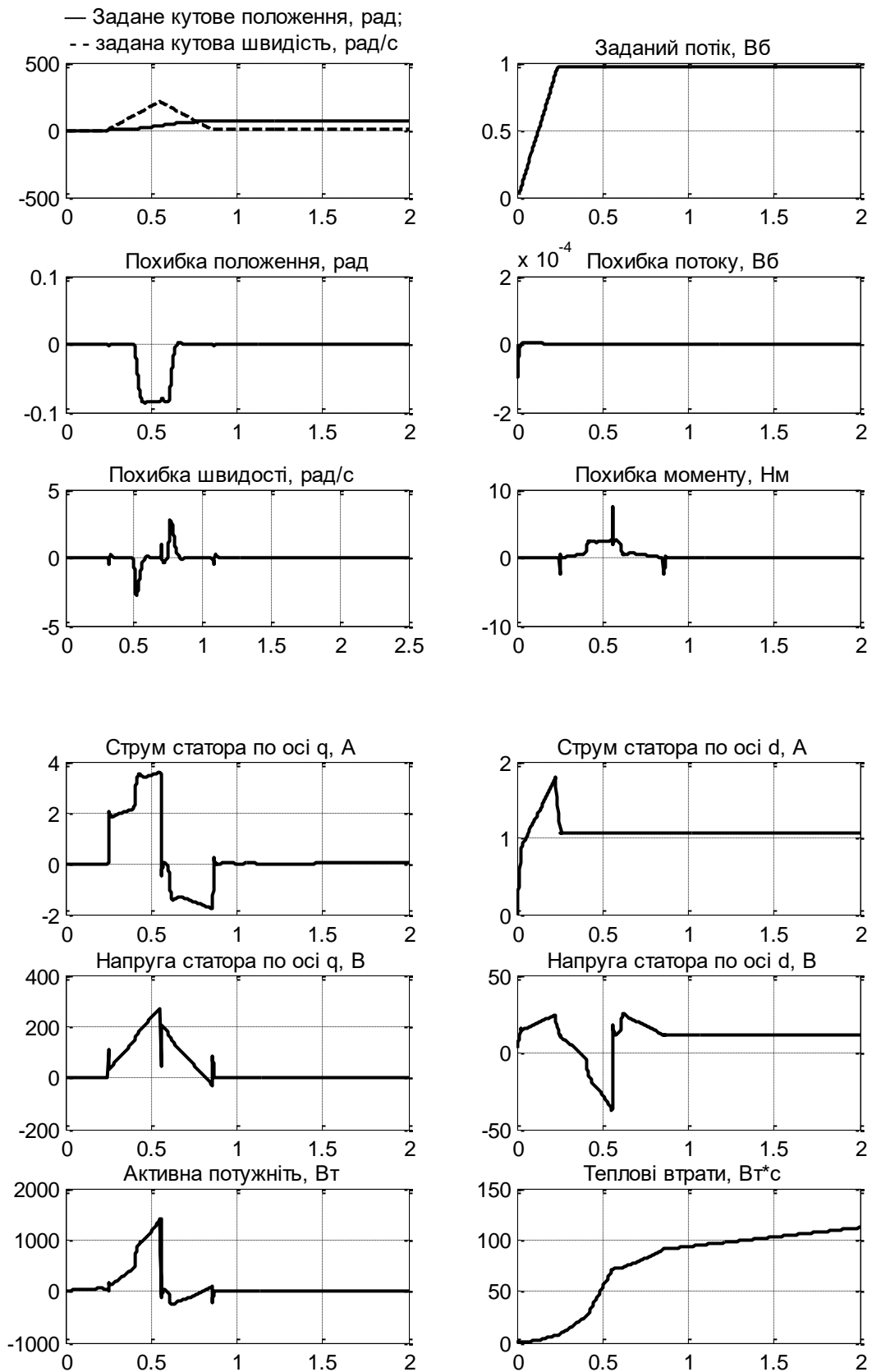


Рисунок 3.10 - Перехідні процеси $\varphi_3 < \varphi_{gr}$.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

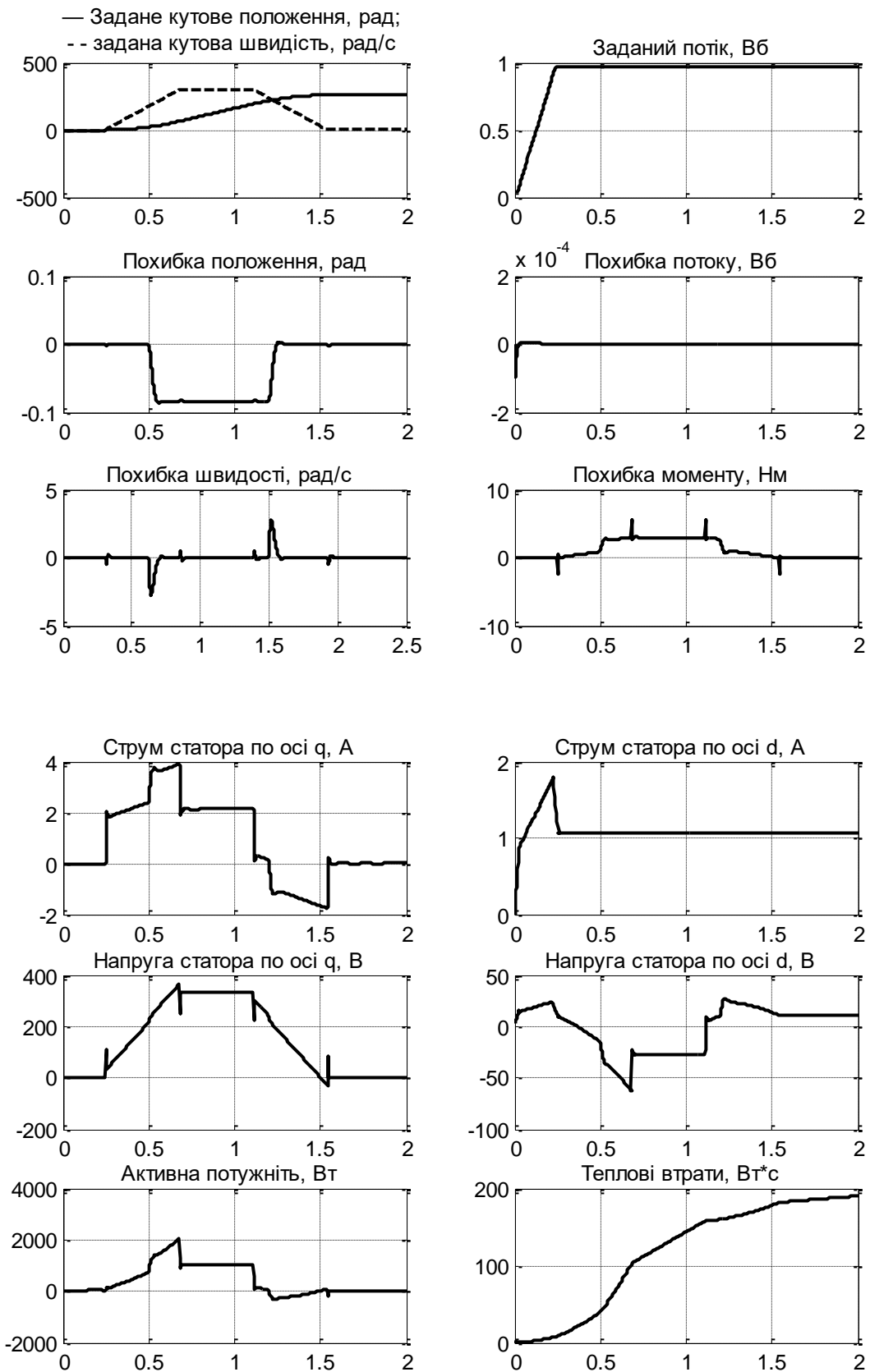


Рисунок 3.11 - Перехідні процеси $\varphi_3 > \varphi_{gr}$.

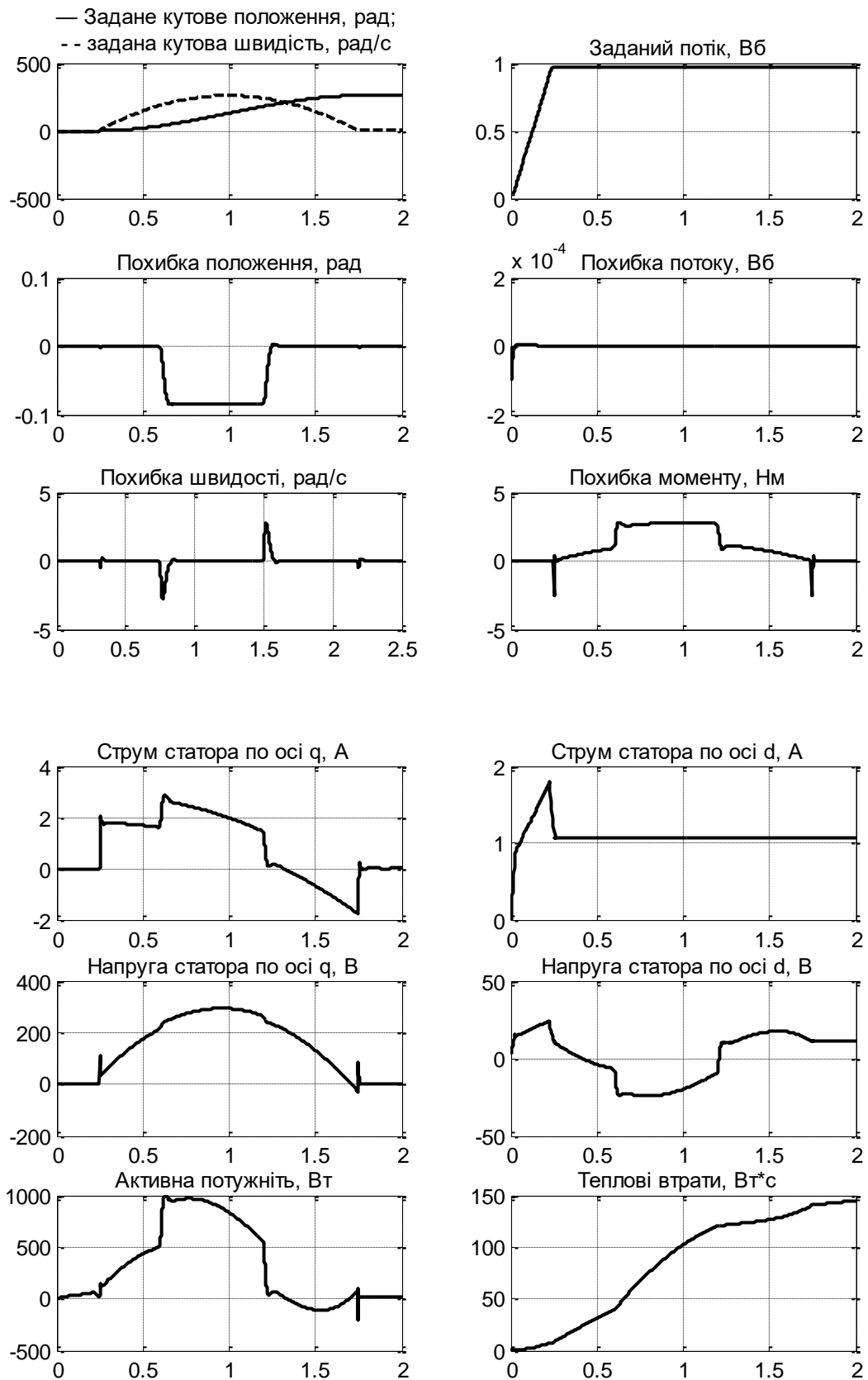


Рисунок 3.12 - Перехідні процеси

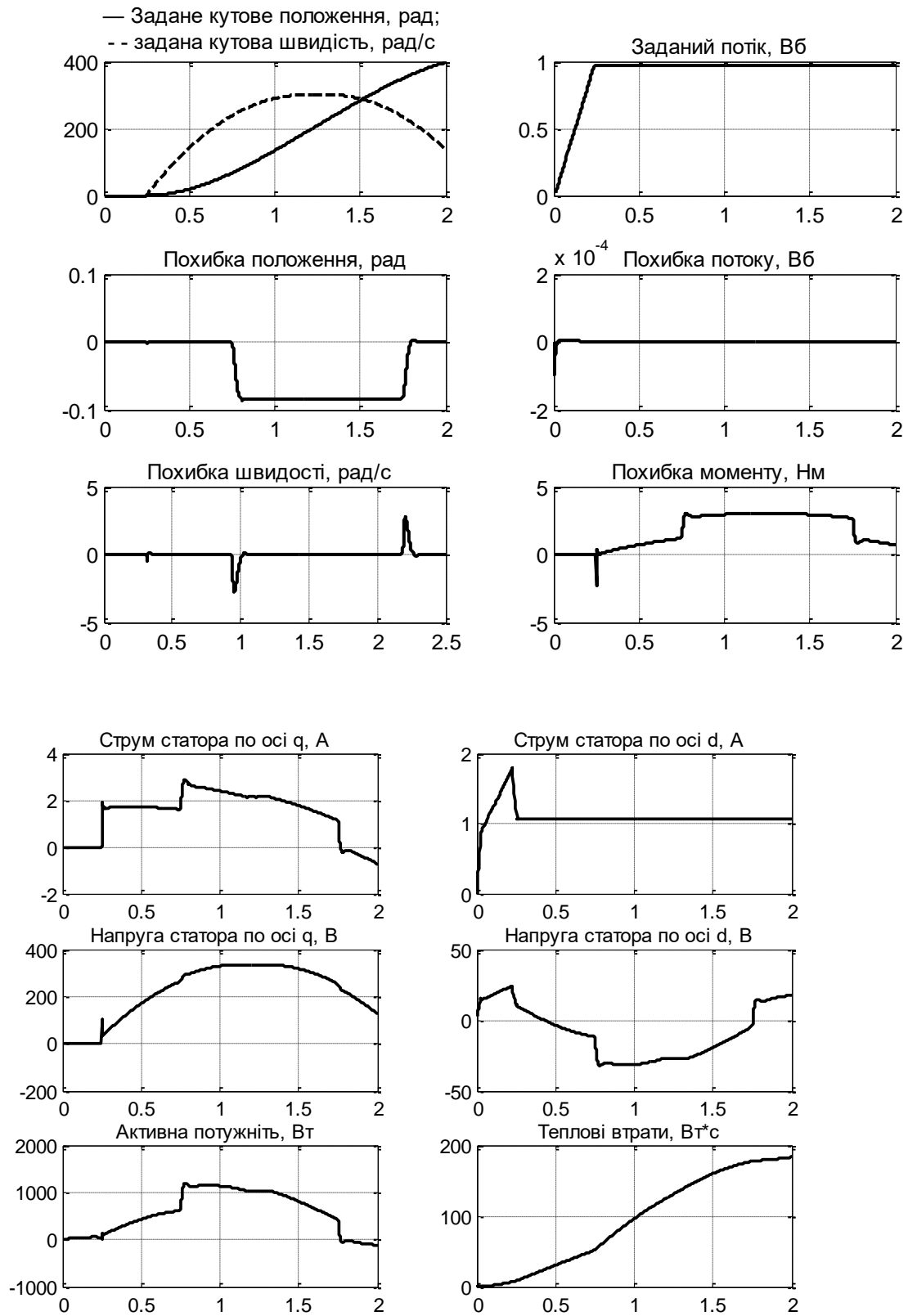


Рисунок 3.13. Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

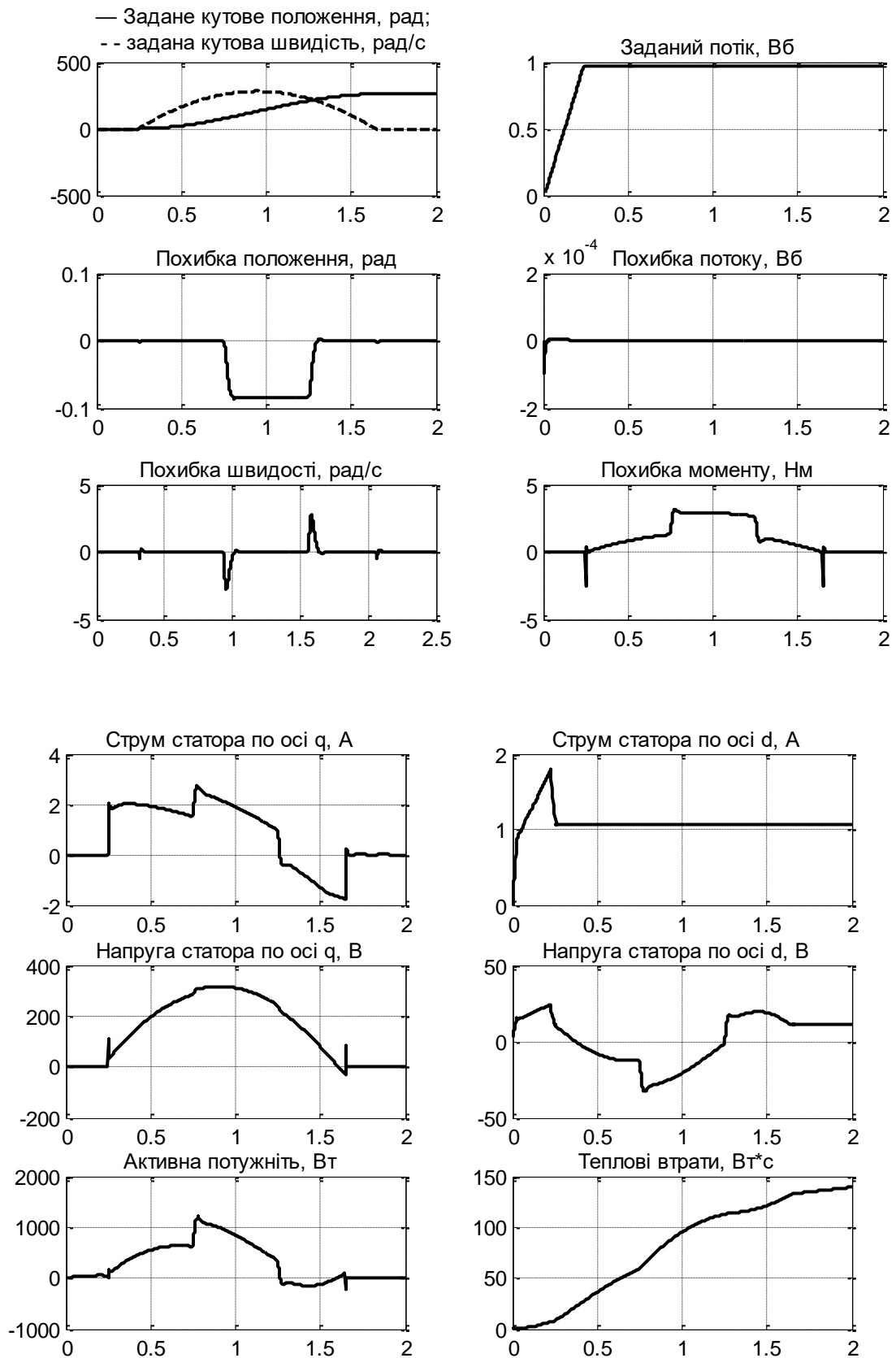


Рисунок 3.14 - Перехідні процеси

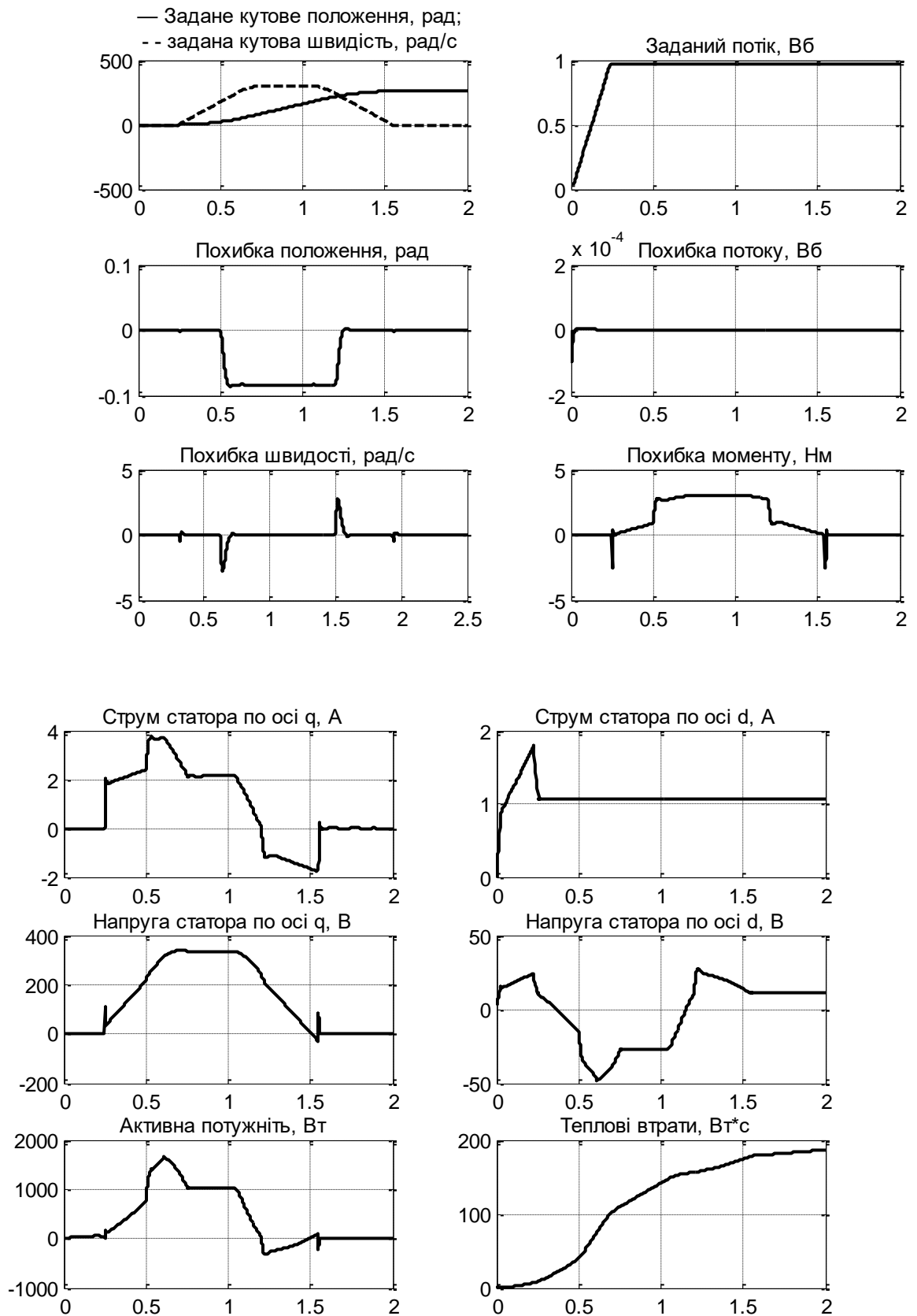


Рисунок 3.15 - Перехідні процеси

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Висновок

Розглянуті у дослідженні методи формування траєкторії руху забезпечують можливість ефективного відпрацювання заданого переміщення як з максимально можливою швидкістю, так і з орієнтацією на зниження активних (теплових) втрат у приводі. Залежно від вибраного критерію оптимізації формується відповідна еталонна тахограма, яка визначає характер зміни швидкості та прискорення у часі.

Однак аналіз результатів показує, що навіть за умов оптимізації за одним із критеріїв система не позбавлена динамічних похибок. Однією з причин такої похибки є те, що при формуванні діаграм переміщення не враховуються обмеження на ривок — тобто зміну прискорення за одиницю часу. У відсутності цього обмеження рух має місця з різкою зміною динамічних параметрів, що призводить до коливань та перевищення оптимальних навантажень на електропривід.

Крім того, у випадках, коли на систему накладається постійний зовнішній момент (так званий статичний момент навантаження), помітно зростає динамічна похибка при досягненні заданого кутового положення. Це спостерігається незалежно від обраного типу тахограми, що свідчить про необхідність адаптації алгоритмів руху до умов змінного навантаження.

Незважаючи на ці недоліки, розроблені та досліджені діаграми мають практичну цінність. Вони можуть бути використані у структурі позиційних електроприводів, що працюють у циклічних режимах із включенням функції стопоріння — зупинки приводу в точно заданій позиції.

Запропоновані алгоритми побудови оптимізованих діаграм руху легко адаптуються до реалізації у складі програмованих логічних контролерів (ПЛК). Завдяки цьому можливо забезпечити автоматичне формування командного профілю швидкості — тахограми — безпосередньо у пристрої керування, що значно підвищує функціональну гнучкість та точність сучасних систем електроприводу.

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк.
						57
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 АСПЕКТИ ПРАКТИЧНОЇ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ СИСТЕМ ПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

На основі ретельного аналізу функціональних можливостей та технічних характеристик інверторів провідних світових виробників, зокрема таких як Allen-Bradley, Siemens, ABB, Danfoss, Mitsubishi та інші, можна узагальнити ключові вимоги, які сучасні кінцеві користувачі висувають до частотних перетворювачів, що використовуються в системах електроприводів з асинхронними електродвигунами. Ці вимоги сформувалися як результат зростаючих очікувань щодо ефективності, гнучкості, надійності та інтеграційної здатності перетворювальних пристроїв у складних технологічних процесах [17].

До найбільш типових вимог належать [20]:

- Широкий діапазон регулювання частоти для забезпечення можливості точного керування швидкістю двигуна в межах як мінімальних, так і максимальних навантажень;
- Висока точність стабілізації параметрів руху, що особливо важливо для задач позиціонування і плавного розгону/гальмування;
- Інтегровані засоби захисту від перенапруги, перевантаження, короткого замикання, перегріву та втрати фази;
- Можливість підключення до цифрових мереж передачі даних (наприклад, Profibus, Modbus, EtherCAT), що забезпечує зручну інтеграцію у промислові системи автоматизації;
- Гнучке програмне налаштування логіки роботи без потреби в зовнішньому ПЛК;
- Компактність і модульність конструкції, що дозволяє легко адаптувати обладнання під просторові обмеження або нарощувати функціональність;

					ЕМКС 010005 000 ПЗ	Арк.
						58
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Наявність вбудованих алгоритмів векторного керування, які забезпечують підвищену динамічну точність без використання датчика швидкості;
- Енергоефективність та підтримка режимів енергозбереження, особливо актуальні в умовах високих тарифів на електроенергію;
- Можливість зворотного зв'язку за струмом, швидкістю чи положенням, що критично важливо для реалізації замкнутих систем керування.

Усі зазначені характеристики суттєво впливають на загальну продуктивність та стабільність роботи електроприводної системи, а також визначають рівень її адаптивності до змін технологічного навантаження.

У сучасних системах автоматизованого електропривода змінного струму широкого застосування набули схеми, побудовані на базі частотних перетворювачів з проміжною ланкою постійного струму. Типова функціональна структура такої системи зображена на рисунку 4.1. Як видно зі схеми, центральним елементом є частотний перетворювач, який виконує подвійне призначення: з одного боку, це силовий пристрій, що забезпечує перетворення енергії з мережі змінного струму у форму, придатну для керованого живлення асинхронного двигуна; з іншого — це керувальна частина, яка реалізує алгоритми контролю руху, захисту, стабілізації та адаптації до умов навантаження [19].

Таким чином, частотний перетворювач об'єднує функції як силового конвертера, так і електронного блоку керування, які традиційно в класичному електроприводі розглядалися окремо. Саме через це в технічній літературі та серед фахівців досить часто трапляється термінологічна неточність, коли частотний перетворювач помилково ототожнюють з повноцінною електропривідною системою. Проте, з наукової точки зору, це некоректно, оскільки електропривод — це значно ширше поняття, яке охоплює не лише перетворювальний пристрій, а й виконавчий механізм (електродвигун), датчики, зворотні зв'язки, а також системи керування вищого рівня.

У підсумку, слід наголосити, що хоча частотні перетворювачі є ключовими вузлами у складі сучасних електроприводів, самостійно вони не охоплюють усю повноту функціоналу електропривідної системи, і тому вживання терміну «електропривод» виключно щодо перетворювача є методологічно неправильним.

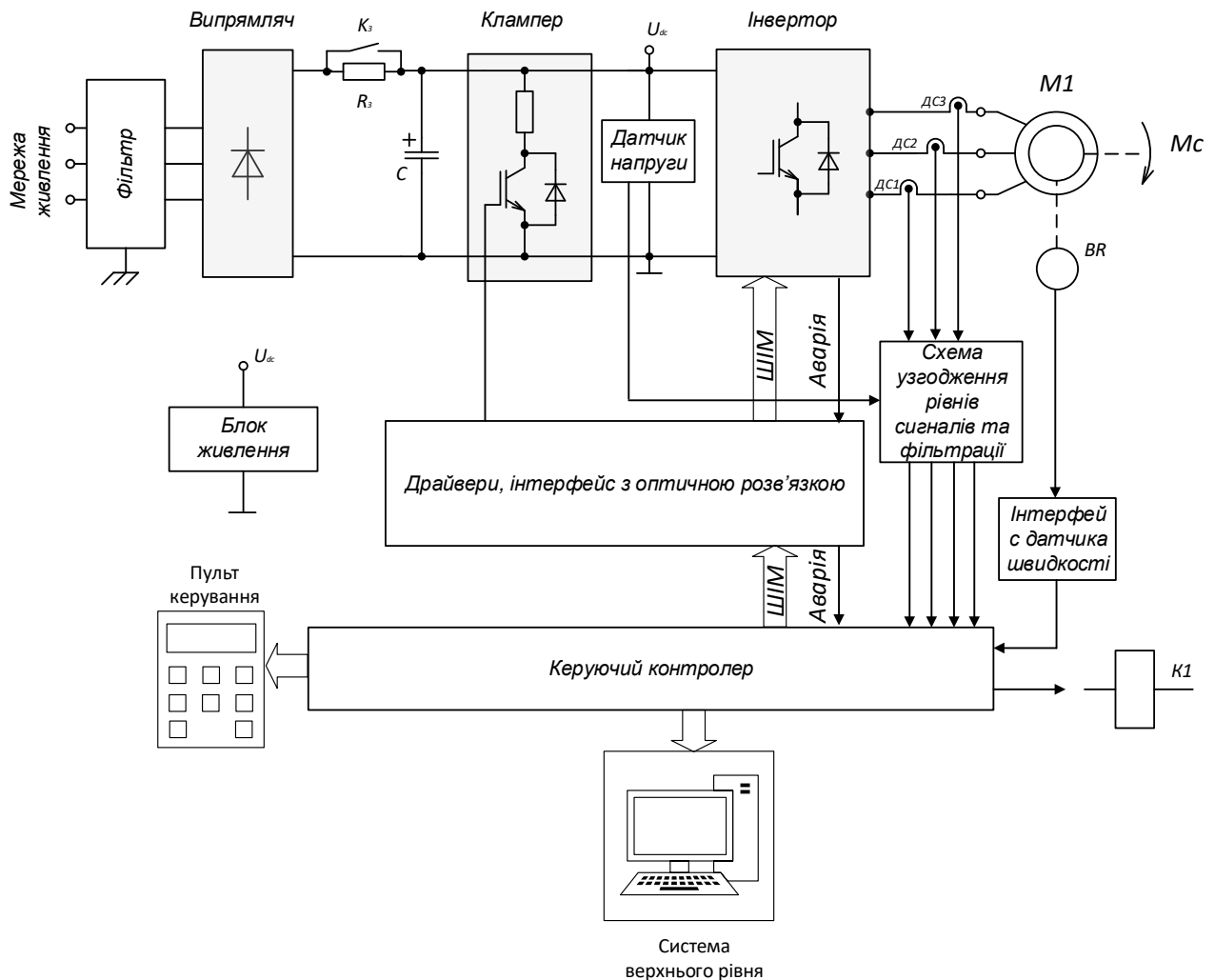


Рисунок 4.1 - Схема функціональна

У типовій конструкції сучасного частотного перетворювача змінного струму можна чітко виокремити дві функціонально незалежні, але тісно взаємопов'язані підсистеми: силову частину та керувальний модуль.

Силова частина виконує безпосереднє перетворення електричної енергії та включає такі основні компоненти [20]:

- вхідний електромагнітний фільтр, який пригнічує високочастотні перешкоди, що можуть проникати з мережі живлення або генеруватися самим перетворювачем;
- некерований випрямляч, призначений для трансформації змінної напруги в постійну;
- зарядний контур, який забезпечує контрольоване зарядження фільтрувальних ємностей у ланці постійного струму;
- фільтрувальні конденсатори, що згладжують пульсації та стабілізують напругу після випрямляча;
- кламперний захист, який запобігає пошкодженню елементів силового каскаду внаслідок перенапруг;
- датчики напруги ланки постійного струму, що виконують моніторинг рівня напруги для системи керування;
- інвертор, що здійснює зворотне перетворення постійної напруги у змінну з потрібними частотно-амплітудними характеристиками;
- датчики вихідного струму, що здійснюють контроль струмового навантаження на виході інвертора;
- драйвери силових ключів та схеми гальванічної розв'язки, які забезпечують надійне, безпечне та точне керування роботою силових напівпровідникових елементів;
- вбудований блок живлення, що подає необхідні стабілізовані напруги для всіх вузлів пристрою.

Керувальний модуль виконує функції інтелектуального контролю й аналізу, забезпечуючи реалізацію алгоритмів керування. До його складу входять [22]:

- основний цифровий контролер, найчастіше побудований на основі цифрового сигнального процесора (DSP) або продуктивного мікроконтролера. Він виконує обчислення, необхідні для реалізації векторного керування, ПІ-регуляторів, трансформацій координат (Парк, Кларк), модуляції ШІМ-сигналів тощо;

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						61
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- схеми узгодження сигналів, які забезпечують надійний обмін даними між контролером та зовнішніми/внутрішніми модулями.

Таким чином, ефективне функціонування частотного перетворювача досягається завдяки скоординованій взаємодії силової частини, яка виконує фізичне перетворення енергії, та системи керування, яка формує керуючі дії відповідно до встановлених алгоритмів і режимів експлуатації.

У системах електроприводу змінного струму керуючий контролер виконує критично важливу роль, адже саме він забезпечує повноцінну реалізацію керувальних алгоритмів, координацію допоміжних підсистем та інтеграцію з вищими рівнями автоматизації. Його функціональність є багаторівневою та охоплює як базові задачі управління динамікою приводу, так і комплексну обробку зовнішніх команд та діалог із периферійним обладнанням.

З огляду на специфіку функціонального навантаження, усі операції, що виконуються контролером, умовно поділяються на три ключові категорії:

Цей клас функцій охоплює весь спектр реального часу, пов'язаний безпосередньо з обчисленням алгоритмів регулювання. До таких функцій належать [19]:

- реалізація математичних моделей для керування асинхронною машиною, зокрема в рамках векторного керування;
- обчислення параметрів струмового, швидкісного та позиційного регулювання;
- генерація широтно-імпульсних сигналів для керування ключами силової частини інвертора;
- зчитування аналогових сигналів зворотного зв'язку (наприклад, токових і напругових датчиків), їхнє фільтрування та цифрова обробка.

Надзвичайно важливим аспектом є те, що ці функції повинні виконуватись із мінімальною затримкою, що висуває суворі вимоги до швидкодії обчислювального ядра контролера, як правило, реалізованого на базі цифрового сигнального процесора (DSP) або високопродуктивного мікроконтролера.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До цього розділу входить організація керування супутніми процесами та підсистемами самого перетворювача [10 - 17]:

- логіка включення/вимикання допоміжних вузлів (наприклад, реле заряду, охолоджувальних вентиляторів, блоків живлення);
- виконання протиаварійних заходів і діагностичних процедур (наприклад, при перегріві, перевантаженні чи зникненні фази);
- аналіз стану дискретних і аналогових входів;
- формування команд на вихідні сигнали, що передаються іншим модулям або зовнішнім виконавчим пристроям;
- приймання команд від систем диспетчерського управління, ПЛК або операторських панелей.

Ці функції забезпечують адаптацію приводу до конкретного промислового середовища та робочого алгоритму технологічного процесу.

Третій напрям охоплює реалізацію взаємодії з зовнішніми інтерфейсами, такими як:

- локальні панелі оператора, на яких відображаються параметри системи в реальному часі;
- мережеві протоколи (наприклад, CANopen, EtherCAT, Modbus TCP/RTU, Profibus), через які привід стає частиною більших автоматизованих систем;
- засоби дистанційного моніторингу, діагностики й налаштування параметрів.

Для забезпечення цієї взаємодії використовуються спеціалізовані схеми узгодження сигналів та протокольні стекові модулі, що дозволяють забезпечити стійкий і швидкий зв'язок з іншими компонентами автоматизованого комплексу.

З урахуванням перелічених функцій, типовий контролер електропривода змінного струму має складну структуру, яка включає в себе:

- Обчислювальне ядро — DSP або сучасний мікроконтролер з апаратною підтримкою ШИМ, АЦП, DMA, таймерів та інших периферій.

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк. 63
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Систему збору та обробки зворотних сигналів — АЦП із високою роздільною здатністю, сигнальні фільтри, оптоізолювані входи.
- Модулі генерації ШІМ — програмовані генератори для формування сигналів керування інвертором.
- Захисні схеми — як апаратні, так і програмні засоби для виявлення аварійних режимів.
- Комунікаційні інтерфейси — USB, RS-485, CAN, Ethernet, які дозволяють інтегрувати електропривод у розподілені мережі.
- Модулі пам'яті — оперативна, постійна та енергонезалежна пам'ять для зберігання конфігурацій, параметрів і логів.

Процедура вибору датчиків струму в силових електронних системах базується, передусім, на визначенні максимально можливого струмового навантаження, яке виникає під час роботи електроприводу. Основним критерієм є те, що верхня межа вимірювального діапазону датчика повинна перевищувати або, щонайменше, відповідати піковому значенню струму, яке може виникати в електричному колі.

Для надійного вимірювання вихідного струму інвертора, який є складовою частиною частотного перетворювача в системі векторного керування асинхронним двигуном, необхідно врахувати номінальні та короткочасні струмові перевантаження. Це дозволяє уникнути спотворень у роботі вимірювального тракту та гарантує стабільність функціонування системи керування навіть у динамічних режимах роботи.

У результаті аналізу режимів роботи та розрахункових значень навантажувального струму було встановлено необхідність використання датчиків, здатних точно реєструвати струми в діапазоні до 48 А. Для задоволення цієї вимоги обрано модель струмового датчика LTS 15-NP, яка відповідає технічним характеристикам проекту.

Даний датчик має такі основні параметри:

- Номінальний струм: 5 А;
- Максимальний діапазон вимірювання: ± 48 А;

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Тип: трансформаторний датчик струму з гальванічною розв'язкою на основі ефекту Холла;
- Переваги: висока точність, широкий динамічний діапазон, здатність до роботи в умовах електромагнітних завад.

З метою реалізації трифазної системи контролю струму, яка забезпечить коректну побудову векторів струму та напруги в алгоритмах векторного керування, планується встановлення двох датчиків струму на виході інверторного каскаду. Це дозволяє, шляхом використання принципу суми струмів у трьохфазній системі (де сума миттєвих значень струмів дорівнює нулю), визначати третю фазу через обчислення. Такий підхід дає змогу зменшити кількість вимірювальних елементів без втрати точності [20].

Підбір здійснено із використанням онлайн-ресурсу виробника, де були проаналізовані технічні характеристики різних моделей відповідно до потреб системи. Остаточний вибір LTS 15-NP є обґрунтованим як з технічної, так і з економічної точки зору, оскільки дана модель поєднує у собі надійність, доступність і достатню точність вимірювань у заданому діапазоні.

Для реалізації функції моніторингу напруги в ланці постійного струму у складі силового каскаду частотного перетворювача доцільно використати спеціалізований датчик напруги типу LV 25-1200. Цей датчик забезпечує високоточне вимірювання напруги з гальванічною розв'язкою, що критично важливо для безпечного функціонування системи керування та надійного обміну даними з цифровим контролером. Принципова схема підключення зазначеного датчика наведена на рисунку 4.2, де продемонстровано його інтеграцію до вимірювального каналу. Обрана конфігурація дозволяє отримувати точну інформацію про напругу шини постійного струму, що, своєю чергою, забезпечує ефективну реалізацію алгоритмів контролю енергетичних параметрів та адаптивного керування електроприводом [20].

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

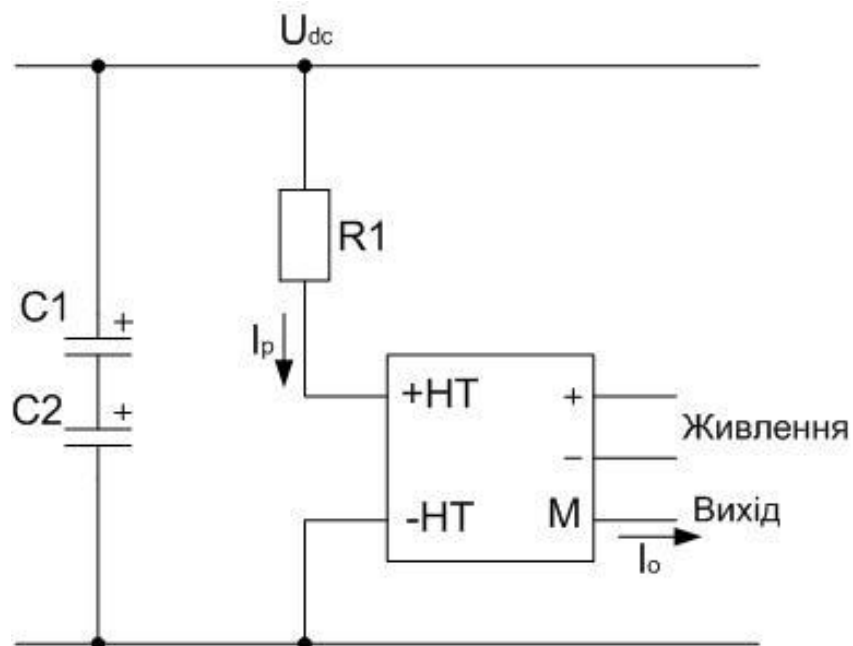


Рисунок 4.2 – Схема підключення

ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи було здійснено дослідження позиційних електроприводів, що функціонують без застосування зворотного зв'язку за кутовим положенням. Основна мета полягала у впровадженні асинхронного електродвигуна на заміну традиційно використовуваного двигуна постійного струму, з урахуванням вимог до систем без сенсорного контролю положення.

У процесі реалізації поставленого завдання було виконано низку ключових етапів:

- Проведено систематизований аналітичний огляд автоматизованих систем регулювання положення виконавчих механізмів. У рамках цього огляду було висвітлено характерні ознаки подібних систем та обґрунтовано можливість побудови електроприводу без використання прямого вимірювання кутового положення вала. Сформульовано базові технічні та функціональні вимоги до таких електроприводів, які дозволяють забезпечити необхідну точність позиціонування при відсутності прямої зворотної інформації.

- Докладно описано процедуру формування еталонних діаграм руху, які забезпечують оптимальне відпрацювання заданих переміщень як за критерієм мінімізації часу, так і за критерієм енергетичної доцільності, зокрема зменшення активних втрат. Побудова зазначених діаграм виконувалась без урахування дії моменту статичного опору, що дозволило ізолювати вплив цього чинника на динаміку приводу. Запропоновано алгоритмічну блок-схему, яка реалізує вибір оптимального профілю переміщення на підставі вхідних параметрів — амплітуди переміщення та заданого часу його реалізації.

- Розглянуто специфіку методів синтезу руху, які забезпечують досягнення цільового положення з максимально можливою швидкістю або з урахуванням критерію теплової ефективності. Однак у кожному з аналізованих підходів спостерігаються динамічні похибки, зумовлені відсутністю обмежень на ривок (третю похідну координати за часом). Зокрема, при врахуванні додаткового статичного моменту опору виявлено зростання похибки

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						67
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відпрацювання кутового положення, що підтверджує необхідність уточнення моделі. Представлені діаграми є доцільними для використання в позиційних електроприводах, що працюють у режимах жорсткої зупинки (стопоріння). Запропоновані алгоритми побудови траєкторій можуть бути програмно реалізовані в апаратно-програмних засобах типу ПЛК або цифрових контролерів, що генерують сигнали управління (тахограми) для виконавчого приводу.

- Окрему увагу приділено практичним аспектам впровадження систем регулювання положення на базі асинхронних двигунів із векторним керуванням. Розглянуто технічні характеристики, функціональну архітектуру та вимоги до сучасних частотних перетворювачів, які забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування без використання сенсорів положення. Представлено типову структурну схему векторно-керованого асинхронного електроприводу, в якій забезпечено інтеграцію силової та керувальної частин.

-

					<i>ЕМКС 010005 000 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		