

**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 швидкістю із векторно-  
керуваним асинхронним двигуном»

**Виконав(ла)**

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

Іван ЛОМОНОС  
(ім'я, прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Керівник роботи**

д.т.н., проф. Тетяна НІКІТИНА  
(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	ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА	11
2	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОХМАСОВОЇ ЕМС	24
3	СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	35
4	ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ	49
	Висновки	55
	Список використаних джерел	57
	Додатки	59

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>		
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Ломонос І.А.</i>			Електромеханічна система керування швидкістю із векторно- керованим асинхронним двигуном		
<i>Перевір.</i>		<i>Нікітіна Т.Б.</i>					
<i>Т. контр.</i>							
<i>Н. Контр.</i>		<i>Нікітіна Т.Б.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Кузнецов Б.І.</i>					
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
					6		
					<i>БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БЗ-Е21</i>		

## ВСТУП

Електропривод як ключовий елемент електромеханічних систем посідає провідне місце у промисловості, транспортній сфері, побутовій техніці та багатьох інших галузях людської діяльності. Його функціональні можливості постійно вдосконалюються, що зумовлює розширення сфери практичного використання. За статистичними даними, понад 60% загального обсягу виробленої електроенергії у світі споживається електродвигунами різного призначення. Такий масштаб споживання наочно демонструє виняткову значущість енергозберігаючих технологій та актуальність впровадження методів регулювання режимів роботи електроприводу як одного з найбільш ефективних шляхів оптимізації енерговитрат [1].

З історичної точки зору, на всіх етапах розвитку електроприводної техніки дослідники та інженери прагнули замінити традиційні електромашинні перетворювачі на статичні напівпровідникові пристрої, здатні забезпечити більшу надійність, компактність, ефективність і точність керування. Однак технічна реалізація цього завдання стала можливою лише після створення тиристорів — напівпровідникових ключових елементів, що відкрили нові можливості для формування імпульсно-фазових систем керування. Паралельний розвиток мікроелектроніки надав змогу реалізовувати складні алгоритми управління, що істотно підвищило гнучкість та адаптивність електроприводів до зміни навантажень і технологічних вимог.

Зараз практично всі високопродуктивні електроприводи функціонують на основі силових перетворювачів, сконструйованих з використанням повністю керованих напівпровідникових транзисторів типу IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) або MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Ці елементи мають суттєві переваги порівняно з тиристорами, зокрема — вищу частоту комутації, менші втрати на перемикання, а також кращі характеристики в режимах високої швидкодії. Це дозволяє реалізовувати точне, динамічно стійке керування електродвигуном навіть у складних умовах експлуатації [2].

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку з цим, сучасні системи електроприводу характеризуються високими вимогами до точності, швидкодії, надійності та адаптивності. Особливо це стосується спеціалізованих галузей, таких як аерокосмічна промисловість, залізничний транспорт, робототехніка, системи автоматизованого наведення озброєння, включаючи бойові модулі на рухомих платформах. У подібних застосуваннях електропривод повинен забезпечувати точне позиціонування виконавчого механізму в умовах змінних інерційних характеристик і непередбачуваних навантажень.

Однією з найбільш поширених конструктивних схем, яка знаходить широке застосування в системах з підвищеними вимогами до керованості, є двохмасова електромеханічна система із пружним з'єднанням між елементами. В такій моделі електродвигун (перша маса) з'єднується з робочим органом (друга маса) через пружну механічну трансмісію. Подібні схеми характерні, наприклад, для механізмів наведення гармат, антенних систем, прецизійних приводів тощо.

Згідно з теоретичними дослідженнями та експериментальними даними [1, 2], динамічні характеристики таких систем істотно залежать від нелінійностей, зумовлених змінними моментами інерції, впливом пружних зв'язків та зовнішніми збуреннями. Такі чинники ускладнюють процес точного регулювання положення виконавчого органу, викликаючи коливання, запізнення та інші негативні явища. У результаті виникає необхідність застосування спеціалізованих алгоритмів керування з урахуванням вищезазначених особливостей, які б дозволили забезпечити стійкість та точність функціонування системи в умовах реального експлуатаційного навантаження.

У процесі проєктування систем автоматичного керування електроприводом в подібних конфігураціях часто доводиться змінювати структуру регуляторів, а також впроваджувати адаптивні та нелінійні методи моделювання, зокрема моделі спостерігачів, предиктивне керування, логіку нечітких рішень або нейромережеві підходи. Це дозволяє компенсувати негативний вплив змінної динаміки та досягати оптимальних показників точності, швидкодії та стійкості [3].

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, сучасний електропривод — це не лише засіб передачі енергії від джерела до виконавчого механізму, але й складна, інтелектуальна система, яка вимагає комплексного підходу до свого проєктування, інтеграції сенсорних технологій та використання складних математичних моделей. Розвиток цієї галузі має стратегічне значення для технологічного прогресу та конкурентоспроможності у різних секторах економіки.

У сучасній практиці автоматизованого керування дедалі більшого поширення набувають системи, що реалізуються на основі принципів паралельної корекції, зокрема так звані модальні керовані структури (системи модального керування) [3]. Ці системи зазвичай реалізуються у вигляді одноконтурних схем автоматичного регулювання (САР), замкнених по вектору стану. Такий підхід забезпечує гнучкість у формуванні бажаних динамічних характеристик системи через цілеспрямоване розміщення її власних значень.

Варто акцентувати увагу на тому, що переважна більшість сучасних САР проєктується із залученням мікропроцесорної техніки. Її використання відкриває можливість реалізації складних алгоритмів керування, які були б практично недоступними за допомогою традиційної аналогової апаратури. Окрім цього, мікропроцесори сприяють підвищенню компактності конструкції, зниженню енергоспоживання та спрощенню обслуговування таких систем.

На тлі активного розвитку обчислювальних засобів і програмних платформ зростає зацікавленість у впровадженні в системи керування так званих спостерігачів стану (СС). Ці елементи відіграють ключову роль у випадках, коли деякі змінні стану системи неможливо виміряти безпосередньо через технічні або економічні обмеження. Спостерігачі дозволяють відновлювати ці значення на основі вимірюваних сигналів і моделі об'єкта, що, у свою чергу, дає змогу значно поліпшити точність регулювання, стійкість системи та її енергетичну ефективність [4].

У практиці керування електромеханічними об'єктами особливо актуальними є спостерігачі, призначені для оцінювання потокозчеплення, швидкості обертання ротора електродвигуна чи положення виконавчих

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

механізмів. Застосування таких оцінювачів робить можливим реалізацію високоякісних алгоритмів керування без використання додаткових дорогих сенсорів.

Проте впровадження спостерігачів супроводжується низкою інженерних труднощів. Зокрема, структура таких систем є доволі складною через наявність численних внутрішніх зворотних зв'язків, що істотно ускладнює їх математичне моделювання. Поведінка систем описується диференціальними або різницевиими рівняннями високого порядку, а динамічні властивості залежать від точного розміщення власних чисел системи. Саме тому надзвичайно важливим етапом синтезу СС є правильний вибір полюсів і нулів, що визначають часові характеристики перехідних процесів. У цій галузі досі існує чимало відкритих питань, зокрема щодо обґрунтування вибору тих чи інших стандартних поліномів (СП), а також розробки нових підходів до розміщення полюсів та нулів у канонічній формі [5].

Значний прогрес у галузі створення операційних систем реального часу та спеціалізованих програмних засобів для цифрового моделювання й аналізу дозволяє зробити крок уперед у напрямку автоматизованого проектування цифрових регуляторів і цифрових компонентів САК. Це створює умови для розробки більш ефективних цифро-аналогових систем автоматичного керування, зокрема таких, що базуються на прямому цифровому керуванні.

У зв'язку з вищезазначеним, розробка й впровадження електроприводних систем із вбудованими спостерігачами стану є надзвичайно актуальним завданням сучасної автоматизації. Досягнення значних результатів у цій галузі можливе за рахунок створення нових математичних моделей, розробки ефективних методів синтезу та, що особливо важливо, впровадження засобів автоматизації всього інженерного процесу [6].

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА

У контексті сучасного науково-технічного прогресу, що охоплює сферу автоматизованих систем керування, проблема ефективного синтезу регуляторів для лінійних систем автоматичного керування (САК) набуває особливої актуальності. Суть цього процесу полягає у побудові таких керуючих впливів, які забезпечують досягнення заданої мети управління з урахуванням численних обмежень та умов, що регламентуються технічним завданням і специфікацією об'єкта керування [5]. Інакше кажучи, синтез передбачає не лише пошук формального рішення, але й розробку регулятора, який забезпечує гарантоване виконання системою всіх експлуатаційних і динамічних вимог, включаючи надійність, стабільність, точність і швидкодію.

Зазвичай у процесі синтезу регуляторів ставиться дві взаємопов'язані, але сутнісно різні задачі. Перша з них спрямована на формування бажаних динамічних характеристик системи, таких як швидкодія, коливальність, час виходу на режим сталого функціонування, відсутність перерегулювання тощо. Ця задача є складною через наявність конфлікту між бажанням забезпечити швидке реагування системи і необхідністю уникнути надмірного зростання амплітуд перехідних процесів, що можуть спричинити вихід сигналів за допустимі межі. Високі вимоги до динаміки, як правило, призводять до необхідності застосування елементної бази з покращеними параметрами, що, у свою чергу, збільшує загальну вартість системи та складність її реалізації [6].

Друга задача полягає у забезпеченні необхідної точності функціонування САК, тобто у здатності системи підтримувати задані значення керованих параметрів при мінімальній похибці, незважаючи на наявність зовнішніх та внутрішніх збурень. У порівнянні з першою, ця задача вирішується простіше завдяки наявності відпрацьованих методик корекції структури системи. Досягнення високої точності може бути реалізовано через зміну передатного коефіцієнта в розімкненій системі, підвищення порядку астатизму (тобто здатності компенсувати постійні або змінні збурення), а також шляхом введення

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додаткових компенсуючих зв'язків у алгоритм керування — як по каналу збурень, так і по каналу завдання.

Залежно від технологічної реалізації, регулятори автоматичних систем поділяють на аналогові та цифрові. Аналогові регулятори, традиційно побудовані на базі операційних підсилювачів, широко використовувалися в минулі десятиліття та характеризуються безперервною природою обробки сигналів. Проте із розвитком цифрових технологій, зокрема мікропроцесорної техніки, все більше систем керування реалізуються у вигляді цифрових регуляторів, що забезпечують гнучкість, адаптивність, можливість дистанційного налаштування та застосування складних математичних алгоритмів обробки інформації.

Цифрові регулятори, як правило, синтезуються з використанням методологій модального керування, які передбачають розміщення власних чисел (полосів) замкненої системи у заздалегідь визначених точках комплексної площини для досягнення бажаних характеристик стабільності та динамічної поведінки [9]. Такий підхід дозволяє ефективно впливати на поведінку системи у перехідному режимі, забезпечуючи високий рівень контролю над її реакцією на зовнішні та внутрішні збурення.

Загалом, процес синтезу регуляторів є комплексною інженерною задачею, яка вимагає міждисциплінарного підходу, що поєднує в собі знання з теорії автоматичного керування, електроніки, цифрової обробки сигналів і програмної інженерії. Впровадження ефективних цифрових алгоритмів, розвиток спеціалізованого програмного забезпечення та використання високопродуктивної обчислювальної техніки створюють передумови для реалізації точних, стійких і надійних систем автоматичного керування, що відповідають вимогам сучасної промисловості, енергетики та транспортної інфраструктури.

У сучасному контексті розвитку автоматизованих систем управління значна кількість технічних рішень реалізується із застосуванням цифрових процесорів та дискретних елементів. Такий підхід повністю відповідає загальній тенденції цифровізації інженерних систем, яка охоплює всі галузі техніки — від побутової електроніки до складних промислових установок.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цифрові системи керування, на відміну від своїх аналогових попередників, мають низку беззаперечних переваг, що зумовлюють їх широке впровадження на практиці. До основних переваг належать підвищена точність і чутливість у роботі, вища надійність функціонування за рахунок зменшення кількості аналогових компонентів, а отже, і зменшення впливу факторів старіння, температурного дрейфу та нестабільності елементів. Також цифрові системи демонструють вищу стійкість до електромагнітних завад, зовнішніх перешкод та інших видів збурень, що особливо важливо в умовах промислового середовища чи військових застосувань. Серед інших важливих технічних характеристик слід відзначити зменшені масогабаритні показники та зниження вартості виробництва, що робить цифрові системи економічно привабливими для масового впровадження [10].

Однією з найважливіших особливостей, яка виділяє цифрові контролери серед інших типів регуляторів, є їх висока гнучкість та адаптивність. Програмне забезпечення цифрового регулятора може бути змінено або переналаштоване відповідно до змін у характеристиках об'єкта керування чи вимог замовника — без необхідності внесення змін у апаратну частину системи. Це дозволяє з легкістю реалізовувати нові функції, модернізувати алгоритми керування або адаптувати систему до нових умов експлуатації шляхом простого оновлення прошивки або переналаштування програмного коду.

На відміну від аналогових систем, де будь-яка зміна функціональних властивостей регулятора потребує фізичної модифікації електричної схеми (наприклад, заміни резисторів, конденсаторів або підсилювачів), цифрові регулятори дозволяють реалізовувати подібні зміни на програмному рівні. Це не тільки скорочує час та вартість розробки, але й значно підвищує масштабованість і повторне використання вже створених програмних модулів у нових проектах [8].

Таким чином, використання цифрових елементів і мікропроцесорної техніки у сучасних системах автоматичного керування забезпечує значне підвищення їх функціональності, ефективності та експлуатаційної надійності. Гнучкість програмного забезпечення цифрових контролерів відкриває широкі можливості для реалізації адаптивних, самонавчальних та інтелектуальних

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритмів керування, що відповідає вимогам сучасної кіберфізичної інженерії та індустрії.

Мікроконтролер — це компактний програмований електронний пристрій, що інтегрує в одній мікросхемі основні функціональні блоки, необхідні для автономного виконання керувальних і обчислювальних завдань у вбудованих системах. До його складу, як правило, входить центральний процесор (мікропроцесорне ядро), енергонезалежна та оперативна пам'ять (ROM, RAM), а також система введення/виведення інформації через універсальні порти. Крім того, сучасні мікроконтролери часто оснащуються низкою периферійних модулів спеціального призначення — таймерами, лічильниками, компараторами, аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП), цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП), інтерфейсами обміну даними (UART, SPI, I<sup>2</sup>C) тощо [11].

Завдяки високій функціональній інтеграції, мікроконтролери стали ключовим компонентом у багатьох системах автоматизації, які потребують надійного, компактного та енергоефективного керування. Їх можна знайти у широкому спектрі сучасної електроніки та побутової техніки: від мобільних телефонів, пральних машин і мікрохвильових печей до складних промислових контролерів і пристроїв інтернету речей (IoT). Особливе місце мікроконтролери займають у сфері автомобілебудування — вони забезпечують інтелектуальне керування електродвигунами, системами активної безпеки (антиблокувальна система гальм ABS, система стабілізації ESP), автоматичним регулюванням освітлення, клімат-контролем, системами паркування та іншими функціями, що значною мірою підвищують комфорт і безпеку водіння [9].

Крім того, мікроконтролери є основою для створення систем збору, обробки та передачі даних у реальному часі, що дозволяє реалізовувати автоматизовані комплекси контролю технологічних процесів, моніторингу стану середовища або об'єкта керування. Їх універсальність, малі розміри, відносно низька вартість і програмна гнучкість дозволяють легко адаптувати мікроконтролерну платформу до специфіки будь-якого прикладного завдання — від найпростіших схем до

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк. 14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складних цифрових регуляторів з можливістю самонавчання й мережевого обміну даними.

Таким чином, мікроконтролери відіграють ключову роль у сучасних цифрових системах, забезпечуючи їх автономність, інтелектуальність і адаптивність. Їх широке застосування обумовлене не лише технічними перевагами, а й високим потенціалом у контексті побудови новітніх розумних систем керування, що відповідають концепціям Індустрії 4.0 та кіберфізичних систем [11].

Поняття «цифровий сигнальний контролер» (ЦСК) уперше було офіційно запроваджене у 2002 році компанією *Microchip Technology*, яка однією з перших розробила спеціалізовану мікроелектронну платформу, здатну поєднувати властивості як традиційного мікроконтролера, так і цифрового сигнального процесора (DSP). З часом це визначення набуло широкого визнання у світовій інженерній спільноті, і сьогодні більшість провідних виробників мікроелектроніки використовують термін ЦСК для класифікації пристроїв відповідного функціонального класу.

Структурно цифрові сигнальні контролери мають багато спільного з класичними мікроконтролерами, однак вони доповнені можливостями, що орієнтовані на ефективну цифрову обробку сигналів у реальному часі. В обох типах пристроїв є процесорне ядро, пам'ять, периферійні інтерфейси та модулі вводу/виводу. Проте ЦСК, як правило, мають розширену архітектуру, яка включає високошвидкісну систему переривань, що дозволяє оперативно реагувати на події з точністю до тактового циклу. Окрім цього, ці пристрої оснащуються акумуляторами з підвищеною розрядністю, що забезпечує більшу точність під час виконання обчислювальних операцій.

Однією з ключових функціональних переваг цифрових сигнальних контролерів є здатність реалізовувати цифрові фільтри на кожному каналі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Це дозволяє ефективно обробляти вхідні сигнали безпосередньо на рівні апаратури, що значно знижує навантаження на процесор і підвищує загальну продуктивність системи. Особливо варто

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відзначити підтримку операцій із числами з плаваючою точкою у деяких моделях ЦСК — ця функціональність суттєво спрощує реалізацію складних алгоритмів цифрової обробки сигналів, таких як швидке перетворення Фур'є (FFT), адаптивне фільтрування, фазове керування, спектральний аналіз тощо [14].

У підсумку, цифрові сигнальні контролери виступають ефективним апаратно-програмним рішенням для задач, що вимагають високої точності, швидкодії та реального часу обробки. Їхня гібридна архітектура дозволяє гармонійно поєднувати функції класичного мікроконтролера з потужністю та гнучкістю цифрового сигнального процесора, що відкриває нові можливості для розробки високотехнологічних пристроїв у сфері телекомунікацій, електроприводів, медичної електроніки та систем керування.

Розвиток концепції спостерігачів стану є безпосередньо пов'язаним із становленням і удосконаленням методології моделювання динамічних систем у вигляді векторів стану, що стало одним із найважливіших теоретичних фундаментів сучасної науки про автоматичне керування. Цей підхід дозволяє комплексно та формалізовано описувати внутрішній стан складних технічних і фізичних процесів, відкриваючи нові можливості для аналізу, проектування та оптимізації керованих систем. Цей математичний підхід спочатку отримав застосування у вузьких наукових сферах: зокрема, у дослідженнях стійкості динамічних систем [12, 13], при розв'язанні задач лінійної алгебри, а також у вивченні систем звичайних диференціальних рівнянь [14]. Поза межами технічних наук методи простору станів знаходили своє місце й у таких фундаментальних дисциплінах, як квантова механіка, де вони використовувалися для опису еволюції квантових систем, та інших високоточних науках, які потребували суворої аналітичної бази.

Потужний імпульс до інтеграції цих методів у структуру теорії керування був наданий у другій половині ХХ століття завдяки фундаментальним працям провідних учених того часу. Зокрема, значний внесок у формування сучасної концепції оптимального керування зробив Л.С. Понтрягін, чия теорія оптимального керування лягла в основу численних прикладних розробок [17]. Р.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Беллман, у свою чергу, заклав математичний фундамент динамічного програмування [15, 16], що дозволило формалізувати процес оптимізації в динамічних умовах. Не менш визначальною стала праця Р. Калмана, який сформулював узагальнену теорію фільтрації та керування, зокрема — концепцію оптимальної оцінки стану динамічних систем, що згодом призвело до створення Калманівського фільтра та заклало теоретичну основу для спостерігачів стану [18–20].

Завдяки зазначеним науковим проривам, виникла можливість розглядати систему автоматичного керування не лише через зовнішні сигнали «вхід–вихід», як це робилося раніше, а через повний опис її внутрішньої динаміки у вигляді векторів стану. У багатьох теоретичних розробках приймається припущення, що всі компоненти вектора стану системи можуть бути безпосередньо вимірні. Таке припущення, хоч і полегшує побудову моделей, у реальних умовах часто є недосяжним через обмеження фізичного доступу, технічну складність або вартість вимірювального обладнання.

Саме в цьому контексті і виникла потреба в спостерігачах стану — спеціальних алгоритмах або пристроях, які дозволяють на основі доступних вимірюваних величин (наприклад, вихідного сигналу і керуючого впливу) оцінити внутрішні стани системи з достатньою точністю. Таким чином, спостерігачі виконують роль «віртуальних сенсорів», забезпечуючи інформаційну повноту, необхідну для реалізації високоякісного керування в умовах неповного спостереження [14].

У підсумку, поява спостерігачів стану стала не просто інженерною інновацією, а наслідком глибоких зрушень у математичному і філософському осмисленні керованих систем. Вона відкрила нові горизонти для точного моделювання, прогнозування та оптимізації технічних процесів у складних динамічних об'єктах.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du,$$

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u(t) = \psi(x(t))$$

У даному контексті розглядається структурна схема безперервної системи керування, побудованої за методом модального регулювання, яка характеризується наявністю єдиного вхідного сигналу. Ця система функціонує за принципом зворотного зв'язку, замкненого по власних змінних стану, що означає використання внутрішніх параметрів системи для формування керуючого впливу. При цьому в основу побудови моделі покладено припущення, що всі компоненти вектора стану повністю вимірювані безпосередньо, що дає можливість реалізувати замкнутий контур із максимальною точністю. Такий підхід є класичним для систем модального керування, оскільки він забезпечує ефективну стабілізацію і необхідні динамічні характеристики, виходячи з повної інформації про внутрішній стан об'єкта управління [15].

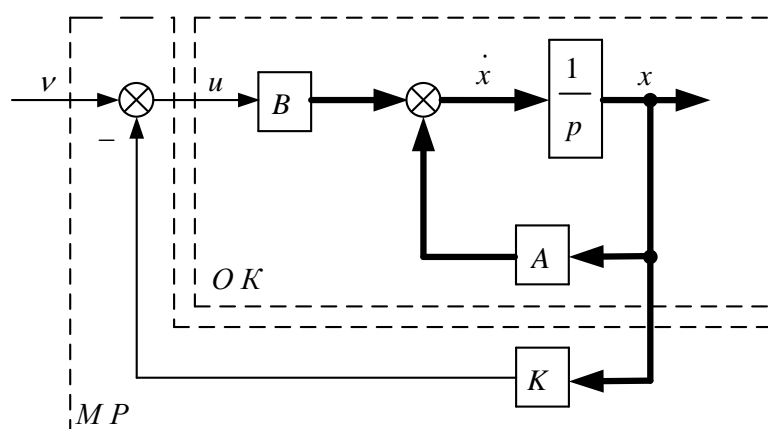


Рисунок 1.1 – Структурна схема

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$\dot{x} = A_{oz}x + Bv,$$

$$A_{oz} = A - BK$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{eig}(A - BK) = P_{\sigma} = [p_{\sigma 1} \quad p_{\sigma 2} \quad \dots \quad p_{\sigma n}]$$

$$\det(pI - A + BK) = G_{\sigma}(p),$$

$$G_{\sigma}(p) = p^n + \gamma_{n-1}p^{n-1} + \dots + \gamma_1p + \gamma_0 = \prod_{i=1}^n (p - p_{\sigma i})$$

У випадках, коли повне спостереження всіх змінних стану динамічного об'єкта є неможливим через технічні або фізичні обмеження, виникає потреба у використанні спеціального програмно-апаратного механізму — спостерігача стану, який дозволяє оцінити значення невимірюваних координат. Такі ситуації належать до класу задач автоматичного керування, що характеризуються неповнотою інформації про поточний стан об'єкта. До цього типу задач також входять сценарії компенсації впливу зовнішніх або внутрішніх збурень, коли вимірювані дані є недостатніми для прямого формування адекватної керуючої дії.

Функціонування спостерігача ґрунтується на обробці вхідного сигналу системи разом із вимірюваними вихідними параметрами, які надходять від об'єкта керування. На основі цих сигналів, за допомогою математичної моделі об'єкта, спостерігач формує оцінку вектора стану. Проте у практичній реалізації виникає низка ускладнень. Наприклад, реальний об'єкт може мати нестабільні параметри (нестационарність), модель може не ідеально відображати його структуру, можливі невимірювані збурення, а також розбіжності між початковими умовами об'єкта і його моделі. Усе це може викликати відхилення між оціненими та дійсними значеннями станів, що знижує точність регулювання [14].

З метою усунення або мінімізації зазначених відхилень у структуру спостерігача включають спеціальний блок адаптації або вузол самонастроювання. Цей елемент виконує функцію корекції процесу оцінювання, використовуючи зворотні зв'язки за помилкою між вимірюваним вихідним сигналом об'єкта і

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідним виходом моделі. Коригувальні сигнали формуються за допомогою інтегруючих ланок, на входи яких подаються ці похибки, зважені за певними коефіцієнтами (що позначаються, як правило,  $L$ ), які визначають інтенсивність і характер впливу корекції. Такий підхід дозволяє підтримувати близькість оціненого стану до реального навіть за умов дії непередбачуваних збурень або зміни характеристик об'єкта у часі.

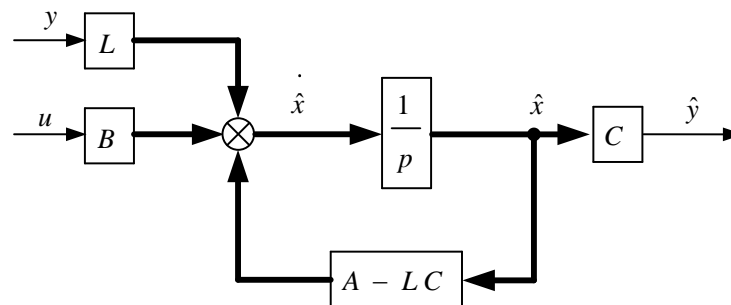


Рисунок 1.2 –Схема структурна (перетворена)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \\ \hat{y} &= C\hat{x},\end{aligned}$$

Базова методологія синтезу систем зі спостерігачами стану сформувалася переважно в процесі досліджень і практичного впровадження спостерігачів у контексті систем модального керування. Саме в рамках модального підходу були закладені теоретичні засади та структурні принципи побудови спостережуваних систем, що дозволяють ефективно відновлювати повний вектор стану динамічного об'єкта за обмеженим набором вимірюваних виходів [17].

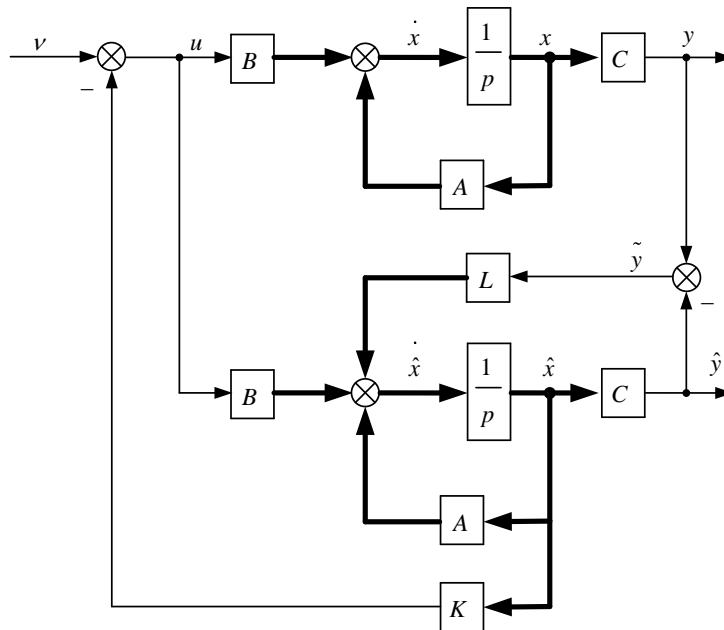


Рисунок 1.3 – Схема структурна

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A-BK) & BK \\ 0 & (A-LC) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v,$$

$$\tilde{x} = x - \hat{x}$$

$$\begin{bmatrix} (A-BK) & BK \\ 0 & (A-LC) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{o3} & -BK \\ 0 & A_{c3} \end{bmatrix} = A_3.$$

$$\dot{\tilde{x}} = (A-LC)\tilde{x} = A_{c3}\tilde{x},$$

$$G_3(p) = \det(pI - A_3),$$

$$G_{o3}(p) = \det(pI - A_{o3}) = \det(pI - A + BK)$$

$$G_{c3}(p) = \det(pI - A_{c3}) = \det(pI - A + LC),$$

$$G_3(p) = G_{o3}(p) \cdot G_{c3}(p).$$

$$P_3 = [P_{o3} \quad P_{c3}],$$

$$\text{eig}(A - LC) = P_{c\bar{o}} = [p_{c\bar{o}1} \quad p_{c\bar{o}2} \quad \dots \quad p_{c\bar{o}n}],$$

$$\det(pI - A + LC) = G_{c\bar{o}}(p),$$

$$G_{c\bar{o}}(p) = p^n + \delta_{n-1}p^{n-1} + \dots + \delta_1p + \delta_0 = \prod_{i=1}^n (p - p_{c\bar{o}i})$$

Методологія модального керування ґрунтується на принципі цілеспрямованого розміщення власних значень (так званих полюсів) замкненої системи керування, що включає в себе лінійний керований об'єкт і відповідно сконструйований регулятор. Основна ідея цього підходу полягає у тому, щоб через відповідний вибір структури зворотного зв'язку змінити спектр динамічної системи таким чином, щоб він відповідав заданим вимогам до її часових характеристик. До таких характеристик належать, зокрема, швидкодія, час встановлення, форма перехідного процесу, відсутність або мінімізація коливань, а також рівень затухання [17].

В рамках цього підходу полюси системи розміщуються у заздалегідь визначених позиціях на комплексній площині (s-площині або z-площині залежно від типу системи), що дає змогу досягти чітко прогнозованої поведінки системи у динаміці. Такий підхід дозволяє інженеру безпосередньо формувати динамічну модель системи, орієнтуючись не лише на стабільність, а й на якісні показники її функціонування у відповідності до заданих технічних або експлуатаційних критеріїв [18].

$$x(t) = c_1 e^{-p_1 t} + c_2 e^{-p_2 t} + \dots + c_n e^{-p_n t}$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновок

З огляду на постійне підвищення вимог до якості регулювання та динамічних властивостей систем електропривода, все більшої актуальності набуває необхідність врахування пружних характеристик елементів кінематичних ланцюгів, які безпосередньо впливають на точність та стабільність роботи приводу. Ігнорування пружності може призводити до небажаних коливань, затримок та втрат ефективності в регулюванні. У зв'язку з цим, розв'язання задач керування такими системами вимагає застосування інструментів модального керування в поєднанні зі спостерігачами стану, що дозволяють підвищити якість і стійкість системи при обмеженій кількості доступних вимірювань.

Аналіз сучасного стану розвитку електромеханічних систем зі спостерігачами стану, а також огляд специфічної елементної бази, орієнтованої на реалізацію цифрових систем керування для електроприводів, у поєднанні з вивченням принципів модального керування, дає змогу обґрунтувати потребу у створенні методики автоматизованого синтезу аналогових та дискретних систем цифрового регулювання з використанням спостерігачів стану, що особливо актуально для електроприводів постійного струму [19].

В межах даного дослідження сформульовано науково-технічні задачі, розв'язання яких дозволить значно розширити можливості цифрових систем керування високоточною електромеханікою.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОХМАСОВОЇ ЕМС

Механічна складова електроприводної системи (ЕП) у загальному випадку може бути змодельована як сукупність жорстких тіл, динаміка яких визначається наявними механічними обмеженнями, що задають характер допустимих переміщень та взаємодій між окремими частинами конструкції. Таке представлення дозволяє формалізувати фізичну поведінку системи у вигляді математичної моделі, яка враховує інерційні характеристики тіл, сили реакції зв'язків, а також зовнішні і внутрішні збурення.

Для опису руху подібної багаточастинної механічної системи, що є складовою електромеханічного привода, застосовуються диференційні рівняння, які формулюються на основі принципів динаміки – зокрема, другого закону Ньютона або узагальнених методів, таких як метод Лагранжа. Найзагальніша математична форма цих рівнянь враховує вектор координат стану, що визначає положення тіл у просторі, а також похідні цих координат, які характеризують швидкість та прискорення елементів системи [17].

У структурі механічної частини електроприводу кожен масивний елемент системи, як правило, розглядається як тіло, що здійснює обертальний рух навколо фіксованої осі. Такий підхід передбачає наявність лише однієї ступені вільності для кожної маси, що істотно спрощує математичний опис системи, оскільки кількість рівнянь руху буде відповідати кількості окремих інерційних елементів, присутніх у розрахунковій моделі.

У випадку обертального руху в якості узагальненої координати природним чином обирається кут повороту відповідного вала або іншого елемента конструкції. Такий вибір координат дозволяє коректно враховувати моментні взаємодії між масами, пружні деформації з'єднувальних елементів (наприклад, валів чи муфт), а також зовнішні впливи у вигляді навантажувальних моментів. При побудові моделі подібної системи зазвичай формулюється система диференційних рівнянь другого порядку, яка відображає зміну кутових положень,

					ЕМКС 043004 000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкостей і прискорень кожного масового елемента з урахуванням відповідних моментів інерції, коефіцієнтів жорсткості та демпфування [19].

Таким чином, у механічному моделюванні електроприводних систем важливо не лише коректно визначити структуру зв'язків між масами, але й обрати відповідну систему координат, яка забезпечить точну та ефективну аналітичну репрезентацію реальної динаміки системи.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система (ЕМС), функціональне призначення якої полягає в точному керуванні кутовим положенням модуля озброєння, встановленого на броньованому транспортному засобі. Під поняттям «броньована машина» маються на увазі як важкі бойові одиниці, зокрема танки, так і легкоброньовані платформи різного призначення, що включають бойові машини піхоти, бронетранспортери та інші мобільні засоби з бронезахистом.

Урахування типу та конструктивних особливостей броньованої техніки, на якій інтегрується дана система, є критично важливим при моделюванні. Адже масово-інерційні параметри механічної частини ЕМС безпосередньо залежать від конфігурації та маси модуля озброєння, типу приводних механізмів, жорсткості з'єднувальних елементів, а також конструктивного розміщення всіх рухомих частин системи. Внаслідок цього можливі суттєві варіації у значеннях моментів інерції, що, у свою чергу, впливають на динамічну поведінку системи в цілому та на вимоги до алгоритмів керування.

Отже, моделювання і синтез системи автоматичного керування електроприводом у таких умовах повинні враховувати змінність фізико-механічних характеристик, пов'язаних із різними типами носіїв і модулями, що до них інтегруються. Це висуває додаткові вимоги до універсальності, адаптивності та точності системи керування, що розробляється [17].

$$z(x) = xtg u - \frac{gx^2}{2V^2 \cdot \cos^2 u} ,$$

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк. 25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D = \frac{2V^2}{g} \cdot \operatorname{tgu} \cdot \cos^2 u = \frac{V^2}{g} \cdot \sin 2u$$

$$u^* = \frac{1}{2} \arcsin \frac{D_0 g}{V^2}$$

Основним критерієм ефективності регулятора в такій системі є його здатність забезпечити максимально точне та стабільне відпрацювання заданих значень кутового положення, особливо в умовах дії змінних динамічних навантажень та можливих зовнішніх збурень.

Точність позиціонування вектора кутового положення є критично важливою, оскільки навіть незначні відхилення можуть суттєво вплинути на ефективність ведення вогню або наведення прицільного обладнання. Це особливо актуально в бойових умовах, де точність — запорука виживання та успішного виконання бойового завдання [17].

Для аналізу та моделювання поведінки системи керування використовується кінематична схема, що відображає двомасову модель пружної електромеханічної системи, у якій враховуються пружні зв'язки між елементами. Така модель є адекватною для опису взаємодії двигуна й навантаження, між якими присутній пружний з'єднувальний елемент. Зокрема, дана схема описує обертальний рух в вертикальній площині, що є типовим для систем стабілізації та наведення озброєння у бронетехніці.

Цей підхід дозволяє з достатньою точністю врахувати не тільки інерційні характеристики окремих мас системи, а й вплив еластичних деформацій з'єднувальних ланок, що відіграють помітну роль при високих динамічних навантаженнях. Таким чином, побудова регулятора, орієнтованого на таку модель, дає можливість розробити ефективну систему автоматичного керування, здатну оперативно реагувати на зовнішні впливи та внутрішні зміни параметрів об'єкта керування.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

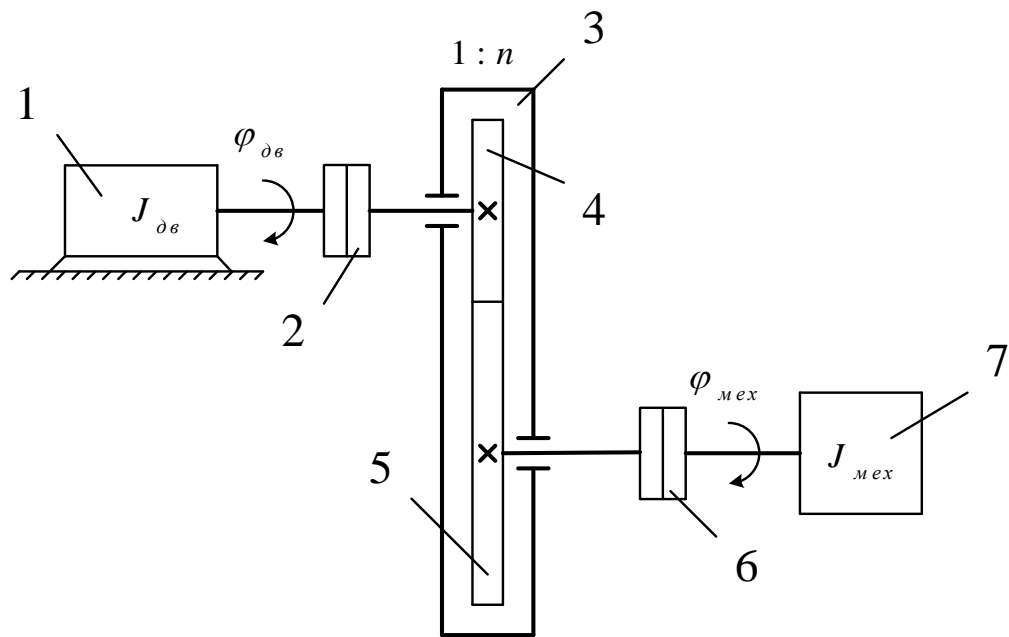


Рисунок 2.1 –Схема кінематична

$$W_K = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$$

$$W_{II} = \frac{c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2},$$

$$W_D = 0$$

$$\frac{\partial W_{II}}{\partial \varphi_1} = -c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\frac{\partial W_K}{\partial \omega_1} = J_1 \omega_1$$

$$Q'_1 = M - M_{c1}$$

$$\frac{d}{dt}(J_1\omega_1) + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M - M_{c1},$$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1}$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial \varphi_2} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$\frac{\partial W_K}{\partial \omega_2} = J_2\omega_2,$$

$$Q'_2 = -M_{c2},$$

$$\frac{d}{dt}(J_2\omega_2) - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = -M_{c2},$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c2},$$

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = c_{12}(\omega_1 - \omega_2),$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{c1}, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2}, \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2). \end{cases}$$

На наступному етапі розробки здійснюється побудова структурних схем окремих функціональних ланок, а також загальної структурної моделі всієї системи керування в цілому. Такий підхід дозволяє в деталях уявити логіку взаємодії між основними елементами системи, визначити інформаційні та енергетичні потоки, а також сформуванати основу для подальшого математичного моделювання. Структурна схема відіграє ключову роль у відображенні динаміки роботи кожної підсистеми, що забезпечує точне відтворення поведінки системи в часовій області й дозволяє проводити подальший аналіз, оптимізацію та цифрову реалізацію алгоритмів керування [17].

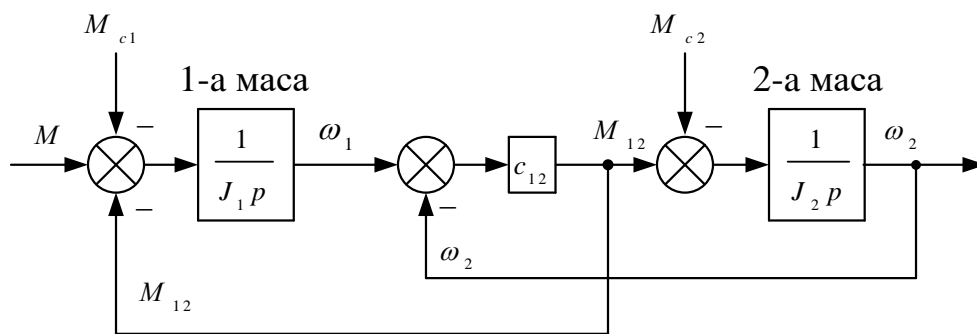


Рисунок 2.2 –Схема структурна

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - n^{-1}M_{12} - M_{c1}, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2}, \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1, \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2, \end{cases}$$

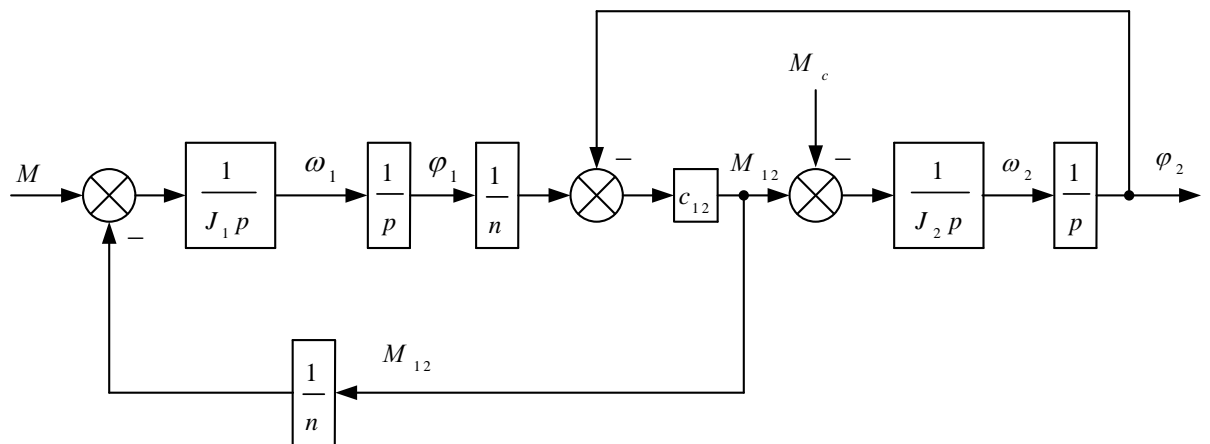


Рисунок 2.3 – Структура двохмасової ЕМС

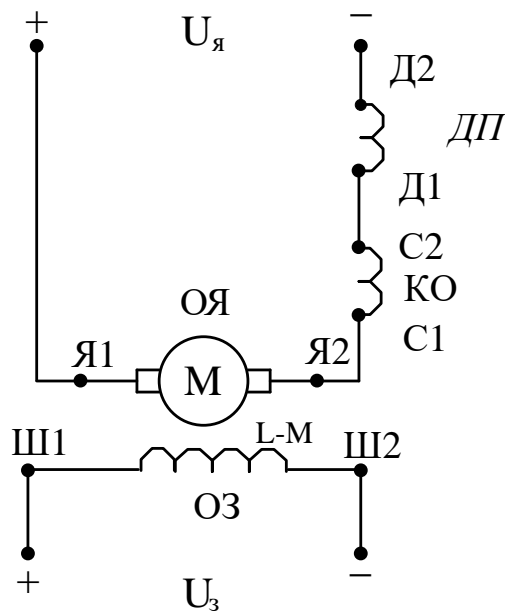


Рисунок 2.4 – Схема ДПС

У випадку, коли якір електродвигуна підключається до джерела постійної напруги, магнітний потік, створений збудженням, залишається сталим у часі. Така стабільність зумовлює те, що основні електромагнітні параметри двигуна не зазнають суттєвих змін у процесі його роботи. У більшості технічних застосувань для забезпечення лінійності моделі системи встановлюється фіксоване значення магнітного потоку, зазвичай на рівні його номінального значення. Це дозволяє лінеаризувати рівняння електромеханічного перетворення і значно спрощує математичний опис динаміки приводу. У свою чергу, це спрощення є критично важливим для подальшого аналізу та синтезу систем автоматичного керування, оскільки дає змогу застосовувати стандартні лінійні методи, зокрема методи модального керування та розробку лінеаризованих регуляторів [17].

$$u_{\text{я}} = i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + E + L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt},$$

$$\frac{u_{\text{я}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = i_{\text{я}} + \frac{E}{R_{\text{я}}} + \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}$$

$$\frac{u_{\text{я}} - E}{R_{\text{я}\Sigma}} = i_{\text{я}} \left( 1 + T_{\text{я}} \frac{d}{dt} \right),$$

$$W_{\text{я}}(p) = \frac{i_{\text{я}}(p)}{u_{\text{я}}(p) - E(p)} = \frac{1/R_{\text{я}\Sigma}}{1 + T_{\text{я}}p}$$

$$M = c\Phi_{\text{н}}i_{\text{я}},$$

$$E = c\Phi_{\text{н}}\omega$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\Pi H}(p) = \frac{k_{\Pi H}}{T_{\mu} p + 1},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\dot{y}} \frac{di_{\dot{y}}}{dt} + R_{\dot{y}\Sigma} i_{\dot{y}} = k_{\Pi H} u_{\dot{y}} - c\Phi_{\dot{y}} \omega_{\dot{y}}, \\ J_{\dot{y}} \frac{d\omega_{\dot{y}}}{dt} = M_{\dot{y}} - n^{-1} c_{12} (n^{-1} \varphi_{\dot{y}} - \varphi_{\text{мех}}), \\ J_{\text{мех}} \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt} = c_{12} (n^{-1} \varphi_{\dot{y}} - \varphi_{\text{мех}}) - M_c, \\ \frac{d\varphi_{\dot{y}}}{dt} = \omega_{\dot{y}}, \\ \frac{d\varphi_{\text{мех}}}{dt} = \omega_{\text{мех}}, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + a_{13}x_3(t) + a_{14}x_4(t) + a_{15}x_5(t) + b_1u_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + a_{23}x_3(t) + a_{24}x_4(t) + a_{25}x_5(t) + b_2u_1(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_5(t) = a_{51}x_1(t) + a_{52}x_2(t) + a_{53}x_3(t) + a_{54}x_4(t) + a_{55}x_5(t) + b_5u_1(t) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = -\frac{R_{\dot{y}\Sigma}}{L_{\dot{y}}} x_1 - \frac{c\Phi_{\dot{y}}}{L_{\dot{y}}} x_3 + \frac{k_{\dot{y}}}{L_{\dot{y}}} u_{\dot{y}} \\ \dot{x}_3 = \frac{c\Phi_{\dot{y}}}{J_{\dot{y}}} x_1 - \frac{c_{12}}{J_{\dot{y}} n^2} x_2 + \frac{c_{12}}{J_{\dot{y}}} x_4 \\ \dot{x}_5 = \frac{c_{12}}{J_{\text{мех}} n} x_2 - \frac{c_{12}}{J_{\text{мех}}} x_4 - \frac{1}{J} M_c \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_4 = x_5 \end{array} \right.$$

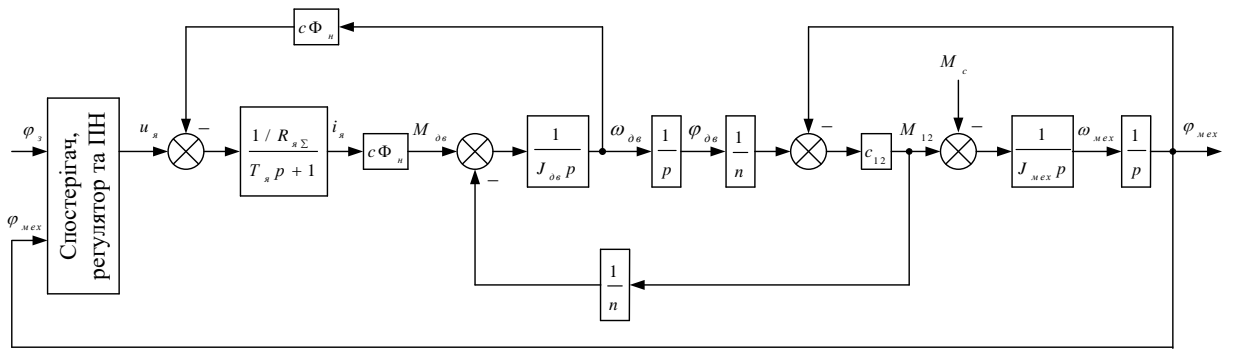


Рисунок 2.5 – Структура ЕМС

### Висновок

Незважаючи на велике конструктивне й функціональне різноманіття транспортних систем, автоматизованих виробничих комплексів, космічної техніки та військових платформ, у більшості таких об'єктів управління можна виявити наявність певних типових підсистем, які виконують однакові функціональні завдання. Однією з найбільш поширених і конструктивно повторюваних структурних одиниць у таких системах є двомасова пружно-інерційна механічна ланка. Зазвичай така підсистема реалізується у вигляді електромеханічного вузла, що складається з електродвигуна, який приводить у дію виконавчий механізм через деформаційно-гнучку (пружну) трансмісію. У цьому випадку електродвигун виступає як перша маса системи, а керований об'єкт (наприклад, зброя, антена, маніпулятор тощо) виконує роль другої маси.

Динамічна взаємодія між цими масами опосередковується через пружну ланку, що є джерелом специфічних коливальних ефектів та складної реакції системи на зовнішні та внутрішні збурення. Внаслідок цього, навіть при незначних змінах інерційних параметрів або прикладених навантажень, характер перехідних процесів у системі істотно змінюється. Особливо це проявляється в електромеханічних системах наведення та стабілізації озброєння бойових броньованих машин (ББМ), де електроприводи забезпечують точне позиціонування елементів озброєння у вертикальній площині.

У таких умовах, коли система має змінні або апріорно невизначені параметри, зокрема момент інерції рухомої частини або варіативні механічні

навантаження в процесі роботи, рівень вимог до керуючого пристрою значно зростає. Регулятор, що забезпечує управління подібною двомасовою системою, повинен не лише забезпечувати стабільність та точність позиціонування, але й гарантувати належну швидкодію, адаптивність до змінних динамічних характеристик, а також компенсувати ефекти гнучкості трансмісійного елемента. У зв'язку з цим актуальними стають модальні методи керування, інтегровані зі спостерігачами стану, що дозволяє підвищити якість керування навіть за умов обмеженої або неточної інформації про стан об'єкта.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



$$W_u(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{m_0}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

$$(a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \cdot Y(p) = b_0 \cdot U(p)$$

$$Y(p) \cdot p^5 = -b_0 \cdot U(p) - a_0 \cdot Y(p) + p(-a_1 \cdot Y(p)) +$$

$$+ p^2 \cdot (-a_2 \cdot Y(p)) + p^3(-a_3 \cdot Y(p)) + p^4(-a_4 \cdot Y(p))$$

$$Y(p) = \frac{1}{p^5} \cdot [-b_0 \cdot U(p) - a_0 \cdot Y(p)] + \frac{1}{p^4} \cdot [-a_1 \cdot Y(p)] +$$

$$+ \frac{1}{p^3} \cdot [-a_2 \cdot Y(p)] + \frac{1}{p^2} \cdot [-a_3 \cdot Y(p)] + \frac{1}{p} \cdot [-a_4 \cdot Y(p)]$$

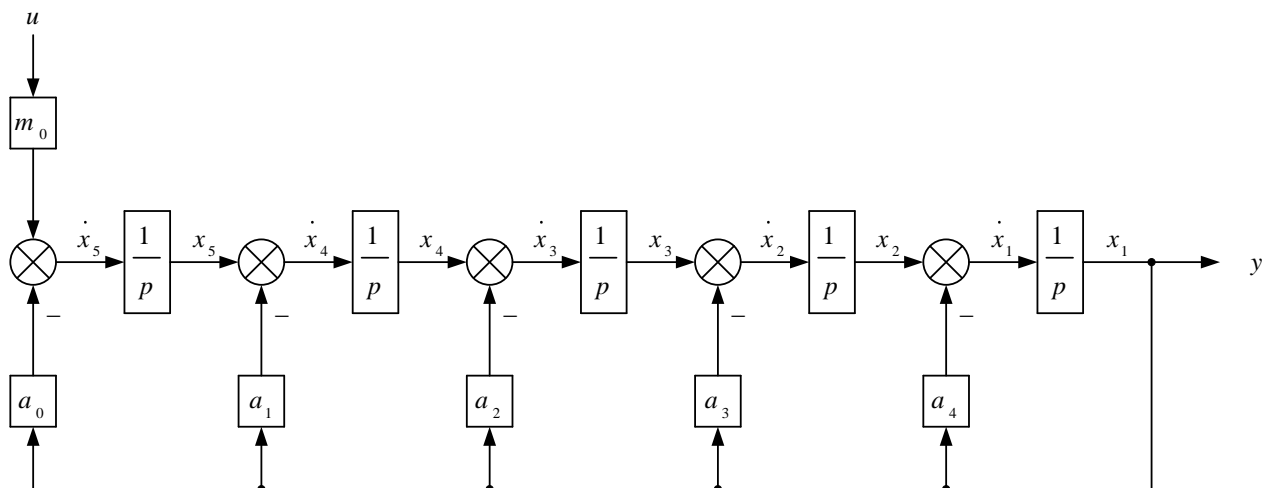


Рисунок 3.2 – Структура моделі

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_4 x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_3 x_1 + x_3, \\ \dot{x}_3 = -a_2 x_1 + x_4, \\ \dot{x}_4 = -a_1 x_1 + x_5, \\ \dot{x}_5 = -a_0 x_1 + m_0 u. \end{cases}$$

$$\dot{x} = Ax + B_1u$$

$$y = Cx + D_1u,$$

$$A = \frac{1}{a_5} \begin{bmatrix} -a_4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -a_3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \frac{1}{a_5} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_5 m_0 \end{bmatrix}, D_1 = 0$$

$$W_f(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = -\frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

$$\begin{aligned} (a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \cdot Y(p) = \\ = -(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \cdot F(p), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y(p) = \frac{1}{p^5} \cdot [-b_0 \cdot F(p) - a_0 \cdot Y(p)] + \frac{1}{p^4} \cdot [-b_1 \cdot F(p) - a_1 \cdot Y(p)] + \\ + \frac{1}{p^3} \cdot [-b_2 \cdot F(p) - a_2 \cdot Y(p)] + \frac{1}{p^2} \cdot [-b_3 \cdot F(p) - a_3 \cdot Y(p)] + \\ + \frac{1}{p} \cdot [-a_4 \cdot Y(p)] \end{aligned}$$

На основі отриманого диференційного рівняння, яке описує динамічні властивості системи, здійснюється побудова відповідної структурної схеми аналогової моделі. Ця схема слугує графічним відображенням математичної моделі процесу та дає змогу здійснити імітаційне моделювання поведінки системи в аналоговому вигляді. При цьому основні елементи рівняння — такі як інтегратори, підсилювачі, суматори та зворотні зв'язки — реалізуються у вигляді функціональних блоків, що відтворюють фізичні процеси в часовій області. Структурна схема дозволяє оцінити динамічну реакцію системи, провести подальший синтез регулятора та дослідити вплив окремих параметрів на стійкість

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та якість регулювання [14].

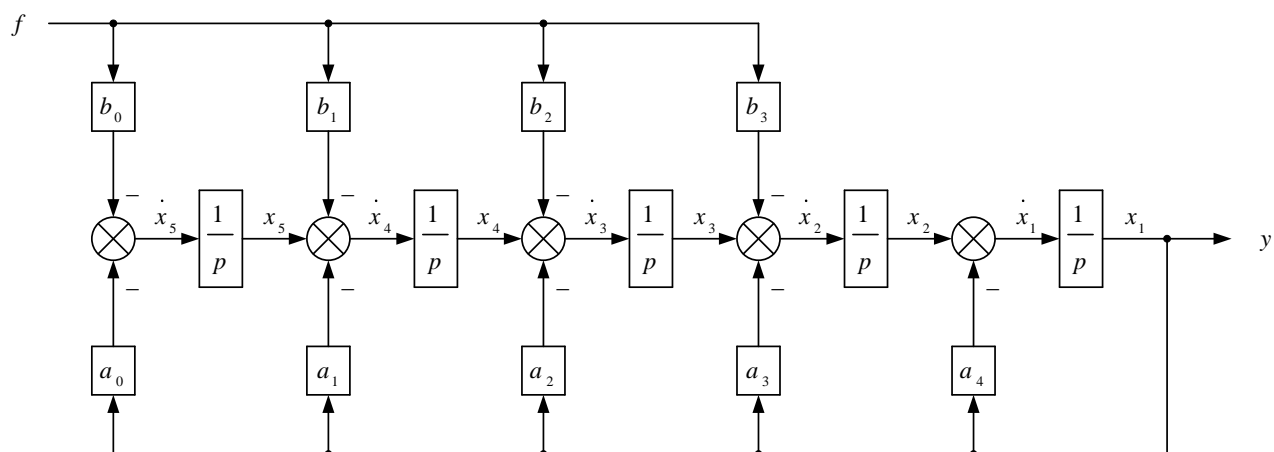


Рисунок 3.3 – Аналогова модель

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_4 \cdot x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_3 x_1 + x_3 - b_3 f, \\ \dot{x}_3 = -a_2 x_1 + x_4 - b_2 f, \\ \dot{x}_4 = -a_1 x_1 + x_5 - b_1 f, \\ \dot{x}_5 = -a_0 x_1 - b_0 f. \end{cases}$$

$$\dot{x} = Ax + B_2 f$$

$$y = Cx + D_2 f,$$

$$B_2 = \frac{1}{a_5} \begin{bmatrix} 0 \\ -b_3 \\ -b_2 \\ -b_1 \\ -b_0 \end{bmatrix}, C = [1/a_5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], D_2 = 0$$

$$\dot{x}(t) = Ax + B_1 u + B_2 f$$

$$y(t) = Cx$$

Для забезпечення повноцінного аналізу динамічних властивостей розробленої електромеханічної системи, виконаємо формальну перевірку її на керованість та спостережуваність. Ці властивості є критично важливими при проектуванні систем автоматичного керування, оскільки вони визначають здатність системи забезпечити бажану траєкторію стану за допомогою наявних вхідних сигналів, а також можливість оцінювання внутрішніх координат, які безпосередньо не підлягають вимірюванню. Структура моделі повинна бути побудована таким чином, щоб виключити будь-які обмеження, які могли б унеможливити відновлення повного вектора стану з доступних вихідних сигналів, а також не перешкоджати ефективному керуванню системою через вхідні дії. Аналіз зазначених характеристик буде здійснено шляхом дослідження відповідних матриць керованості та спостережуваності, які витягуються з рівнянь стану. У випадку позитивного результату можна стверджувати про структурну повноту і коректність математичного опису системи [17].

$$Q_k = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B \quad A^4B],$$

$$Q_c = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T \quad (A^T)^3 C^T \quad (A^T)^4 C^T]$$

$$Q_c = \text{obsv}(A, C),$$

$$Q_k = \text{ctrb}(A, B)$$

$$H_p(p) = \det[pI - (A - BK)]$$

$$H_c(p) = \det[pI - (A - LC)]$$

$$W(p) = 1 / D(p) \Big|_{\omega_0=1},$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_0 = t_n^* / t_n$$

$$D(p) = p^5 + 3.24\omega_0 p^4 + 5.24\omega_0^2 p^3 + 5.24\omega_0^3 p^2 + 3.24\omega_0^4 p + \omega_0^5$$

$$\lambda_i^* = \omega_0 (\cos(\pi(2i-1)/n) + j \sin(\pi(2i-1)/n)), i = \overline{1, n}$$

З метою встановлення залежності між числовими характеристиками динамічного процесу, зокрема між значенням перехідної функції та часом протікання перехідного процесу, доцільно вводити поняття нормованої перехідної характеристики. Нормалізація здійснюється відносно часової шкали, яка визначається спеціальним параметром, що виконує роль масштабуючого коефіцієнта. Такий підхід дозволяє уніфікувати форму перехідної функції для різних значень цього параметра, за умови фіксованого порядку полінома, що описує систему [17].

Структура такої нормованої перехідної функції відповідає системі з передаточною функцією, яка має лише комплексні або дійсні полюси, без наявності нулів, причому співвідношення між коефіцієнтами чисельника і знаменника дорівнює одиниці. Ці характеристики забезпечують зручність при моделюванні типових перехідних процесів. Нормовані криві переходу отримуються шляхом підстановки одиничного значення масштабу параметра у математичні вирази, що задають коефіцієнти полінома для відповідного порядку системи. Така процедура дозволяє отримати еталонні графіки, що застосовуються для попереднього аналізу, синтезу та порівняння якості динамічних режимів керування [19].

Подальші ілюстрації демонструють графічне відображення нормованих перехідних характеристик, побудованих відповідно до заданих параметрів стандартних моделей. Як впливає з аналізу представлених кривих, величина перерегулювання, характерна для таких типових нормованих перехідних функцій, не перевищує 20% від встановленого значення. Це свідчить про те, що

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

система демонструє помірно коливальний характер поведінки, залишаючись у межах прийняттого рівня динамічного переналаштування після зміни вхідного впливу. Такий результат є типовим для багатьох технічних систем з оптимізованим розміщенням полюсів, зокрема для систем, побудованих на основі поліномів або подібних аперіодичних моделей високого порядку.

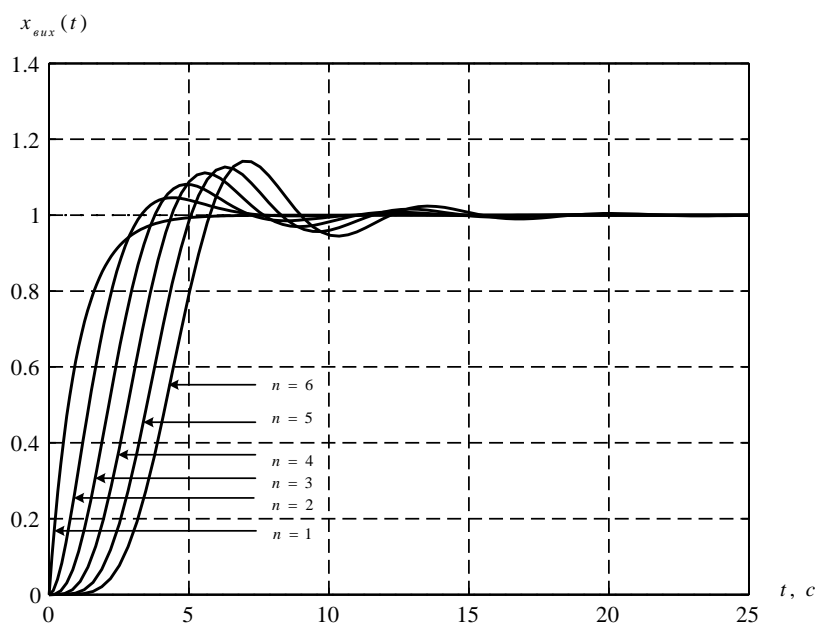


Рисунок 3.4 –Перехідні функції

Мікроконтролер виконує центральну роль у функціонуванні системи керування та забезпечує реалізацію алгоритму модального регулювання. Його завданням є не лише обчислення керуючих дій відповідно до заданої моделі, а й виконання додаткових функцій, таких як захист електродвигуна від перевантаження, що підвищує надійність системи в умовах експлуатаційних перевантажень [17].

До обов'язків мікроконтролера також входить обробка інформаційних сигналів, що надходять від датчика положення (енкодера), з метою забезпечення точного визначення кутового положення модуля озброєння (МО). Оброблена інформація використовується для формування ШІМ-сигналів, які подаються на силові ключі — MOSFET транзистори. Передача сигналів від мікроконтролера до

силових елементів здійснюється через блок гальванічної розв'язки та драйвери, що дозволяє ізолювати високовольтні кола від керуючої частини, забезпечуючи безпечну та стабільну роботу системи [17].

Для підвищення точності регулювання напруги в системі використовується датчик напруги, який забезпечує зворотний зв'язок про стан живлення і дозволяє вносити коригування в режим керування силовими елементами.

Вимірювання та контроль кутового положення модуля здійснюються за допомогою енкодера, що забезпечує високоточний зворотний зв'язок для регулятора.

Особливу увагу необхідно приділяти співвідношенню між частотою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та частотою дискретизації (такт квантування). З метою уникнення інформаційних втрат та забезпечення стійкої роботи системи, період ШІМ повинен бути меншим за період квантування сигналу, що надходить на обробку мікроконтролером [20].

Крім того, система містить модуль — задавач інтенсивності (ЗІ), призначений для формування сталого значення прискорення. Цей елемент дозволяє формувати керуючий сигнал таким чином, щоб забезпечити плавне та контрольоване нарощування швидкості, що є критично важливим для високоточної роботи в динамічно змінних умовах, характерних для систем керування модулями озброєння.

$$W_{\phi}(p) = \frac{(1 - e^{-pT_0})}{p},$$

$$W(z) = Z \left\{ W_{\phi}(p) \cdot \frac{1}{p} \right\} = Z \left\{ \frac{(1 - e^{-pT_0})}{p} \cdot \frac{1}{p} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{1}{p^2} \right\},$$

$$W(z) = \frac{z-1}{z} \left[ \frac{T_0 z}{(z-1)^2} \right] = \frac{T_0}{z-1}$$

$$D\hat{x} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

$$\hat{x} = J[(A - LC)\hat{x} + Bu + Ly],$$

$$\hat{x} = \frac{T_0}{z-1}[(A - LC)\hat{x} + Bu + Ly],$$

$$(z-1)\hat{x}(z) = T_0[(A - LC)\hat{x}(z) + Bu + Ly],$$

$$\hat{x}(k+1) - \hat{x}(k) = T_0[(A - LC)\hat{x}(z) + Bu + Ly],$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + T_0[(A - LC)\hat{x}(z) + Bu + Ly],$$

У середовищі MATLAB реалізовано функціонал, що дозволяє виконувати дискретизацію безперервних динамічних систем, які задані у вигляді передаточних функцій або у формі систем диференціальних рівнянь у просторі станів. Для цього застосовується метод апроксимації із затримкою нульового порядку (Zero-Order Hold, ZOH), який передбачає утримання вхідного сигналу на постійному рівні протягом кожного періоду дискретизації. Такий підхід дає змогу отримати еквівалентну дискретну модель, що точно відтворює поведінку безперервної системи у дискретні моменти часу, що особливо важливо при реалізації цифрових систем керування [17].

$$[numDz, denDz] = c2dm(num, den, Ts, 'zoh')$$

$$[Ad, Bd, Cd, Dd] = c2dm(A, B, C, D, Ts, 'zoh')$$

$$T_0 \leq \frac{2\pi}{6\omega_c},$$

$$t_{n.n.} = \frac{3.2 \div 3.3}{\omega_c},$$

					<b>ЕМКС 043004 000 ПЗ</b>	Арк.
						43
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_c = \frac{3.2 \div 3.3}{t_{n.n.}}$$

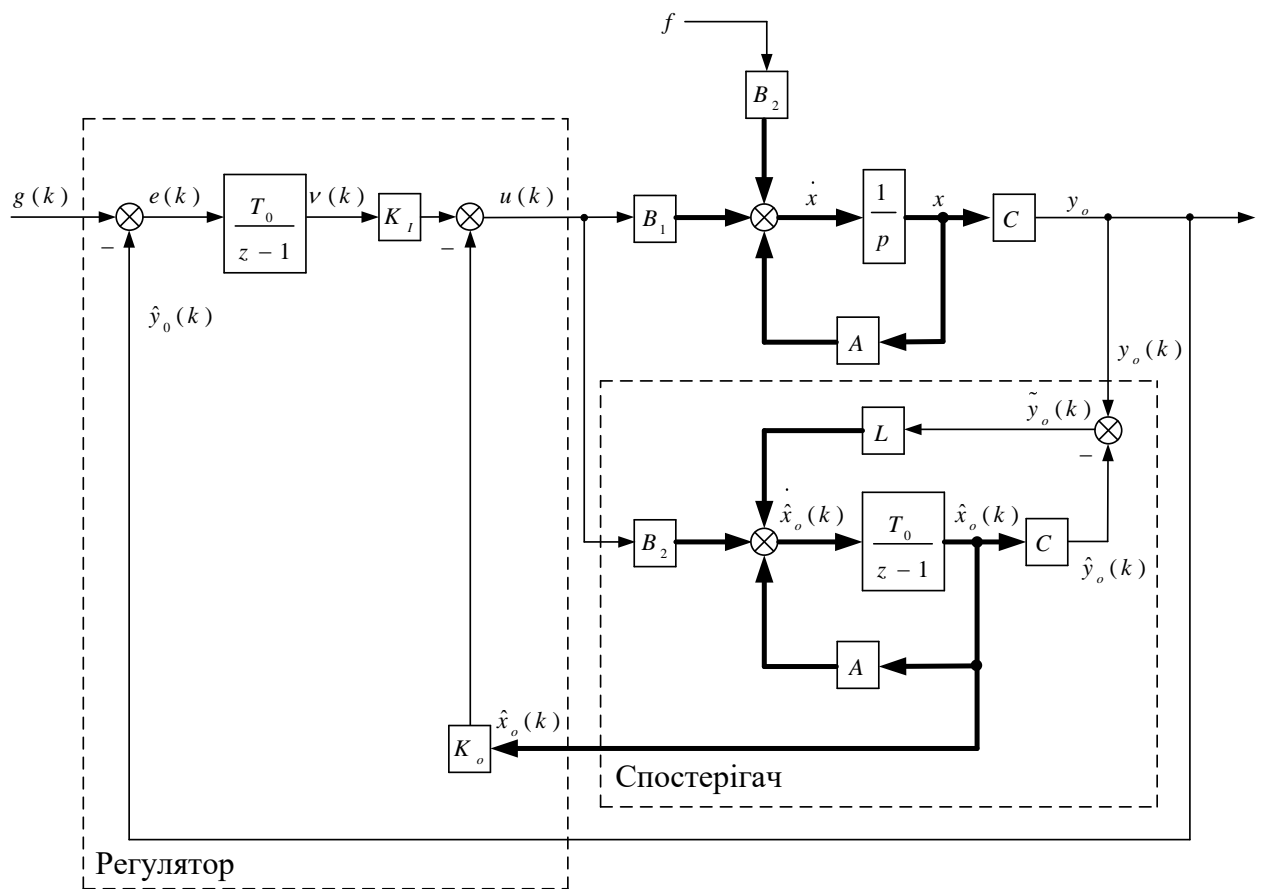


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи

Спостерігачі стану створюються як високоточно відтворені моделі об'єктів керування, які приймають на вхід ідентичні сигнали, що надходять до керованої системи [19]. Така модель, що є дублікатом самого об'єкта, забезпечує можливість імітації внутрішніх процесів системи у режимі реального часу. Важливим елементом конструкції спостерігача є додатковий коригуючий канал, який постійно порівнює реальний вихід об'єкта керування з його оцінкою, отриманою спостерігачем. За рахунок цього механізму порівняння та зворотного зв'язку відбувається поступове уточнення і корекція оцінок внутрішніх змінних стану системи. В результаті, навіть при неповній або обмеженій доступності інформації про систему, спостерігач здатний досить точно реконструювати

реальні значення стану об'єкта, що значно підвищує якість контролю та ефективність керування.

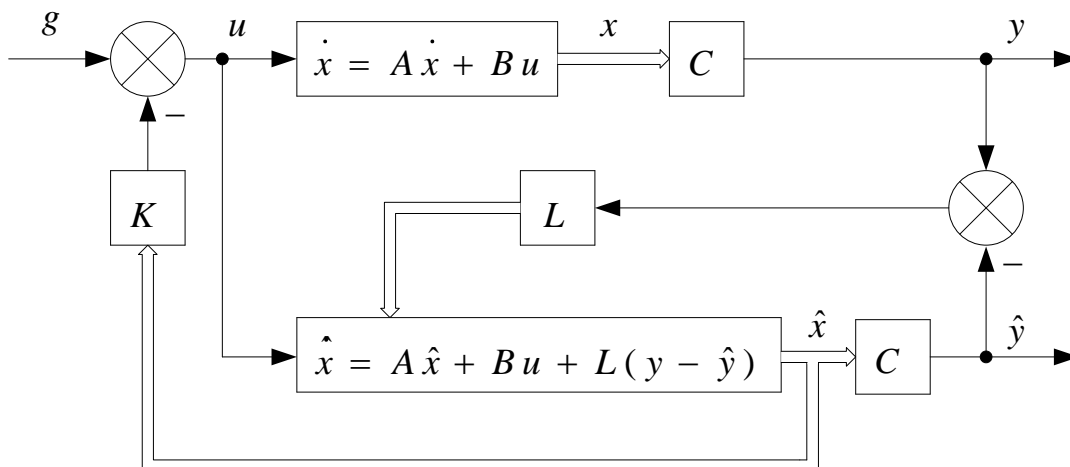


Рисунок 3.6 – Структурна схема EMC

$$L = \text{place}(A', C', p),$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A - BK) & BK \\ 0 & (A - LC) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$A_t = [A - BK, \quad BK; \quad \text{zeros}(\text{size}(A)), \quad A - LC];$$

$$B_t = [B; \quad \text{zeros}(\text{size}(B))];$$

$$C_t = [C, \quad \text{zeros}(\text{size}(C))].$$

Нижче представлена детальна розгорнута структурна схема електромеханічної системи (EMC), що включає модальний регулятор та спостерігача стану, яка використовується в ході досліджень. Ця схема ілюструє взаємодію ключових компонентів системи та їх функціональне поєднання, що забезпечує ефективне управління динамікою об'єкта [17].

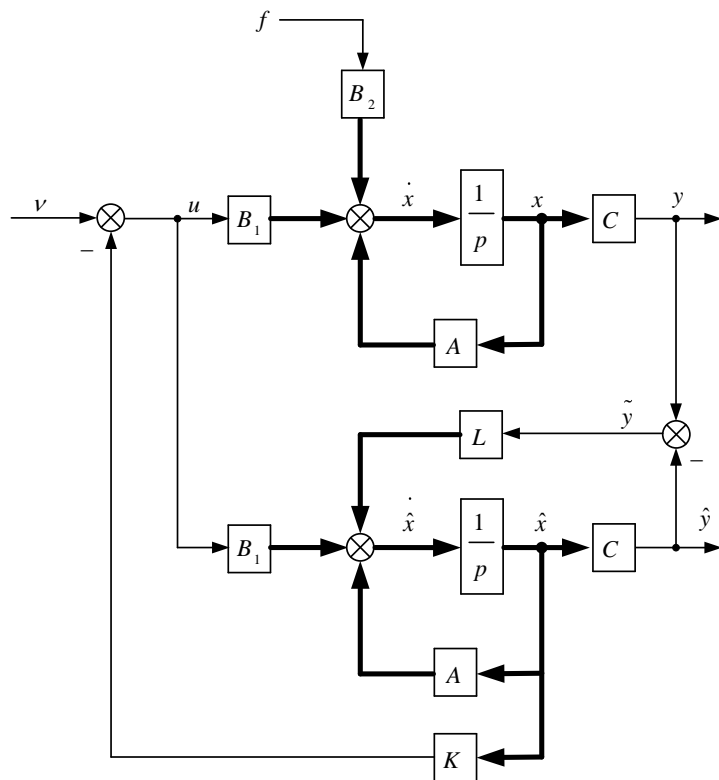


Рисунок 3.7 – Структурна схема ЕМС

Для забезпечення астатичності системи по відношенню до зовнішніх впливів і навантажень, до вже наявного модального регулятора (МР) вводиться додатковий інтегральний регулятор (ІР), який реалізує інтегруючу дію на вихідну координату системи. Включення інтегральної ланки у керуючий контур дозволяє ефективно компенсувати постійні збурення, що виникають у процесі роботи, і тим самим забезпечує стабільне підтримання заданого режиму без сталих похибок. На ілюстрації, наведеній нижче, представлена структурна схема такої неперервної системи з одним входом і одним виходом у вигляді просторово-статевої моделі, що наочно демонструє взаємодію основних блоків системи [20].

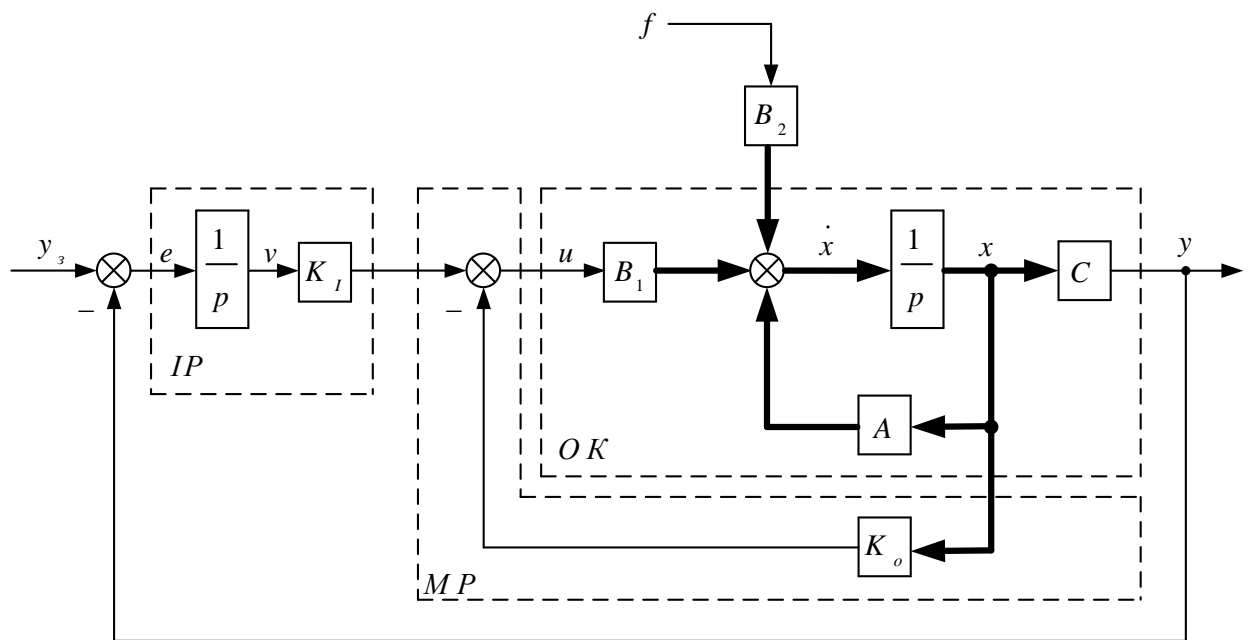


Рисунок 3.8 – Структурна схема СМК

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} u(t),$$

### Висновок

Розроблений лінійний модальний регулятор (MP), інтегрований у систему керування кутовим положенням модуля озброєння (МО), за умови повного доступу до інформації про вектор стану об'єкта керування (ОК), дозволяє ефективно досягати заздалегідь визначених параметрів динамічної якості системи, що наведені у працях [1, 2]. Зокрема, це забезпечує контрольоване значення показників перерегулювання, а також оптимальну швидкість формування перехідних процесів. Використання зворотного зв'язку, організованого за вектором стану, відкриває широкі можливості для точного розміщення власних значень (полосів) замкненої системи у вибраних ділянках комплексної площини, що, у свою чергу, гарантує формування стабільної та керованої динамічної поведінки.

Суттєвим фактором, що спрощує і пришвидшує процедуру синтезу модального регулятора, є застосування високопродуктивного програмного

комплексу MatLab, який надає розвинений інструментарій для побудови моделей, проведення їх аналізу, а також оптимізації параметрів систем керування.

При цьому характеристичний поліном замкнутої системи, що включає в себе об'єкт та модальний регулятор, інтегрований через спостерігача стану, формально утворюється як добуток двох незалежних поліномів: полінома об'єкт-регулятор та полінома спостерігача стану. Це розділення полюсів замкненої системи на дві окремі групи дає змогу виконувати незалежне управління кожною множиною власних значень шляхом відповідного підбору параметрів матриць зворотного зв'язку та оцінювання. Внаслідок цього процес проєктування та синтезу регулятора стану і спостерігача стану можна проводити окремо, що значно знижує складність та підвищує гнучкість побудови ефективних систем автоматичного керування.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						48
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

#### 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ

Під час проведення моделювання створеної системи модального керування було ретельно відібрано комплекс параметрів, що визначають ключові характеристики її основних компонентів. Для приводу було обрано електродвигун відомого виробника MAXON, який у каталозі позначається номером RE65-353295. Цей двигун відповідає необхідним технічним вимогам, що забезпечують належну працездатність і ефективність системи керування. Вибір моделі RE65-353295 базується на її здатності забезпечувати достатній рівень потужності, високу динамічну реакцію та надійність експлуатації, що має вирішальне значення для досягнення стабільної роботи і точного регулювання кутового положення модуля озброєння [17].

На рисунку наведено часові характеристики перехідних процесів, що виникають при подачі ступінчастого сигналу керування певної амплітуди за умови номінального моменту інерції об'єкта керування (ОК). Зокрема, навантаження у вигляді ступінчастого сигналу було подано на інтервалі часу від 0 до 1 секунди, після чого зняте на позначці 1.5 секунди. Представлено повний перехідний процес зміни кутового положення об'єкта, а також його детальний фрагмент на окремому рисунку. Аналіз цих графіків підтверджує астатичний характер системи стосовно навантаження, що свідчить про здатність системи компенсувати постійні збурення.

Крім того, на інших рисунках зображено часові залежності швидкості об'єкта керування, а також графіки напруги і струму, які характеризують електричну частину системи протягом перехідного процесу. Варто відмітити, що обмеження на величину напруги справляє негативний вплив на якість переходу, уповільнюючи процес стабілізації.

У завершальній частині представлено порівняння фактичних значень кутового положення та швидкості повороту ротора електродвигуна з їх оцінками, отриманими за допомогою спостерігача стану, що дозволяє оцінити ефективність алгоритму оцінювання та керування [21].

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

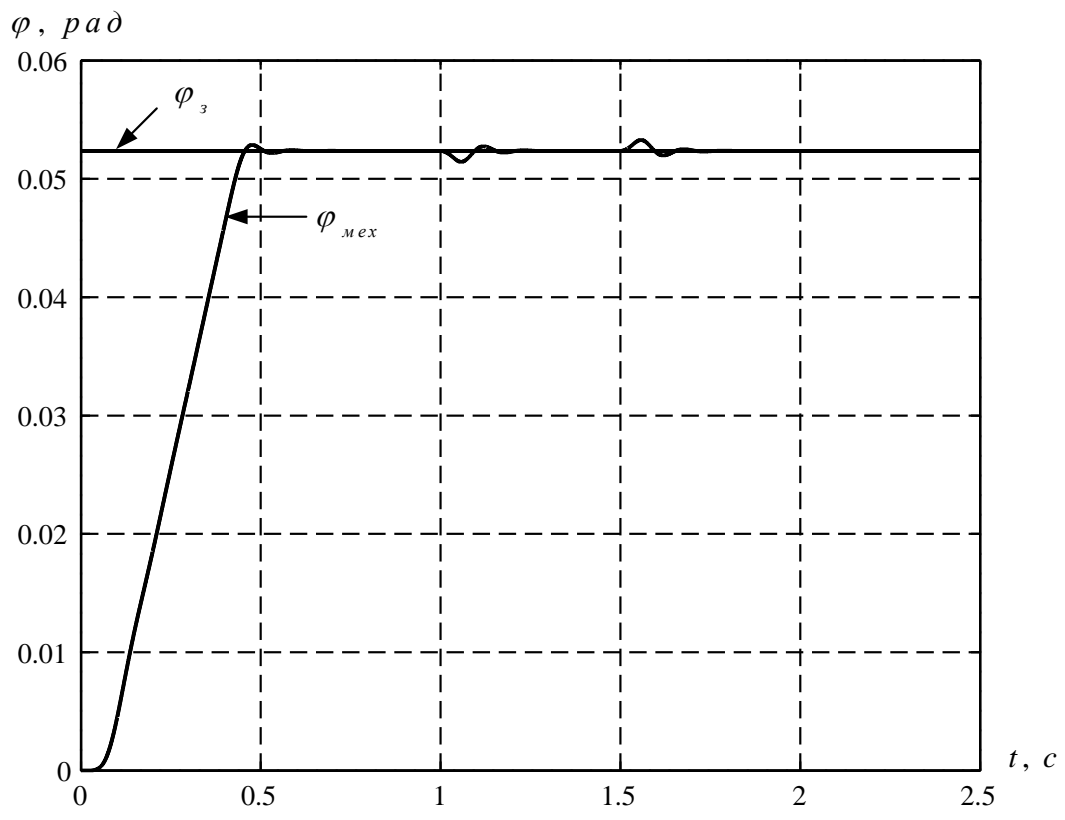


Рисунок 4.1 – Кутове положення ОК

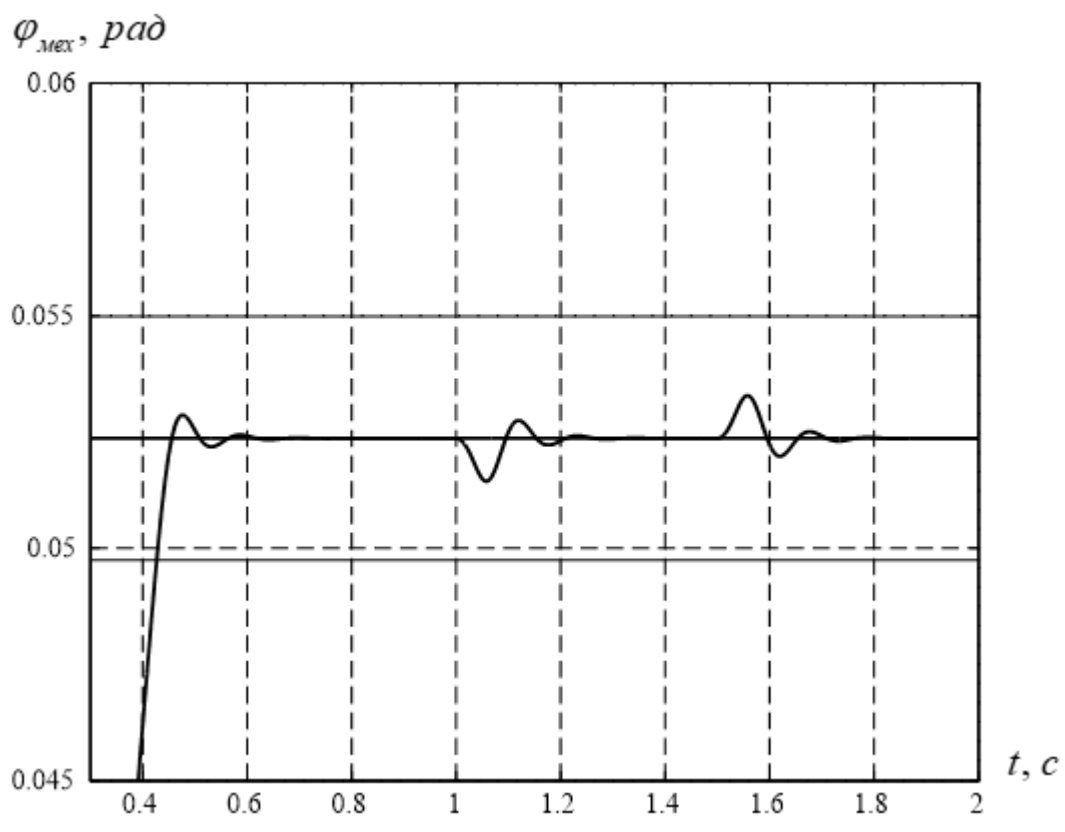


Рисунок 4.2 – Фрагмент перехідного процесу

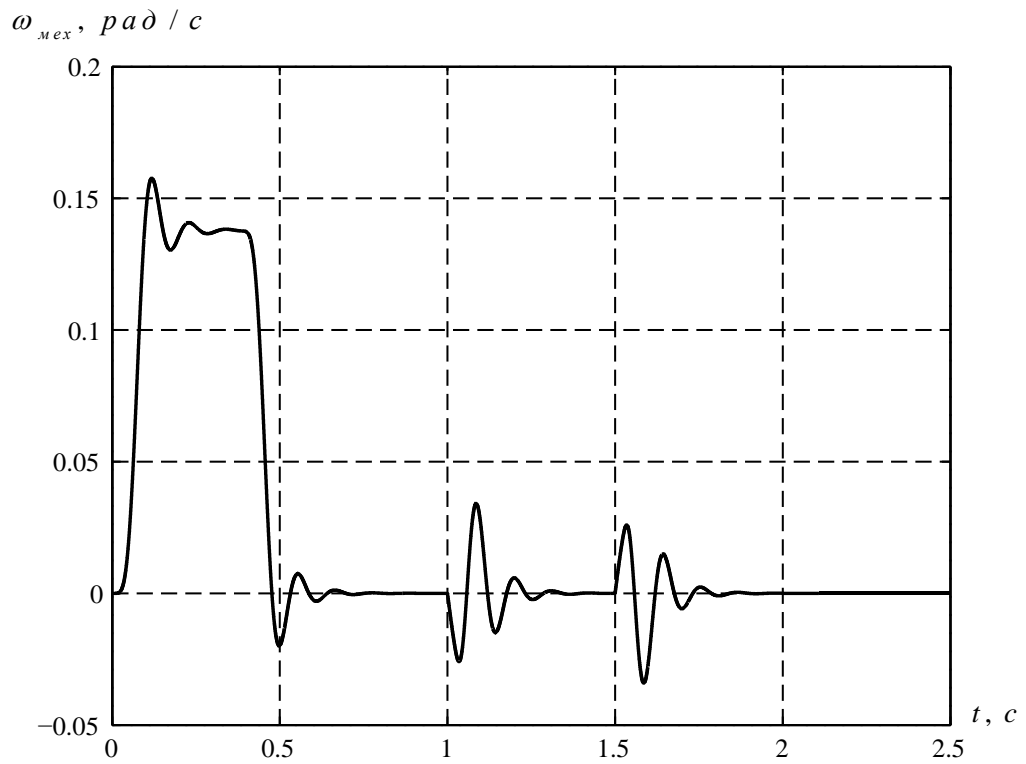


Рисунок 4.3 – Графік перехідного процесу

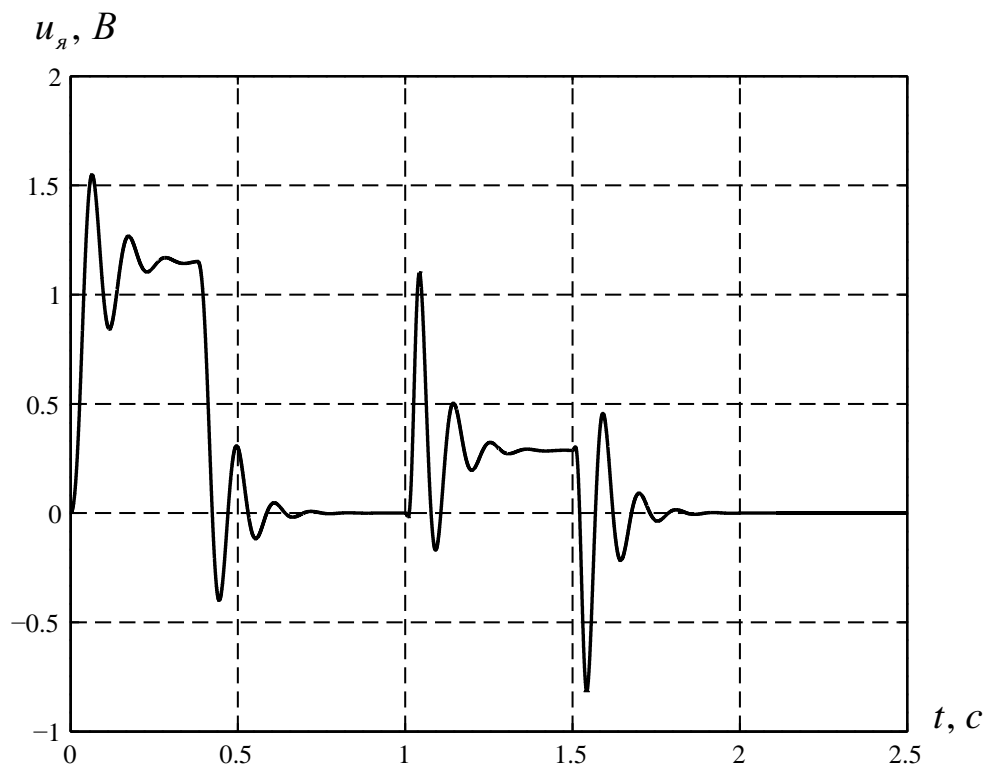


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу

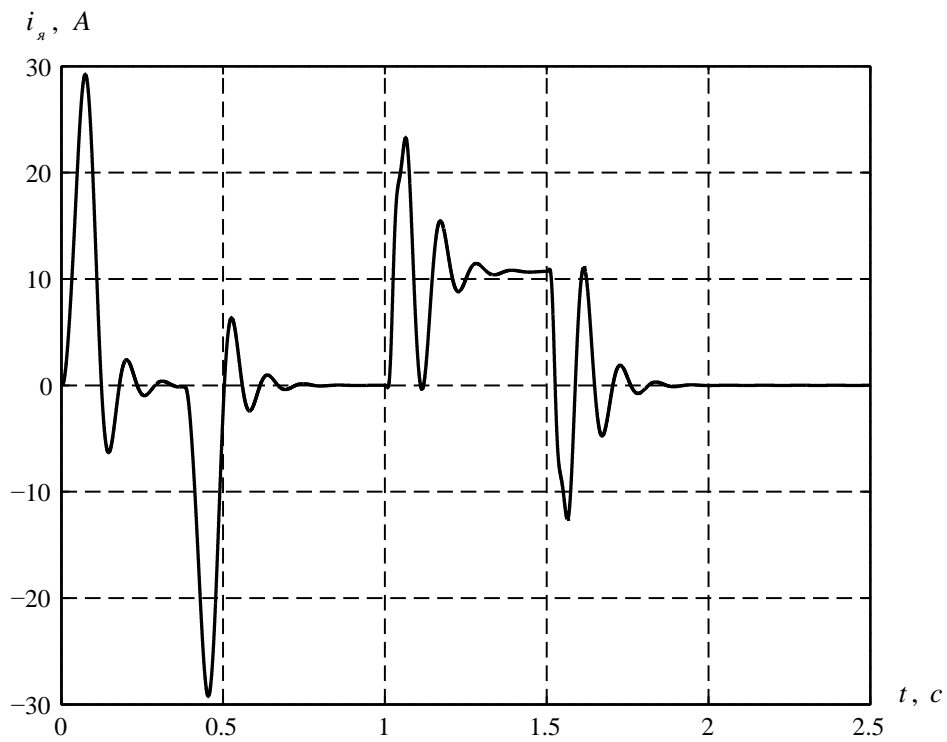


Рисунок 4.5 – Графік перехідного процесу

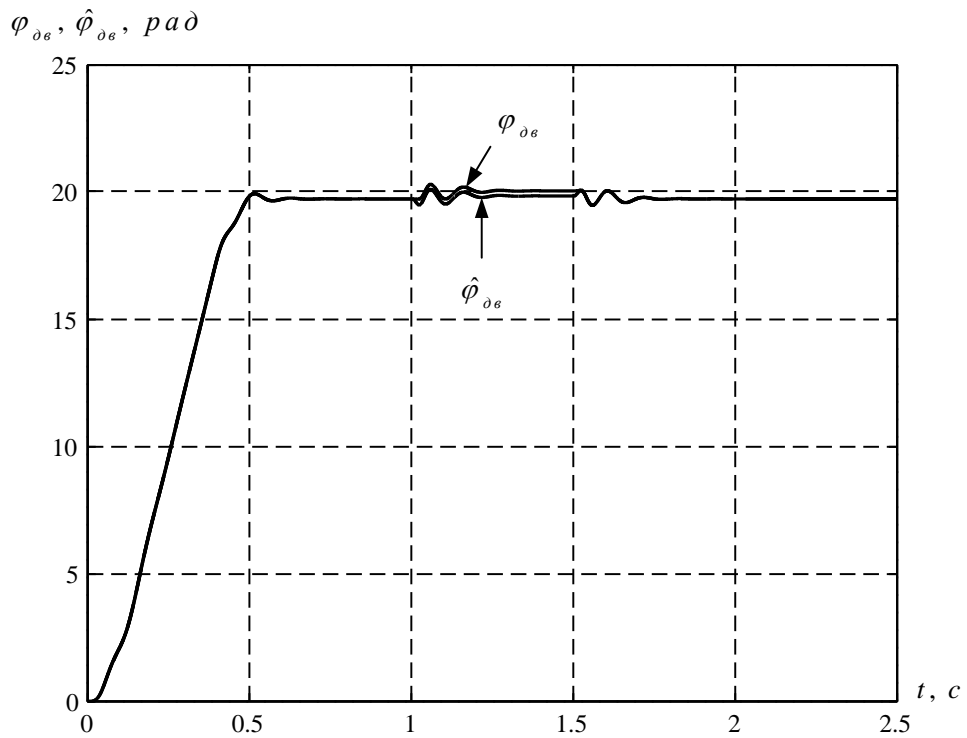


Рисунок 4.6 – Графік зміни кута



Перерегулювання виявилось на рівні, що відповідає критеріям швидкодії та стабільності, а час перехідного процесу склав оперативне досягнення необхідного режиму роботи.

Варто відзначити, що впровадження інтегрального регулятора у структуру модального регулятора значно покращує якість регулювання, зокрема, усуваючи статичні відхилення під впливом постійного збурення, такого як статичний момент навантаження. Завдяки цьому, інтегральна складова системи забезпечує підтримку точного утримання встановленої позиції модуля озброєння навіть у разі довготривалих зовнішніх впливів, що позитивно впливає на надійність і точність роботи всієї системи.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВИСНОВКИ

У межах проведеного дослідження було виконано синтез та комплексний аналіз динамічних режимів електропривода, що забезпечує цифрове модальне керування кутовим положенням модуля озброєння у вертикальній площині. Система керування побудована на основі лінійного модального регулятора з використанням спостерігача стану повного порядку. В якості інструменту моделювання і синтезу застосовувалося програмне середовище MatLab, що дозволило отримати високоточні результати і оптимізувати параметри системи.

В ході роботи було успішно розв'язано завдання синтезу цифрового модального регулятора разом із відповідним спостерігачем стану для об'єкта керування, який включає двохмасову електромеханічну підсистему. При цьому враховувалися обмеження на час перехідного процесу та максимальне перерегулювання, що є критичними параметрами для забезпечення ефективної роботи системи керування.

Отримані результати показали, що динамічні характеристики електропривода, який управляє вертикальною площиною систем наведення озброєння броньованих машин, значною мірою залежать від особливостей об'єкта керування. Зокрема, важливою складовою є двохмасова пружна підсистема, яка піддається впливу змінних моментів інерції та змінюваного навантаження в процесі функціонування, що ускладнює забезпечення стабільної роботи системи.

Визначено, що одним із суттєвих недоліків електромеханічних систем із модальним регулятором є явище статизму (наявність постійної помилки під дією зовнішніх навантажень). Для подолання цього недоліку рекомендовано впровадження інтегральної складової помилки, яка забезпечує усунення постійних відхилень та покращує точність керування.

Крім того, у роботі була розроблена ефективна методика автоматизованого синтезу систем модального керування та спостерігачів стану, що реалізується як у чисельній, так і в аналітичній формі. Ця методика дозволяє значно спростити та

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						55
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прискорити процес проектування систем керування з високими технічними вимогами.

Завдяки застосуванню зазначених підходів було синтезовано як аналогові, так і цифрові системи автоматичного керування для двохмасового електромеханічного об'єкта, які характеризуються покращеними динамічними властивостями, що сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи систем наведення озброєння.

					<i>ЕМКС 043004 000 ПЗ</i>	Арк.
						56
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		