

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) Сергій ПЕРЕСАДА

“ ” 2021 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Спостереження та ідентифікація в електроприводах постійного струму з
підпорядкованим регулюванням швидкості

Виконав: студент _____ 4 _____ курсу, групи _____ ЕП-71
(шифр групи)

Каленчук Ярослав Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ Толочко О. І., д.т.н., професор
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент _____ Шинкаренко В.Ф., д.т.н., професор
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.0005.020.БР	Пояснювальна записка	84	
3	A1	141.0005.020.БР	Принципова схема електроприводу постійного струму	1	
4	A1	141.0005.020.БР	Структурні схеми електроприводу із ідентифікацією	1	
5	A1	141.0005.020.БР	Результати досліджень	1	

				141.0005.020.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Каленчук Я.О.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Толочко О.І.				2	86
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71	
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Спостереження та ідентифікація в електроприводах постійного струму з підпорядкованим регулюванням швидкості

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Каленчуку Ярославу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту _____ Спостереження та ідентифікація в електроприводах постійного струму з підпорядкованим регулюванням швидкості,

керівник проекту _____ Толочко О. І., д.т.н., професор,

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____ матеріали переддипломної практики та
рекомендована література

4. Зміст пояснювальної записки Аналітичний огляд систем електроприводу постійного струму, діапазону зміни параметрів, методів ідентифікації; Спостереження невимірюваного збурення двигуна постійного струму; Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму градієнтним методом із

використанням дійсного значення струму якоря; Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму градієнтним методом без використання дійсного струму якоря.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Принципова схема електроприводу постійного струму, структурні схеми електроприводу із ідентифікацією, результати досліджень.

6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 01.03.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд систем ідентифікації	01.03 – 25.03	
2	Спостереження збурення двигуна постійного струму	25.03 – 10.04	
3	Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму із якірним струмом	10.04 – 28.04	
4	Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму без використання струму якоря	28.04 – 20.05	
5	Оформлення пояснювальної записки	20.05 – 06.06	

Студент

(підпис)

Каленчук Я.О.

Керівник проекту

(підпис)

Толочко О.І.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить сторінок – 85, рисунків – 49, таблиць – 1 та графічну частину на 3 листах А1.

Виконано аналітичний огляд невизначеностей у електроприводах постійного струму, методів оцінювання невимірюваних сигналів та ідентифікації параметрів.

Розроблено спостерігач стану, що оцінює момент статичного опору, як невимірюване збурення та побудовано модель для його дослідження у складі системи підпорядкованого регулювання швидкості. Для реалізації астатичної за швидкістю системи порівнювались система з компенсацією спостереженого збурення із системою з використанням ПІ-регулятора швидкості.

Розроблено закони ідентифікації градієнтним методом електромеханічної та електромагнітної сталих часу двигуна постійного струму. Шляхом математичного моделювання підтверджено працездатність розробленого алгоритму.

Обґрунтовано доцільність параметричної ідентифікації. Досліджено залежність швидкодії ідентифікації від коригувальних коефіцієнтів.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ,
ПІДПОРЯДКОВАНЕ КЕРУВАННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, СПОСТЕРІГАЧ
СТАНУ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

					<i>141.0005.020.БР</i>			
		№ докум.	Підпис	Дата				
		Каленчук Я.О.			<i>Спостереження та ідентифікація в електроприводах постійного струму з підпорядкованим регулюванням швидкості Реферат</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Толочко О.І.					6	86
						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП -71</i>		
Н. Контр.								
		Пересада С. М.						

ABSTRACT

Diese Bachelorarbeit enthält 85 Seiten, 49 Bilder, eine Tabelle und drei Beilagen Papierformat A1.

Es wurde eine analytische Erhebung von der Unbestimmtheit eines Gleichstromantriebs durchgeführt, sowie von der ungemessenen Signale Beobachtungsmethoden und von der parametrischen Identifikation.

Es habe einen Beobachter der nicht gemessenen Anregung bekommen und einen Model für seine Forschung in einer Drehzahl-Strom-Regelung Kaskadenstruktur gebaut. Um einen statischen Fehler zu vermeiden, wurde ein System mit der Kompensation der geschätzten Anregung mit einem System mit der Anwendung einen PI-Regler verglichen.

Es habe die Gesetze der parametrischen Identifikation mittels Gradientenverfahren für eine Gleichstrommaschine erstellt. Durch mathematische Modellierung wurde Arbeitsfähigkeit des Identifikationsverfahrens nachgewiesen.

Es habe Notwendigkeit einer parametrischen Identifikation bestätigt und die Anhängigkeit der Schnelligkeit von Koeffizienten der Identifikationsgesetz festgestellt.

ELEKTRISCHER ANTRIEB, GLEICHSTROMMASCHINE, KASKADENSTRUKTUR; IDENTIFIKATION, ZUSTANDSBEOBSACHTER, MATHEMATISCHE MODELIERUNG.

					<i>141.0005.020.БР</i>						
		№ докум.	Підпис	Дата							
		Каленчук Я.О.			<i>Спостереження та ідентифікація в електроприводах постійного струму з підпорядкованим регулюванням швидкості Реферат</i>			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Толочко О.І.							7	86	
								<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП -71</i>			
Н. Контр.											
		Пересада С. М.									

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Аналітичний огляд систем електроприводу постійного струму та методів ідентифікації	14
1.1 Огляд систем електроприводу	14
1.2 Огляд систем керування приводів постійного струму	15
1.3 Аналіз невизначеностей в системах електроприводу з ДПС	16
1.4 Огляд методів ідентифікації	17
1.5 Огляд методів оцінювання невимірюваних сигналів.....	18
Висновки до розділу	22
2 Спостереження невимірюваного збурення двигуна постійного струму	23
2.1 Математичний опис і структурна схема двигуна постійного струму із керуванням у колі якоря	23
2.2 Розробка системи підпорядкованого керування двигуном постійного струму	26
2.3 Розробка спостерігача стану	31
2.4 Порівняння використання ПІ-регулятора швидкості та компенсації спостереженого моменту статичного опору	34
Висновки до розділу	37
3 Ідентифікація параметрів Двигуна постійного струму градієнтним методом із використанням дійсного струму якоря.....	38
3.1 Сутність градієнтного методу	38
3.2 Ідентифікація електромагнітної сталої часу	41
3.3 Ідентифікація електромеханічної сталої часу двигуна	45

3.4 Дослідження моделювання системи параметричної ідентифікації із використанням дійсного значення струму якоря.....	52
Висновки до розділу	62
4 Ідентифікація параметрів Двигуна постійного струму градієнтним методом без використання дійсного струму якоря.....	63
4.1 Виведення передатних функцій чутливості	63
4.2 Дослідження моделювання системи параметричної ідентифікації без використання дійсного значення струму якоря.....	70
Висновки до розділу	73
Загальні висновки.....	73
Список використаної літератури	76
Додаток А.....	78
Додаток Б	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕП – електропривод

ДПС – двигун постійного струму

СПР – система підпорядкованого регулювання

КЗ – коротке замикання

РШ – регулятор швидкості

РС – регулятор струму

ТП – тиристорний перетворювач

а.о. – абсолютні одиниці

в.о. – відносні одиниці

ВСТУП

Актуальність роботи. Електричний привод постійного чи змінного струму, керований чи некерований оточує сьогодні людину скрізь. Використовуються як найменші за розміром електричні машини, наприклад вібратор у мобільному телефоні, так і середні, наприклад у електротранспорті чи у побуті, та великі, наприклад на прокатних станах.

Для багатьох механізмів регульований електричний привід є необхідністю. В залежності від типу машини існує чимало способів керування.

У більшості із алгоритмів керування використовуються параметри об'єкту, які під час роботи можуть піддаватись зміні. У тих системах, де не вимагається висока якість перехідних процесів чи відпрацювання завдання, допускається використання відомих наближено параметрів двигуна.

Але основною вимогою, що ставиться до відповідальних електроприводів, є асимптотичне відпрацювання вихідних координат при максимально можливому коефіцієнті корисної дії. Таке регулювання електричною машиною досягається у більшості типів керувань лише за наявності точних значень параметрів машини.

Через широке розповсюдження електричної мережі змінного струму та конструктивні особливості привод змінного струму витісняє електропривод постійного струму. Проте існують галузі, у яких використання електроприводу постійного струму є виправданим. Наприклад, у кранових установках, де важливу роль грають габарити та маса електричної машини. Іншим прикладом доречності використання машини постійного струму є випадки, коли наявна лише побутова мережа змінної напруги частотою 50 Гц, при підключенні до якої максимальна можлива швидкість холостого ходу обмежена 3000 об/хв. Машина постійного струму здатна розвивати частоту обертання і вище 4000 об/хв.

Із математичного опису двигуна постійного струму слідує ще одна важлива перевага такої машини, а саме простота розуміння та навчання.

Відомі регулятори є більш просто для розуміння синтезувати на такій машині, аніж на синхронному чи асинхронному приводі.

Хоча така система має ряд недоліків, до яких відносять наявність щітково-колекторного вузла та потреба у мережі постійного струму, двигун постійного струму найбільш придатний для початкового вивчення методів спостереження та ідентифікації. Після успішної реалізації системи на приводі постійного струму, реалізація ідентифікації та спостереження на приводі змінного струму може бути швидше та якісніше реалізована.

В даній роботі розглядається один із найбільш популярних методів ідентифікації – градієнтний.

Оскільки на систему можуть раптово діяти збурення, які важко виміряти, знання про оцінений момент статичного опору дозволять здійснити його компенсацію. Для цього побудовано спостерігач стану Люенбергера. Відсутність компенсації моменту статичного опору у слідкуючих системах може призвести до втрати працездатності системи.

Метою роботи є застосування та дослідження градієнтного методу ідентифікації електромагнітної та електромеханічних сталих часу двигуна постійного струму та розробка спостерігача моменту статичного опору для використання оціненої інформації при синтезі адаптивної системи керування двигуном постійного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати наявні методи ідентифікації та проаналізувати параметричні невизначеності.
2. Синтезувати спостерігач моменту статичного опору, як невимірюваного збурення, та дослідити ефективність його застосування у системі підпорядкованого регулювання.
3. Виконати ідентифікацію електромагнітної та електромеханічної сталих часу двигуна постійного струму із використанням дійсного значення струму якоря.

4. Виконати ідентифікацію електромагнітної та електромеханічної сталих часу двигуна постійного струму без використання дійсного значення струму якоря.
5. Застосувати оцінені параметри для поліпшення якості системи керування.
6. Дослідити систему підпорядкованого регулювання із використанням компенсації моменту статичного опору та із застосуванням у регуляторах ідентифікованих значень методом математичного моделювання.
7. Підвести підсумки за отриманими результатами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дипломний проект на здобуття наукового рівня бакалавр виконано на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» у національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» відповідно до плану підготовки бакалаврів.

Об'єктом досліджень є методи ідентифікації та спостереження.

Предметом дослідження є система підпорядкованого регулювання двигуном постійного струму із використанням методів ідентифікації та компенсації збурення.

Методи досліджень. В дипломному проекті використано методи класичної та сучасної теорії керування, методи інтегрального та диференційного числення, математичне моделювання.

Новизна роботи полягає у можливості проведення ідентифікації градієнтним методом без використання струму якоря.

Структура й обсяг роботи. Дипломний проект складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел у кількості 22, а також трьох додатків. Повний обсяг складає – 85 сторінок. У проекті наявні 49 рисунків та одна таблиця.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

У даному розділі розглянуто системи електроприводів, системи керування двигуном постійного струму (ДПС), обґрунтовано необхідність впровадження онлайн ідентифікації та оцінювання невизначеностей. Виконано аналіз існуючих методів ідентифікації параметрів та спостереження невимірюваних сигналів.

1.1 Огляд систем електроприводу

На сьогоднішній день електричні приводи зазвичай поділяють на приводи змінного струму, постійного та спеціальні. Як свідчить статистика продажів однієї із найбільших електротехнічних світових компаній АВВ, все більше компаній віддають перевагу [1] системам із двигунами змінного струму. Це можна пояснити тим, що електричні машини змінного струму є простішими у експлуатації, не потребують частих планових експлуатаційних робіт, живляться від мережі змінного струму, яка є побутовою і тому наявною на будь-якому підприємстві.

Проте при певних умовах експлуатації використання електроприводу змінного струму є небажаним. Наприклад, при роботі у зоні низьких швидкостей більш вдалим, є використання систем постійного струму, оскільки в останніх зазвичай використовуються незалежні системи охолодження, коли в приводах змінного струму – самовентиляція. Відсутність можливості повноцінного відведення тепла призводить до неможливості використання двигунів змінного струму.

Струм у побутовій мережі формується із частотою 50 Гц, що обмежує конструктивно досягнення швидкостей вище 3000 об/хв. Швидкість обертання валу двигуна постійного струму формується у ширшому діапазоні: від 300 до 4000 об/хв. Слід відмітити, що максимальний ККД системи електроприводу змінного струму [1] досягається у межах від номінальної частоти обертання

$n = n_n$ до подвійної номінальної $\frac{n}{n_n} = 2$. У приводах постійного струму такий діапазон ширший і максимальний ККД досягається навіть при $\frac{n}{n_n} = 3$.

Деякі механізми мають бути недорогими та потребують переміщення електричної машини разом із вантажем (підйомні або мостові крани) або компактне розміщення (бурові станції, печатні машинки, гірськолижні підйомники). В таких системах більш вдало буде використання ДПС, оскільки у порівнянні із асинхронними двигунами, вони мають менші габарити та масу.

Отже, у певних галузях системи електроприводу постійного струму неможливо замінити приводами змінного струму. Тому розгляд систем керування ДПС, у яких використовуватиметься ідентифікації є актуальною задачею.

1.2 Огляд систем керування приводів постійного струму

Широка автоматизації більшості галузей виробництва потребує керування електричних приводів. Існує декілька основних систем керування двигунами постійного струму.

За наявністю зворотних зв'язків їх можна поділити на

- замкнені системи – із використанням зворотних зв'язків;
- розімкнені системи – без використання зворотних зв'язків.

До розімкнутих електроприводів належать релейно-контакторні системи АЕП [2]. За своїм принципом вони формують сигнал завдання незалежно від дійсного значення регульованої координати. За статистикою у цих системах двигун підключений безпосередньо до мережі та апаратура використовується лише для здійснення перехідних процесів. Пуск у таких системах виконують реостатним та функцією обраної змінної, наприклад пуск в функції часу чи пуск в функції швидкості чи струму.

Замкнені системи керування представлені системами підпорядкованого регулювання.

У системі підпорядкованого регулювання (СПР) кожний контур виконує керування однієї координати. Внутрішній контур може функціонувати як незалежна система регулювання. Це досягається через те, що у такій структурі завдання кожного наступного контуру є вихід попереднього регулятора. Задля обмеження координати x_i достатньо обмежити вихід регулятора $i+1$. Налаштування кожного внутрішнього контуру можливе незалежно від налаштувань його зовнішніх контурів.

У даній роботі системою керування для двигуна постійного струму обрано систему підпорядкованого регулювання.

1.3 Аналіз невизначеностей в системах електроприводу з ДПС

Двигуни постійного струму мають дуже просту для розуміння структуру. Вона поділяється умовно на струмову та механічну частини. До струмової частини входить електромагнітна стала часу T_a (нім. *Anker* – «якір»), до механічної – електромеханічна T_m .

Обидві сталі часу належать до параметричних невизначеностей, оскільки вони наближено визначаються та можуть змінюватись під час роботи приводу.

Електромагнітна стала часу T_a є відношенням опору до індуктивності якірного кола. Оскільки під час тривалої роботи обмотки електричної машини піддаються нагріву, опір якірного кола у нагрітому та холодному станах буде різним. Тому стала часу T_a повинна бути ідентифікована.

Більшість механізмів мають незмінний момент інерції, але у деяких робочих машин він може піддаватись зміні. В кривошипно-шатунних, мальтійських та ексцентрикових механізмах момент інерції є функцією кута повороту, а у підйомно-транспортних, тягових механізмах, моталках та роботах маніпуляторах момент інерції може змінюватись в залежності від навантаження, робочого радіусу чи інших факторів.

Електромеханічна стала є залежною від моменту інерції величиною, тому проведення ідентифікації сталої часу T_M є необхідним.

Ідентифікацію моменту навантаження слід виконувати, оскільки він є збуренням для об'єкту керування. Аналіз статичного опору необхідний задля уникнення пробуксовок, вирівнювання зусиль між двигунами у багатодвигунному режимі, для формування заданих траєкторій, за яких досягаються найменші теплові втрати. Ідентифікацію моменту статичного опору можна виконувати за допомогою спостерігачів стану, оскільки він відноситься до сигналів, які важко або неможливо виміряти безпосередньо.

Відповідно до цього, виконаємо ідентифікацію електромеханічної T_M та електромагнітної T_a сталих часу. Для оцінки моменту навантаження використаємо спостерігач стану.

1.4 Огляд методів ідентифікації

Ідентифікація систем – сукупність методів для побудови математичних моделей динамічної системи за даними спостережень. Ідентифікація параметрів є складною математичною задачею і є тим складнішою, чим складніша структура об'єкта регулювання. На сьогоднішній день існує [3] два типи методів ідентифікації – структурна та параметрична.

Структурна ідентифікація передбачає визначення структури – вигляду математичної моделі об'єкта.

Після того, як структурна ідентифікація проведена – виконують параметричну ідентифікацію, яка полягає у визначенні числових параметрів математичної моделі. В якості математичних моделей слугують, наприклад, диференційні рівняння [4].

Теоретично структурні методи потребують нескінченної кількості параметрів, але в реальних системах вектор параметрів обмежують. Ця кількість параметрів є значно більшою, ніж при модельній ідентифікації [3].

Також існують інші способи оцінювання [5], наприклад рекурентний метод інструментальних змінних чи рекурентний метод псевдолінійної регресії, але вони не будуть розглянуті, бо є більш складними для розуміння та реалізації.

Оскільки електричні машини є гарно вивченими об'єктами, і структурні схеми уже виведені та доступні зупинимось на параметричному методі. Для визначення параметрів дослідженого об'єкту у законі адаптації використовують значення помилки дійсного значення величини та оціненого. Таку помилку у модельних методах [5] обраховують за допомогою ітераційних методів пошуку, наприклад лінійними регресіями, обрахунком градієнту або іншими.

Один із найбільш розповсюджених методів ідентифікації є градієнтний метод, тому виконаємо ідентифікацію сталих часу двигуна постійного струму градієнтним методом.

1.5 Огляд методів оцінювання невимірюваних сигналів

1.5.1 Спостерігачі стану Люенбергера

При неможливості виміру однієї чи декількох змінних для їх ідентифікації використовують спостерігачі стану (СС). Задачі, у яких не можуть бути вимірними усі компоненти вектору стану \mathbf{X} , відносять до категорії задач керування або компенсації збурень при неповній інформації про об'єкт керування (ОК) [6].

Найбільше поширення в системах автоматизованого електропривода знайшли спостерігачі стану, запропоновані Люенбергером [7, 8].

Розглянемо довільний неперервний динамічний об'єкт n -го порядку, який має один вхід $u(t)$ та один вихід $y(t)$. Такий об'єкт можна описати системою диференціальних рівнянь у просторі станів [9]:

$$\begin{cases} d\mathbf{X}(t)/dt = \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

або в операторній формі (шляхом заміни d/dt на s)

$$\begin{cases} s\mathbf{X}(s) = \dot{\mathbf{X}}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}u(s), \\ y(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s), \end{cases} \quad (1.2)$$

де $\mathbf{X}(s)$ – вектор змінних стану розміром $n \times 1$; \mathbf{A} – матриця стану розміром $n \times n$; \mathbf{B} – матриця входу розміром $n \times 1$; \mathbf{C} – матриця виходу розміром $1 \times n$, n – порядок системи диференціальних рівнянь.

Припустимо, що в ОК точно можна виміряти тільки вхідний сигнал u та вихідний y , а усі змінні стану $\mathbf{X}(s)$ спостережувані. Підключимо паралельно до ОК модель, яка має таку ж структуру (рис. 1.1).

Сигнал корекції стану $s\tilde{\mathbf{X}}$ формується шляхом введення зворотного зв'язку за сигналом похибки між вихідними сигналами спостерігача стану та об'єкту:

$$e_y = y - \hat{y} \quad (1.3)$$

помноженому на матрицю \mathbf{L} розміром $n \times 1$. Коли процес зійдеться, то стани моделі (СС) будуть повторювати стани об'єкту. Саме така модель зветься спостерігачем Люенбергера [9]. Якщо використовується повна модель ОК, то спостерігач зветься еквівалентним.

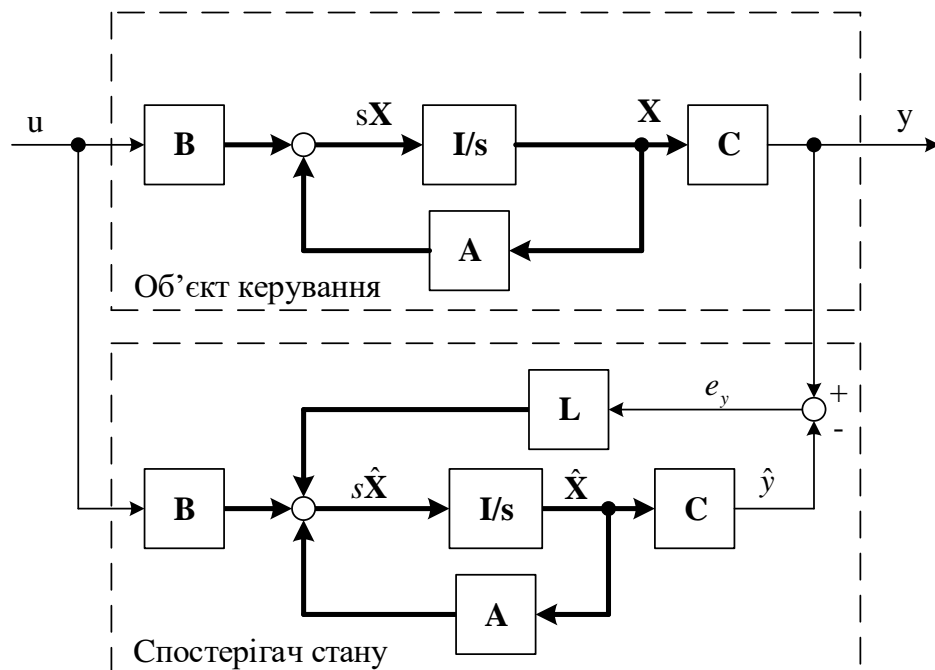


Рисунок 1.1 – Структурна схема ОК зі спостерігачем стану

З рис. 1.1 випливає, що рівняння спостерігача мають наступний вигляд:

$$s\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}e_y = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}). \quad (1.4)$$

Похибка оцінювання вектору стану дорівнює:

$$s\tilde{\mathbf{X}} = s\mathbf{X} - s\hat{\mathbf{X}}. \quad (1.5)$$

Підставляючи в (1.4) рівняння (1.1) та рівняння (1.4) отримуємо:

$$s\tilde{\mathbf{X}} = [\mathbf{A} - \mathbf{LC}]\tilde{\mathbf{X}}. \quad (1.6)$$

Асимптотична стійкість спостерігача стану Люенбергера доведена [7, 8], тобто помилка оцінювання при $t \rightarrow \infty$ прагне до нуля. Синтез СС полягає у виборі коефіцієнтів коригувальних зворотних зв'язків \mathbf{L} [6]. Відповідне рівнянню (1.6) характеристичне рівняння має вигляд:

$$\det[s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{LC}] = 0. \quad (1.7)$$

Відповідним вибором матриці \mathbf{L} можна забезпечити в рівнянні (1.7) стійкі корні (тобто корні, що знаходяться усередині одиничної окружності) [9]. На практиці матрицю \mathbf{L} вибирають таким чином, щоб характеристичне рівняння (1.7) дорівнювало бажаному характеристичному поліному (ХП) [6, 10].

Недоліком описаних вище еквівалентного та редукованого спостерігачів є наявність статичних помилок оцінювання змінних стану ОК, в умовах дії на нього невимірних збурень. Для ліквідації цього недоліку запропоновані еквівалентні та редуковані СС з додатковими інтеграторами, що відновлюють, поряд зі змінними стану, постійні зовнішні сигнали. Такі спостерігачі деякі автори називають розширеними [6].

1.5.2 Фільтри Калмана

Серед інших методів оцінювання невимірюваних сигналів відзначимо оптимальні [9-11] спостерігачі стану.

Раніше було прийняте припущення про те, що в ОК точно можна виміряти вхідний сигнал u та вихідний y . Однак, на практиці це далеко не завжди можна здійснити. Оскільки, в ОК майже завжди будуть присутні

завади: \mathbf{W} – в каналі керування та \mathbf{V} – в каналі вимірювання. Тоді система рівнянь (1.1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} s\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u + \mathbf{W}, \\ y = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{V}. \end{cases} \quad (1.8)$$

Спостерігачі стану, що враховують завади \mathbf{W} та \mathbf{V} , звуть оптимальними спостерігачами чи фільтрами Калмана [10, 11]. В таких спостерігачах матрицю \mathbf{L} вибирають з умови максимального заглушення завад.

1.5.3 Спостерігачі стану з адаптацією до параметрів об'єкта

Суттєвим недоліком всіх розглянутих СС є чутливість до зміни параметрів об'єкта керування. При розбіжності параметрів ОК та спостерігача, останній, в силу своєї асимптотичної стійкості, точно відновить вектор перемінних стану, але тільки після затухання перехідних процесів в об'єкті. Так, наприклад, невірне значення моменту інерції в моделі об'єкта регулювання призводить до помилкової роботи спостерігача, що відновлює момент статичного опору на валу двигуна, на ділянках розгону та гальмування [12].

Адаптація СС може відбуватися в самому спостерігачі [11] чи виконуватись за допомогою окремого ідентифікуючого пристрою [13]. Під адаптацією (самоналаштуванням) будемо розуміти властивість системи до самозміни у відповідності до зміни оточуючих умов чи зміни параметрів системи та її внутрішніх зв'язків [11]. СС, який сам проводить адаптацію, дозволяє одночасно відновлювати вектор перемінних стану та параметри об'єкта, але при відсутності зовнішніх впливів на ОК. Проаналізуємо можливість застосування обох варіантів адаптації СС для задачі ідентифікації моменту статичного опору в умовах невизначеності моменту інерції приводу.

Припустимо, що електромагнітний момент та кутову швидкість двигуна можна точно виміряти. Раніше відмічалось, що момент статичного опору є невимірним зовнішнім збуренням ОК, яке може змінюватись. Тому для поставленої задачі неможна використовувати СС, який сам проводить

адаптацію. В цьому випадку краще проводити ідентифікацію невизначеностей механічної частини приводу в дві окремі задачі: перша – ідентифікація моменту інерції приводу ідентифікуючим пристроєм; друга – спостереження моменту статичного опору за допомогою СС.

Висновки до розділу

У першому розділі бакалаврської роботи обгрунтовано, що ідентифікація параметрів електроприводу та спостереження моменту статичного збурення під час роботи є актуальною задачею.

Для виконання поставленої задачі у подальшому слід:

1. Синтезувати спостерігач моменту статичного опору, як невимірюваного збурення, та дослідити ефективність його застосування у системі підпорядкованого регулювання швидкістю двигуна постійного струму.
2. Виконати ідентифікацію градієнтним методом електромагнітної та електромеханічної сталих часу двигуна постійного струму із використанням дійсного значення струму якоря.
3. Виконати ідентифікацію градієнтним методом електромагнітної та електромеханічної сталих часу двигуна постійного струму без використання дійсного значення струму якоря.
4. Застосувати оцінені параметри для поліпшення якості системи керування.
5. Дослідити систему підпорядкованого регулювання із використанням компенсації моменту статичного опору та із застосуванням у регуляторах ідентифікованих значень методом математичного моделювання.

2 СПОСТЕРЕЖЕННЯ НЕВИМІРЮВАНОВОГО ЗБУРЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Одним із перших питань, які слід вирішити задля отримання законів ідентифікації параметрів та структурної схеми спостерігача навантаження, є наведення математичного опису двигуна постійного струму та розробка системи підпорядкованого регулювання. Для кращої практичності застосування досвіду у подальшому та для наочності отриманих результатів слушним буде реалізація систем у відносних одиницях.

У другому розділі бакалаврського проекту буде наведено математичних опис і структурну схему двигуна постійного струму із керуванням у силовому колі, розроблено систему підпорядкованого регулювання. На основі синтезованої системи буде виконано синтез спостерігача навантаження і подальше порівняння доречності використання компенсації спостереженого струму навантаження із ПІ-регулятором швидкості.

2.1 Математичний опис і структурна схема двигуна постійного струму із керуванням у колі якоря

Щоб здійснити ідентифікацію параметрів чи спостереження сигналів будь-якого об'єкта слід володіти його структурною схемою. Відповідно до поставленого завдання спостереження та ідентифікація буде проводитись на двигуні постійного струму, математична модель якого є найпростішою серед моделей електричних машин [14]. Вона представлена системою алгебраїчних та диференціальних рівнянь:

$$U_a(t) - E_o(t) = \Delta U_a(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

$$M(t) = cI_a(t), \quad (2.2)$$

$$M(t) - M_c(t) = M_j(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

$$E_o(t) = c\omega(t), \quad (2.4)$$

де $U_a(t), I_a(t)$ – напруга та струм якоря (нім. *Anker* – «якір»);
 $\Delta U_a(t)$ – падіння напруги у якірному колі;
 R_a, L_a – опір та індуктивність якірного кола;
 $E_\partial(t), \omega$ – електрорушійна сила та кутова швидкість двигуна;
 $M(t), M_c(t), M_j(t)$ – електромагнітний момент двигуна, момент статичного опору та динамічний момент;
 J, c – момент інерції та коефіцієнт потоку двигуна.

Із рівнянь (2.1) та (2.3) шляхом переходу до операторного вигляду і математичного перетворення отримано передатні функції якірного кола та механічної частини двигуна:

$$W_a(s) = \frac{I_a(s)}{U_a(s) - E_\partial(s)} = \frac{1/R_a}{T_a s + 1}, \quad (2.5)$$

де $T_a = L_a/R_a$ – електромагнітна стала часу якірного кола,

$$W_m(s) = \frac{\omega(s)}{M(s) - M_c(s)} = \frac{R_a}{T_m c^2 s}, \quad (2.6)$$

де $T_m = \frac{JR_a}{c^2}$ – електромеханічна стала часу якірного кола.

Для зосередження уваги на методі ідентифікації, а також для спрощення моделі та зменшення кількості параметрів виконують нормування, тобто перехід від абсолютних одиниць до відносних.

У якості базових величин обирають значення регульованих сигналів у характерних статичних режимах, причому усі базові величини повинні бути пов'язані між собою достатньо простими рівняннями статики. Базовими обрано наступні величини:

$$\omega_6 = \omega_0, \quad U_{аб} = E_{дб} = U_{ан} = c\omega_0, \quad I_{аб} = I_{кз} = \frac{U_{ан}}{R_a}, \quad M_6 = M_{кз} = cI_{кз}. \quad (2.7)$$

При цьому утворюється така система відносних одиниць:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \bar{U} = \frac{U}{U_{ан}}, \quad \bar{E}_д = \frac{E_д}{U_{ан}}, \quad \bar{I}_я = \frac{I_a}{I_{кз}}, \quad \bar{M} = \frac{M}{M_{кз}}. \quad (2.8)$$

Передавальні функції у відносних одиницях розраховано за формулою[15]:

$$\bar{W}(s) = W(s) \frac{u}{y}. \quad (2.9)$$

Відповідно до неї знаходимо:

$$\bar{W}_{IM}(s) = c \frac{I_{K3}}{M_{K3}} = 1, \quad (2.10)$$

$$\bar{W}_{\omega E}(s) = W_{\omega E}(s) = c \frac{\omega_0}{E_{d0}} = 1, \quad (2.11)$$

$$\bar{W}_a(s) = W_a(s) \frac{U_{aH}}{I_{K3}} = \frac{1/R_a}{T_a s + 1}, \quad R_a = \frac{1}{T_a s + 1}, \quad (2.12)$$

$$\bar{W}_M(s) = W_M(s) \frac{M_{K3}}{\omega_0} = \frac{M_{K3}}{J \omega_0 s} = \frac{1}{T_M s}. \quad (2.13)$$

В (2.13)

$$T_M = \frac{J \omega_0}{M_{K3}} = \frac{J R_a}{c^2} \quad (2.14)$$

– електромеханічна стала часу двигуна, яка дорівнює часу, за який двигун розігнався б до швидкості ідеального холостого ходу, якщо б до нього було прикладено момент короткого замикання [16].

Особливістю такої схеми є те, що струм та момент подані в долях струму та моменту КЗ. Якщо необхідно задавати статичний момент та візуалізувати струм і момент в долях номінальних значень, то перехід від системи в.о. до системи а.о. здійснюємо за формулою:

$$\bar{I}_a = \bar{i}_a \gamma_{K3}, \quad \bar{m}_L = \frac{\bar{M}_L}{\gamma_{K3}}, \quad (2.15)$$

де $\gamma_{K3} = \frac{M_{K3}}{M_H} = \frac{I_{K3}}{I_{aH}}$ – кратність моменту (або струму) короткого замикання,

яка визначає жорсткість механічної характеристики.

На основі рівнянь (2.1) – (2.6), (2.9) та (2.15) будується структурна схема двигуна постійного струму, яка представлена на рисунку 2.1.

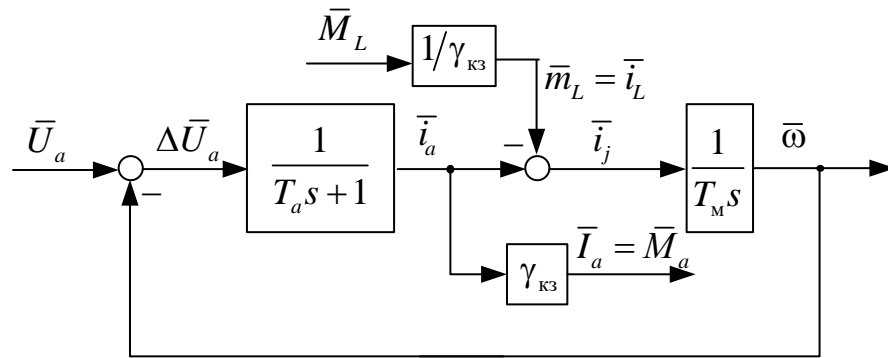


Рисунок 2.1 – Структурна схема двигуна постійного струму у відносних одиницях

Так як у роботі використовуватиметься ДПС лише у відносних одиницях та для уникнення нагромадження знаками відносних одиниць у подальшому нехтуємо. Також дійсне значення струму якоря \bar{i}_a називатимемо i_{ist} .

Із огляду на об'єкт керування (рис.2.1) існує три невизначеності – електромагнітна T_a та електромеханічна T_M сталі часу і невідоме збурення i_L (нім. *Last* – «навантаження»). У подальшому приймемо наступні параметри ДПС: електромагнітна стала часу $T_a = 0.04 \text{ с}$ та електромеханічна $T_M = 0.1 \text{ с}$.

2.2 Розробка системи підпорядкованого керування двигуном постійного струму

Система підпорядкованого регулювання (СПР) характеризується послідовним включенням регуляторів, кількість яких відповідає кількості регульованих параметрів. [17] Узагальнена структурна схема СПР представлена на рисунку 2.2.

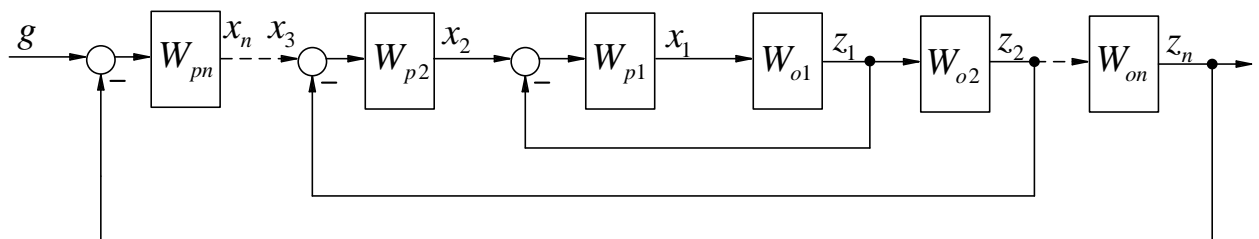


Рисунок 2.2 – Узагальнена структурна схема системи підпорядкованого регулювання

Зі схеми видно, що вихідний сигнал кожного наступного регулятора x_{n+1} є завданням для попереднього регулятора і відповідно попереднього контуру регулювання[17]. Головною перевагою СПР є можливість простими засобами досягнути обмеження регульованих координат системи. Для цього достатньо на відповідному рівні обмежити завдання для цієї координати, що найчастіше реалізується шляхом обмеження вихідного сигналу регулятора x_{n+1} [17].

Відповідно до методики синтезу регуляторів у СПР першочергово розглядається самий внутрішній контур, при чому усі зворотні зв'язки(в даному випадку за ЕДС) не беруться до уваги. Із рисунку 2.1 видно, що внутрішнім контуром є контур регулювання струму із об'єктом регулювання $\frac{1}{T_a s + 1}$. Так як модель 2.1 ідеалізована і не враховує інерційність вентилів, слід додати проміжну ланку $\frac{1}{T_\mu s + 1}$, яка характеризуватиме вплив перетворювача.

Регулятор струму включатиме у себе компенсацію об'єкта регулювання та інтегральний регулятор. Мала інерційність T_μ компенсуватись не буде.

Вона обирається із урахуванням частоти мережі і кількості фаз перетворювача.

$$T_\mu = \frac{1}{f m} = \frac{1}{50 \cdot 6} = \frac{1}{300} = 3.3 \text{ (мс)}, \quad (2.16)$$

де f – частота мережі;

m – кількість фаз перетворювача.

Між задатчиком інтенсивності та власне об'єктом керування додано аперіодичну ланку зі сталою часу $T_\mu = 5 \text{ мс}$. Ця ланка вносить вплив неідеальності вентилів перетворювача.

Передатна функція регулятора струму (РС, Strom – нім. «струм») запишеться у вигляді:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_a s + 1}{T_s p}. \quad (2.17)$$

Для аналізу утвореного контуру, який включає у себе регулятор, об'єкт та некомпенсовану ланку, слід володіти передатною функцією замкнутої системи(контуру). Згідно із структурою 2.7 передатна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{раз}(p) = \frac{T_a p + 1}{T_s p} \cdot \frac{1}{T_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{T_a p + 1} = \frac{1}{T_s p (T_\mu p + 1)}. \quad (2.18)$$

Передатна функція замкнутої системи запишеться як:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)} = \frac{\frac{1}{T_s p (T_\mu p + 1)}}{1 + \frac{1}{T_s p (T_\mu p + 1)}} = \frac{1}{T_s T_\mu s^2 + T_s s + 1}. \quad (2.19)$$

Існує багато можливостей вибору коефіцієнтів налаштування регуляторів. Виконаємо налаштування на технічний оптимум, що характеризується перерегулюванням у 4.3 %. Відповідно до модульного оптимуму, на якість перехідних процесів найбільше впливають перші два коефіцієнти характеристичного полінома передатної функції γ_1 та γ_2 , коли γ_1 – коефіцієнт характеристичного поліному при найвищому степені. Наслідком із цього принципу [6] є наступне співвідношення:

$$\gamma_1^2 - 2\gamma_2 = 0. \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} T_s^2 &= 2T_s T_\mu, \\ T_s &= 2T_\mu. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Для подальшого розгляду у контурі струму відкидається другий порядок і передатна функція замкненого контуру приймає вигляд:

$$W_{зам.С}(p) = \frac{1}{T_s T_\mu s^2 + T_s s + 1} \approx \frac{1}{T_s s + 1}. \quad (2.22)$$

Синтез регулятора швидкості проводиться аналогічно, причому некомпенсованою малою інерційністю виступає T_u .

Передатна функція регулятора швидкості (РШ) запишеться у вигляді:

$$W_{PII}(p) = \frac{T_M \cancel{R}}{T_\omega \cancel{R}} = \frac{T_M}{T_\omega}. \quad (2.23)$$

Отриманий регулятор швидкості є пропорційною ланкою і дуже простий у реалізації. Згідно із структурою 2.7 передатна функція розімкнутої системи регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{раз.ш}(p) = \frac{\cancel{T_M}}{T_\omega} \cdot \frac{1}{T_S p + 1} \cdot \frac{1}{\cancel{T_M} p} = \frac{1}{T_\omega p (T_S p + 1)}. \quad (2.24)$$

Ідентично попередньому контуру виконаємо налаштування контуру керування швидкістю на модульний оптимум і визначимо коефіцієнт регулятора швидкості як

$$T_\omega = 2T_S. \quad (2.25)$$

Отримана система має вигляд:

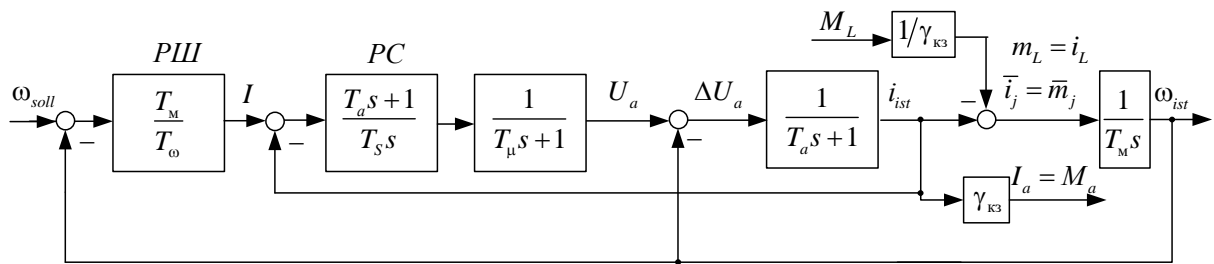


Рисунок 2.3 – Система підпорядкованого регулювання двигуном постійного струму

У регулятори струму та швидкості входять ідентифіковані сталі часу T_a та T_M . Для формування правильної керуючої дії вкрай необхідно мати достовірні на момент формування керуючого впливу параметри об'єкта керування. В інакшому випадку забезпечення якості керування із бажаною точністю досягти неможливо.

Для зосередження уваги на ідентифікації електромеханічної сталої часу буде згорнуто схему СПР, а саме представлено контур струму однією передатною функцією.

Спрощення схеми 2.3 реалізується шляхом згортання ланок РС

$$W_{PC}(p) = \frac{T_a s + 1}{T_s s}, \quad \text{перетворювача} \quad W_\mu(p) = \frac{1}{T_\mu s + 1} \quad \text{та} \quad \text{якірного кола}$$

$$W_a(p) = \frac{1}{T_a s + 1} \quad \text{в одну, нехтуючи при цьому зворотнім зв'язком. Для}$$

спрощення подальших обрахунків відкидається вищий порядок, тоді вираз контуру струму має вигляд:

$$W_S(p) = W_{PC}(p) \cdot W_\mu(p) \cdot W_a(p) = \frac{1}{T_\mu p(T_s s + 1)} \approx \frac{1}{T_s s + 1}. \quad (2.26)$$

Відповідно до (2.26) структурна схема системи матиме вигляд:

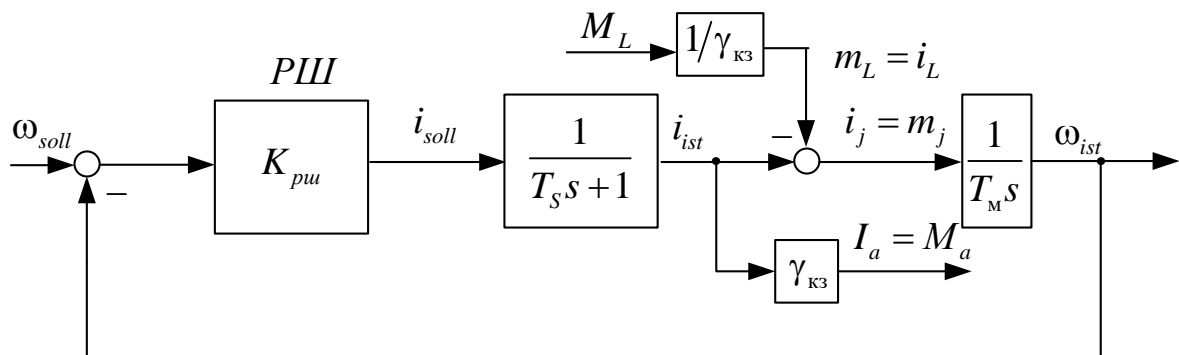


Рисунок 2.4 – Спрощена структура системи підпорядкованого регулювання двигуном постійного струму

На рисунку 2.4 прийнято наступні позначення:

- ω_{soll} – завдання якірної напруги відповідно до бажаної (нім. *soll* – «необхідна») кутової швидкості;
- i_{soll} – падіння напруги в якірному колі відповідно до бажаного струму;
- i_{ist} – дійсне (нім. *ist* – «існуюче») значення якірного струму;
- i_L – струм навантаження;
- ω_{ist} – дійсне значення кутової швидкості;

2.3 Розробка спостерігача стану

На основі спрощеної структурної схеми СПР (рис.2.4) виконаємо спостереження моменту статичного опору, виміряти величину якого є досить складна задача.

Нехай будуть відомими точно електромеханічна стала часу T_M та стала часу контуру струму T_S , якірний струм i_{ist} та кутова швидкість ω_{ist} доступними до виміру. Відтворюючи ланку механічної частини, до якої заведено струм силового кола, можна оцінити значення кутової швидкості $\hat{\omega}_{ist}$. Це справедливо лише тоді, коли динамічний струм i_j рівний дійсному i_{ist} , що можливо лише при відсутності навантаження.

Річ у тому, що в об'єкті керування до ланки механічної частини прикладено динамічний струм, який є різницею дійсного струму та струму навантаження. Щоб досягти астатизму, слід сформувати сигнал корекції, який буде пропорційним струму навантаження i_L .

Оскільки кутова швидкість доступна до виміру, такий сигнал можливо отримати шляхом визначення різниці дійсної кутової швидкості ω_{ist} та оціненої $\hat{\omega}_{ist}$.

$$e_{\omega} = \omega_{ist} - \hat{\omega}_{ist}. \quad (2.27)$$

Сигнал помилки e_{ω} із виразу (2.27) слугуватиме сигналом корекції в моделі оцінювання кутової швидкості. Для фільтрації впливу на модель електромеханічної частини, сигнал помилки кутової швидкості e_{ω} пропускаємо через фільтр $W(s) = \frac{K_B}{T_B s + 1}$, у якому T_B обирається відповідно до частоти завад та підсилювальний коефіцієнт K_B оптимізується у подальшому згідно із виглядом бажаного характеристичного поліному.

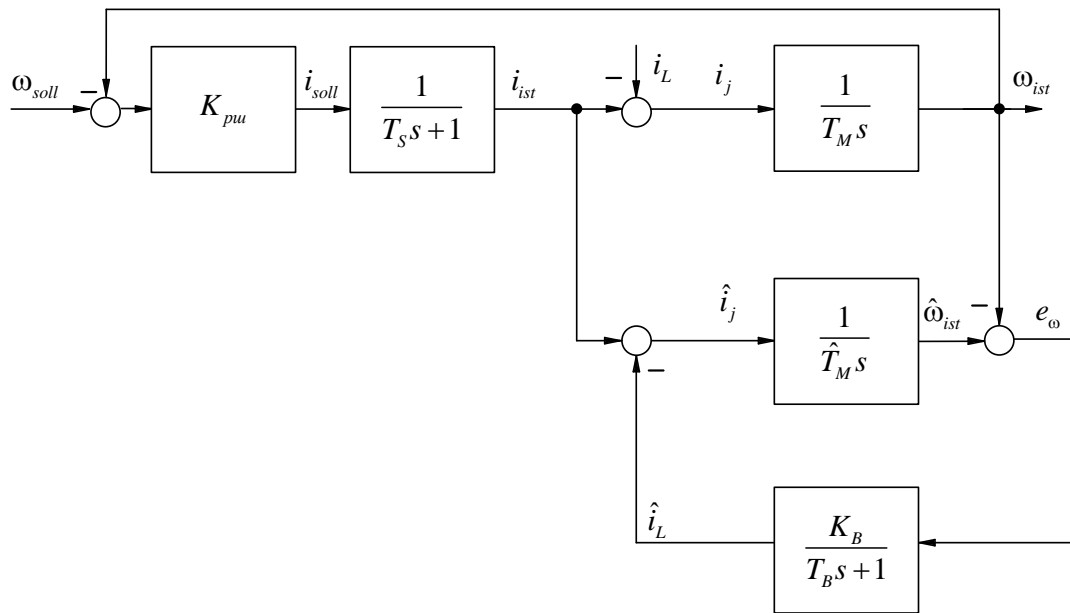


Рисунок 2.5 – Структурна схема СПР із оцінюванням статичного опору

Визначимо передатну функцію замкнутого контуру, що включає у себе ланку моделі електромеханічної частини та фільтр:

$$W_{13} = \frac{1}{\frac{T_B T_M}{K_B} s^2 + \frac{T_M}{K_B} s + 1}. \quad (2.28)$$

Відповідно до принципу подвійних відношень, на якість перехідних процесів найбільше впливають перші два коефіцієнти характеристичного полінома передатної функції γ_1 та γ_2 , коли γ_1 – коефіцієнт характеристичного поліному при найвищому степені. Наслідком із цього принципу [6] є наступне співвідношення (модульний оптимум):

$$\gamma_1^2 - 2\gamma_2 = 0. \quad (2.29)$$

Відповідно до виразу (2.28) отримаємо:

$$\left(\frac{T_M}{K_B} \right)^2 = 2 \left(\frac{T_B T_M}{K_B} \right) \quad (2.30)$$

Тоді коефіцієнт підсилення регулятора спостерігача швидкості визначається як:

$$K_B = \frac{T_M}{2T_B}. \quad (2.31)$$

Стала часу спостерігача має бути малою величиною, щоб спостерігач не вносив змін у роботу системи, тому сталу часу спостерігача T_B обрано на рівні $T_B = 0.001 \text{ с}$.

Дослідимо систему із синтезованим спостерігачем. Так як сигнал спостереженого моменту статичного опору поки що не заведений як зворотний зв'язок до регулятора, ніяких змін до об'єкту процес спостереження не вносить.

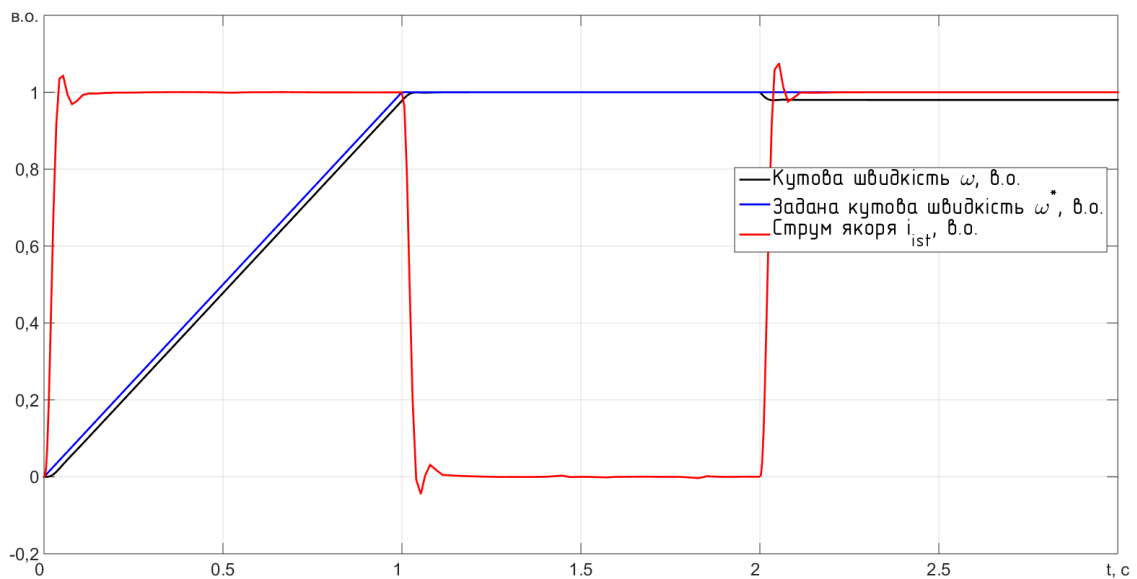


Рисунок 2.6 – Вигляд переходних процесів струму та кутової швидкості при спостерігачі невимірюваного збурення

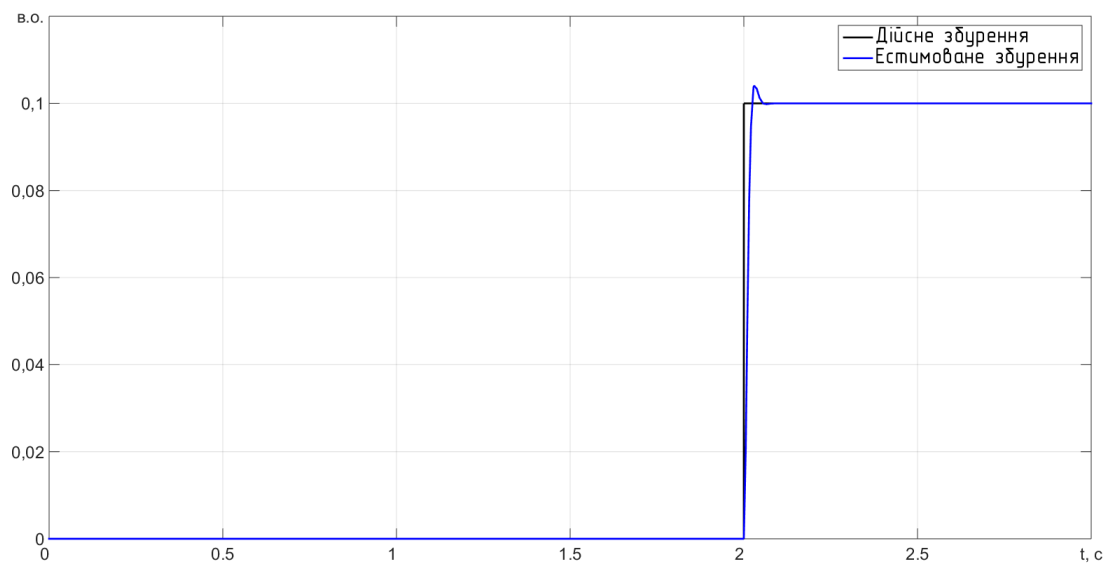


Рисунок 2.7 – Вигляд процесу спостереження невимірюваного збурення при налаштуванні на модульний оптимум

Із перехідного процесу, зображеного на рисунку 2.7, видно, що перерегулювання складає 4.3 %, що свідчить про правильне налаштування на модульний оптимум.

2.4 Порівняння використання ПІ-регулятора швидкості та компенсації спостереженого моменту статичного опору

Вимогою до багатьох електроприводів є асимптотичне відпрацювання завдання кутової швидкості [18]. Статизм при прикладенні навантаження можливо прибрати багатьма шляхами[19], одним із них є використання ПІ-регулятора швидкості чи компенсації сигналу навантаження. Оскільки частиною теми бакалаврської роботи є спостереження сигналів, зокрема невимірюваного сигналу збурення, дослідимо систему із компенсацією навантаження та систему із ПІ-регулятором.

Система із ПІ-регулятором утворюється шляхом додавання інтегральної компоненти в регулятор швидкості. Вона показує такі результати:

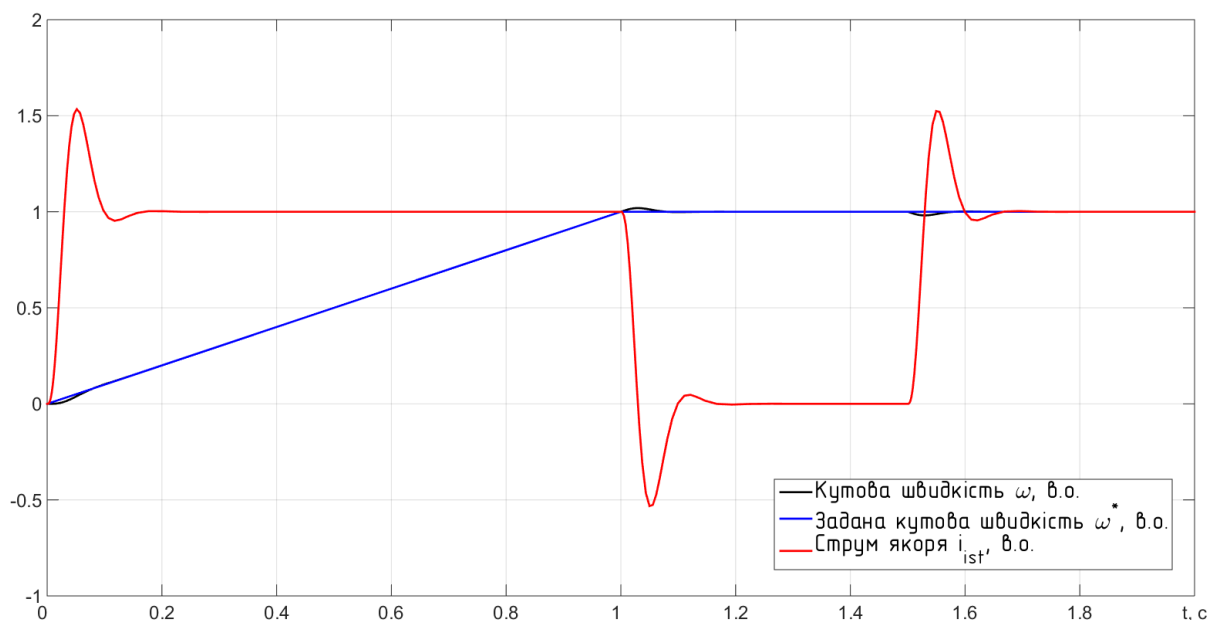


Рисунок 2.8 – Вигляд перехідних процесів струму та кутової швидкості при використанні у СПР ПІ-регулятора швидкості

Як видно із рисунку 2.8 інтегральна складова регулятора забезпечує відсутність просадки по швидкості в усталеному режимі. На ділянці розгону

інтегральна компонента прагне також звести до нуля помилку відпрацювання завдання кутової швидкості, але на початку та в кінці розгону вона все ж присутня.

Для компенсації спостереженого моменту статичного опору його слід додати до сигналу завдання швидкості, що є виходом регулятора швидкості та виходом регулятора струму.

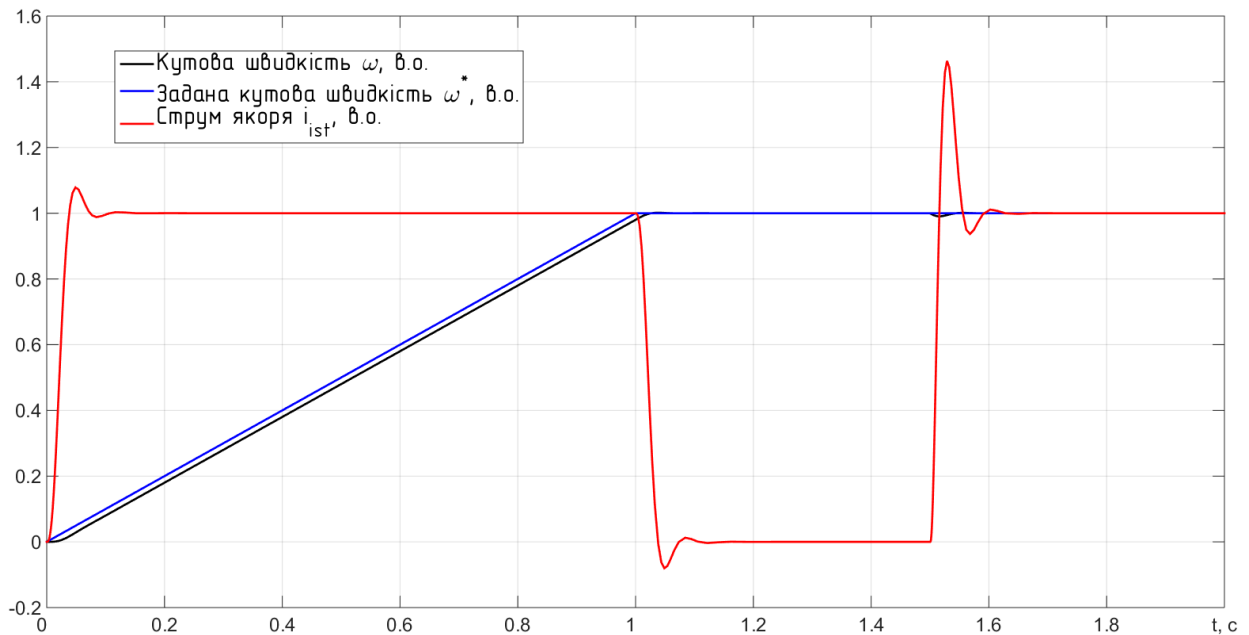


Рисунок 2.9 – Вигляд переходних процесів струму та кутової швидкості при використанні у СПР компенсації збурення

Система підпорядкованого регулювання при компенсації збурення є швидкодіючою за систему із ПІ-регулятором швидкості. На ділянці розгону компенсація не працює і тому помилка залишається та є сталою.

Для кращого порівняння даних систем у момент прикладання навантаження побудовано рисунки 2.10 та 2.11.

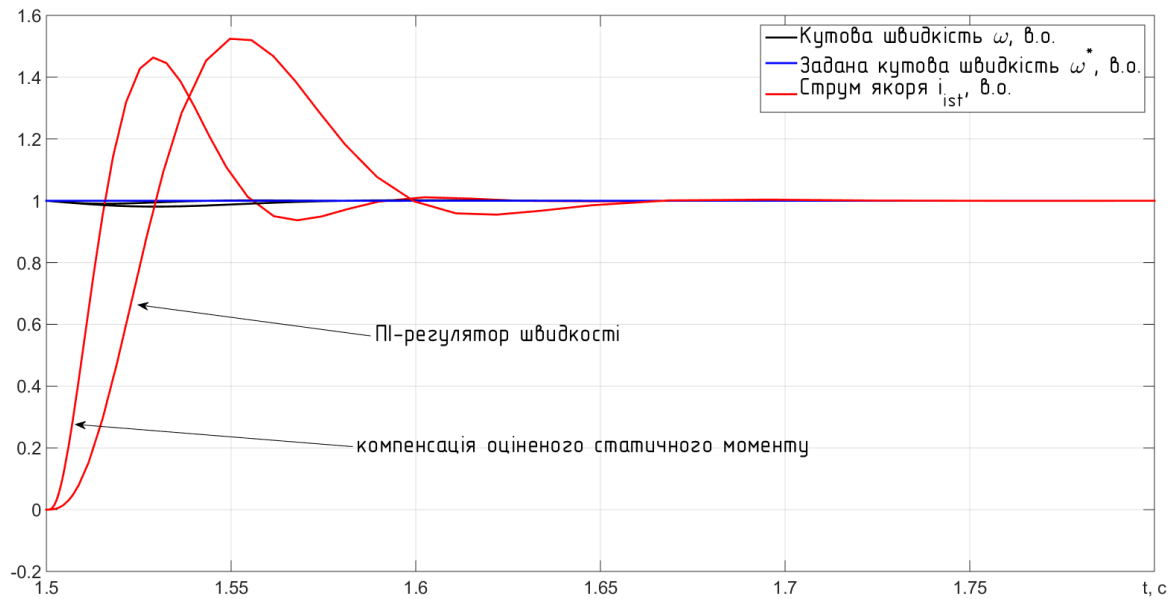


Рисунок 2.10 – Вигляд перехідних процесів кутової швидкості та струму при порівнянні СПР із ПІ-регулятором та СПР із компенсацією збурення

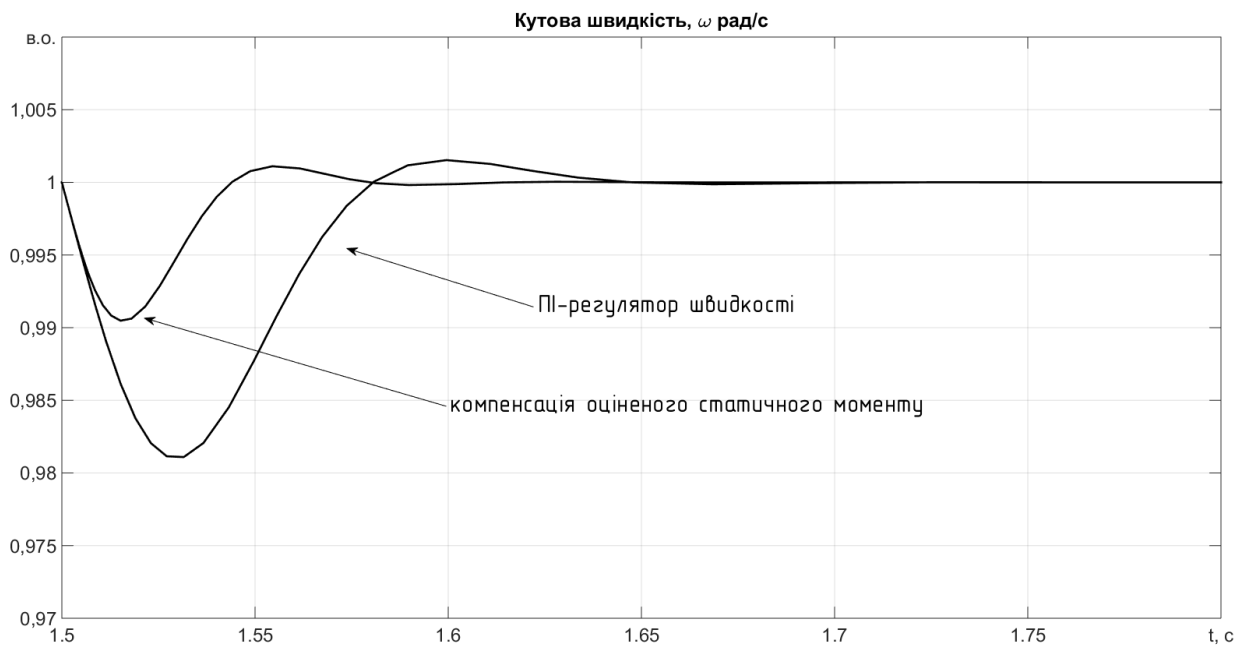


Рисунок 2.11 – Вигляд перехідних процесів кутової швидкості при порівнянні СПР із ПІ-регулятором та СПР із компенсацією збурення

Із результатів математичного моделювання слідує(рис. 2.10), що при компенсації оціненого моменту статичного опору максимальне значення динамічного струму менше, ніж у системі із використанням ПІ-регулятора швидкості. Перехідний процес відновлення швидкості у системі із компенсацією оціненого збурення триває швидше.

Таблиця 2.1 – Показники якості СПР при компенсації статизму системою із ПІ-регулятором швидкості та системою із компенсацією оціненого моменту статичного опору

Тип системи	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання струму, %	Динамічна просадка швидкості, %
Система із компенсацією статичного моменту	0.08	46	0.95
Система із ПІ-регулятором швидкості	0.19	52.5	1.89

Моделюванням доведено (рис.2.10-2.11, табл.2.1), що система із компенсацією спостереженого моменту статичного опору має кращі показники якості, ніж система із використанням ПІ-регулятора швидкості.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано оцінювання моменту статичного опору, як сигналу невимірюваного збурення. Встановлено, що

1. Швидкодія спостерігача стану залежить від вибору сталої часу спостерігача T_B .
2. Якість оцінювання визначає коефіцієнт K_B .
3. Система підпорядкованого регулювання із компенсацією спостереженого моменту статичного опору працює швидше та має кращу якість перехідних процесів, ніж система підпорядкованого регулювання швидкості із ПІ-регулятором швидкості.

3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ГРАДІЄНТНИМ МЕТОДОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ДІЙСНОГО СТРУМУ ЯКОРЯ

Досягнення підвищення якості перехідних процесів та зниження втрат під час роботи електричного приводу реалізується шляхом використання у регуляторах СПР ідентифікованих параметрів об'єкта, які під час роботи можуть змінюватись.

Для цього слід спершу визначити сутність методу, відповідно до якого буде реалізована ідентифікація. Після чого визначаються невідомі сигнали та синтезуються блоки ідентифікації параметрів, що вміщують у себе усі необхідні алгоритми.

Отриману систему ідентифікації доречно дослідити на декількох дослідах, які показують необхідність ідентифікації та залежність швидкодії ідентифікації від збільшення різниці початкового наближення та дійсного значення.

3.1 Сутність градієнтного методу

Нехай розглядається лінійний, контрольований та придатний до спостереження процес, який описується передатною функцією:

$$G_P(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + \dots + a_ns^n}. \quad (3.1)$$

Методи ідентифікації за принципом порівняння моделей, до яких належить градієнтний метод, використовують ідентичну до досліджуваного об'єкта структуру, але параметри передатної функції є оціненими значеннями:

$$G_M(s) = \frac{\hat{y}(s)}{u(s)} = \frac{B_M(s)}{A_M(s)} = \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1s + \dots + \hat{b}_ms^m}{1 + \hat{a}_1s + \dots + \hat{a}_ns^n}. \quad (3.2)$$

Різниця вихідних сигналів досліджуваного процесу $y(s)$ і моделі спостереження $\hat{y}(s)$ формує помилку $e(s)$, яка визначається виразом (3.3) і структурна схема якої представлена на рисунку 3.1.

$$e(s) = y(s) - \hat{y}(s) = y(s) - \frac{B_M(s)}{A_M(s)} u(s). \quad (3.3)$$

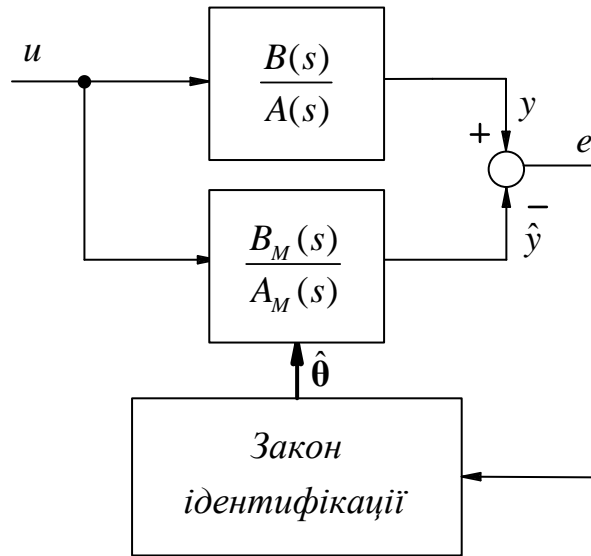


Рисунок 3.1 – Структура системи ідентифікації методом порівняння моделей за сигналом вихідної помилки

Завданням ідентифікації є зведення різниці між оціненим та дійсним значеннями $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ до мінімального рівня. Для цього у блоці «закон ідентифікації» на основі сигналу вихідної помилки $e(t)$ формується такий вектор $\hat{\theta}$, який задає найбільш близькі до оцінюваних коефіцієнти передатної функції спостерігача і тим самим мінімізує розбіжність між моделлю спостерігача і об'єктом дослідження.

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_n \quad \hat{b}_0, \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m]. \quad (3.4)$$

В законі ідентифікації закладається критерій якості V , яким можуть слугувати різні залежності, наприклад квадратична (3.5) або модульна (3.6):

$$V = f(\theta, e) = e^2(t), \quad (3.5)$$

$$V = f(\theta, e) = |e(t)|. \quad (3.6)$$

Мінімізація помилки досягається шляхом знаходження таких параметрів моделі спостереження, при яких

$$\frac{dV}{d\theta} = 0, \quad (3.7)$$

Критерій якості може розглядатись як миттєве значення:

$$V_1 = f(\mathbf{\theta}, e(t)), \quad (3.8)$$

або як функціонал(інтегральний показник якості):

$$V_2 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} f(\mathbf{\theta}, e(t)) dt. \quad (3.9)$$

Базові методи ідентифікації посиляються [20] на те, що у початковий момент відоме початкове наближення оцінюваного параметру.

Суть градієнтного метода полягає у визначенні градієнту кожної величини $\Delta \hat{\theta}_i$ і подальшої корекції наявного наближеного значення відповідного параметру на величину обрахованого градієнту. Тоді кожний параметр моделі підлаштовується пропорційно до градієнту критерія якості:

$$\Delta \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \hat{\theta}_{i-1} = -k_i \text{grad}_{\theta_i} V = -k_i \frac{\partial V}{\partial \theta_i}, \quad (3.10)$$

де $k_i > 0$ підлаштовуваний коефіцієнт підсилення.

При використанні квадратичного критерія якості (3.5) як функціоналу (3.9) отримано:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -k_i \frac{\partial}{\partial \theta_i} e^2(\mathbf{\theta}, t) = -2k_i e(\mathbf{\theta}, t) \frac{\partial e(\mathbf{\theta}, t)}{\partial \theta_i}. \quad (3.11)$$

Із виразу (3.11) випливає, що швидкість зміни оцінюваного параметра θ_i пропорційна добутку сигналу помилки $e(\mathbf{\theta}, t)$ та чутливості сигналу помилки $\frac{\partial e(\mathbf{\theta}, t)}{\partial \theta_i}$. При інтегруванні виразу (3.11) визначено нелінійну залежність сигналу підстроювання моделі від сигналу помилки:

$$\hat{\theta}_i(t_1) = -2k_i \int_0^{t_1} e(\mathbf{\theta}, t) \frac{\partial e(\mathbf{\theta}, t)}{\partial \theta_i} dt. \quad (3.12)$$

У виразі (3.12) невідомою складовою залишається чутливість. Для знаходження чутливості параметра виконано диференціювання виразу помилки (3.3).

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_i} = \frac{\partial (y - \hat{y})}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \theta_i}. \quad (3.13)$$

Підстановкою (3.13) у (3.2) отримано:

$$\frac{\partial \hat{y}(s)}{\partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} G_M(s) u(s). \quad (3.14)$$

Для визначення чутливості параметру вхідний сигнал пропускається через відповідну модель чутливості $\partial G_M / \partial \theta_i$, яка є унікальною для кожного параметру ідентифікації.

Отже, застосування градієнтного методу передбачає:

1. Побудову моделі оцінюваної частини об'єкту керування (3.2), яка є структурно аналогічною досліджуваному процесу (3.1), але синтезована із використанням ідентифікованих параметрів. (Ідентифіковані параметри у початковий момент рівні наближенню, яким задаються перед початком ідентифікації.)
2. Якщо на об'єкт діє невимірне збурення, то модель слід перетворити на спостерігач стану Люенбергера шляхом заведення похибки оцінювання на інтегратори моделі.
3. Знаходження похибок оцінювання сигналів процесу (3.3);
4. Виведення передатної функції моделі чутливості за (3.14);
5. Обрахунку градієнту ідентифікованого параметру та відповідно до (3.12);
6. Обчислення ідентифікованого параметру на основі градієнту із п.5 та попереднього значення параметру.

3.2 Ідентифікація електромагнітної сталої часу

Для ідентифікації електромагнітної сталої часу слід отримати значення помилки оцінювання струму, оціненого моделлю, параметром якої слугує ідентифікована стала часу. Для цього побудовано модель якірного кола, яка являє собою аперіодичну ланку першого порядку з ідентифікованою електромагнітною сталою часу \hat{T}_a . Вхідним сигналом моделі якірного струму

є падіння напруги в якірному колі. Помилка оцінювання знаходиться як різниця виміряного значення струму якоря та оцінюваного.

Для ідентифікації електромеханічної та електромагнітної сталих часу згідно із виразом (3.12) слід визначити чутливість помилки спостереження струму $\partial e_i / \partial \hat{T}_a$. Помилка спостереження струму може бути визначена як:

$$e_i = i_{ist} - \hat{i}_{ist} = \Delta \bar{U}_a \frac{1}{T_a s + 1} - \Delta \bar{U}_a \frac{1}{\hat{T}_a s + 1}. \quad (3.15)$$

Чутливість помилки струму знаходиться шляхом диференціювання сигналу струмової помилки відносно оціненої електромагнітної сталої часу:

$$\frac{\partial e_i}{\partial \hat{T}_a} = -\Delta \bar{U}_a \frac{\partial}{\partial \hat{T}_a} \frac{1}{\hat{T}_a s + 1} = \Delta \bar{U}_a \frac{s}{(\hat{T}_a s + 1)^2} = \hat{i}_{ist} \frac{s}{\hat{T}_a s + 1}. \quad (3.16)$$

У виразі (3.15) змінна \hat{T}_a є змінною у часі величиною і має «заводитись» до аперіодичної ланки як зовнішній сигнал. Враючи це структурна схема реалізації обрахунку помилки оцінювання струму (3.15) та чутливості помилки струму за виразом (3.16) має вигляд:

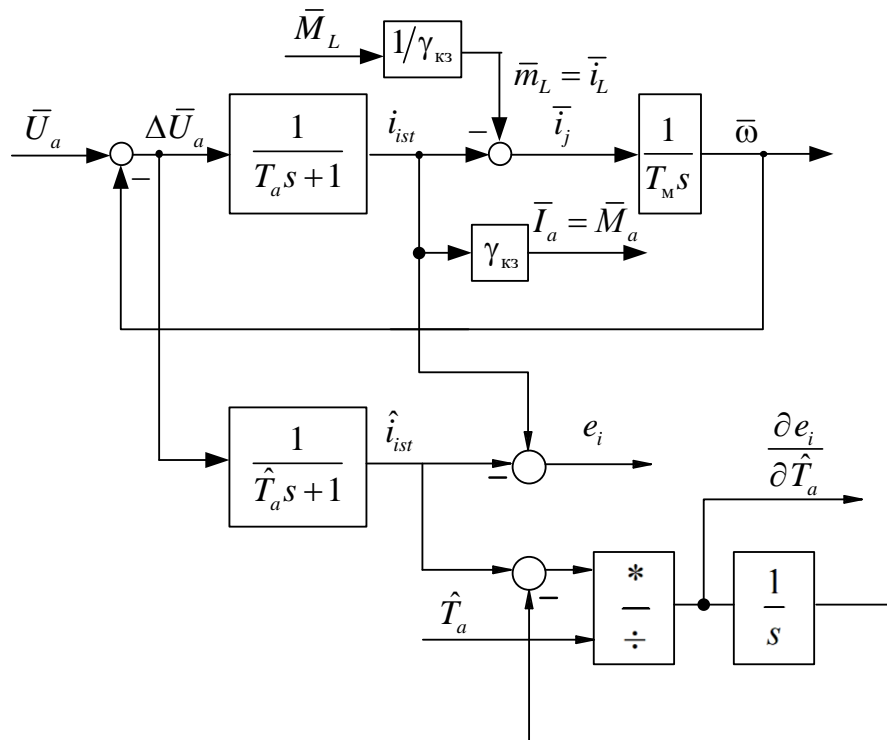


Рисунок 3.2 – Структурна схема обрахунку помилки оцінювання струму та чутливості вихідної помилки струмового кола

Відповідно до виразів (2.1)-(2.26), (3.15)-(3.16) можна побудувати модель (рис. 3.3) у середовищі MATLAB, на якість буде проведено дослідження працездатності отриманого закону ідентифікації, вплив початкових умов, параметрів тестового сигналу та коефіцієнта підсилення у законі ідентифікації.

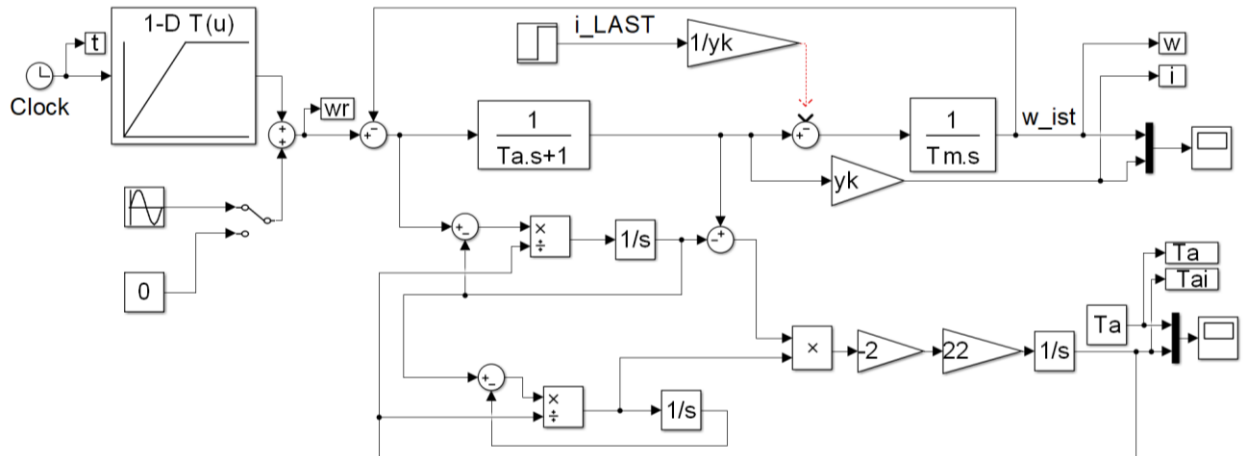


Рисунок 3.3 – Вигляд моделі дослідження ідентифікації електромеханічної сталої часу

Дослідним шляхом визначено, що найкращу швидкодію має система при частоті тестового сигналу 44 Гц із амплітудою 2 % [21]. При меншій амплітуді тестового сигналу ідентифікація перестає працювати, оскільки додані коливання є недостатніми для формування чутливості, яка входить до закону ідентифікації. При такому тестовому сигналі найкраща ідентифікація досягається при коефіцієнті закону ідентифікації 22.

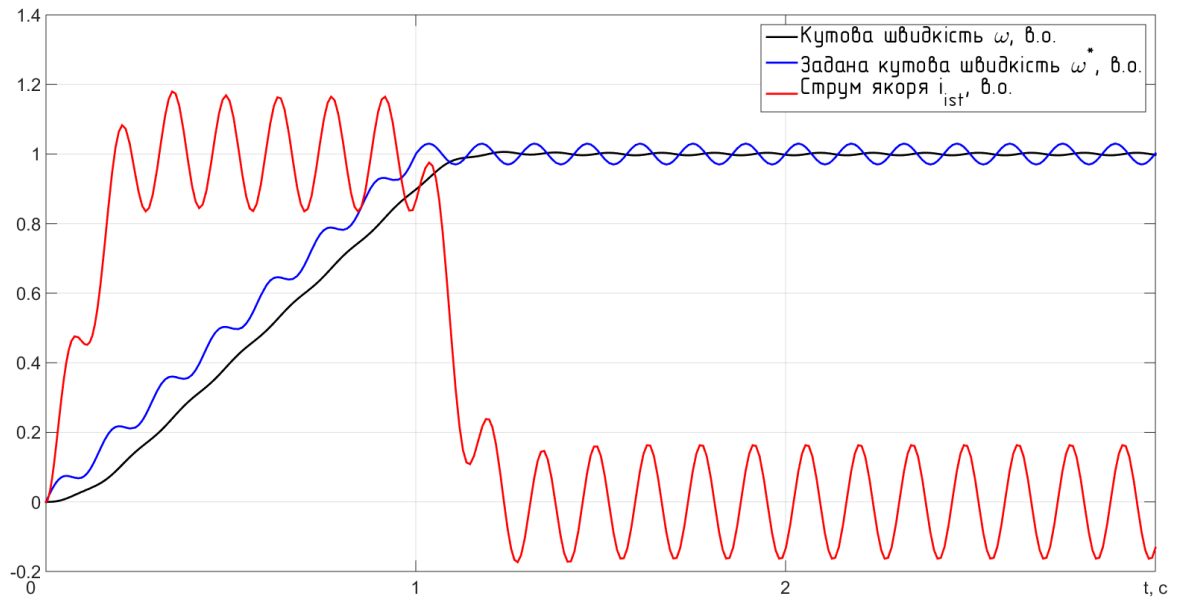


Рисунок 3.4 – Вигляд перехідних процесів струму та кутової швидкості при ідентифікації електромагнітної сталої часу

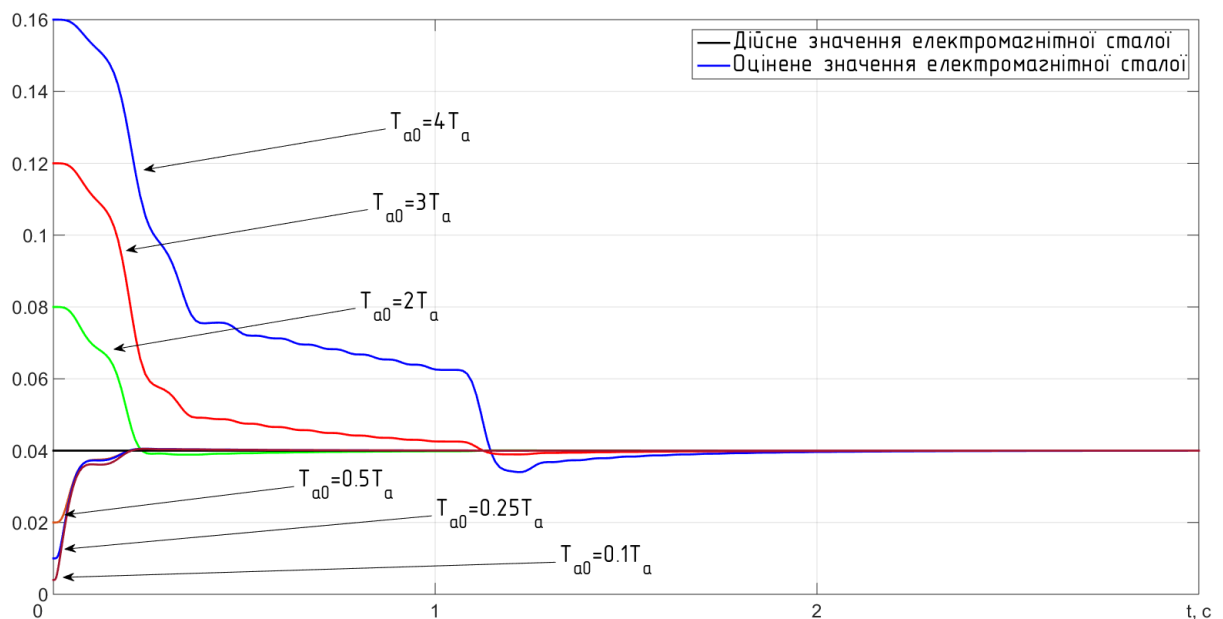


Рисунок 3.5 – Вигляд ідентифікації електромагнітної сталої часу двигуна постійного струму при різних початкових умовах

Із результатів дослідження (рис.3.4, 3.5) слідує, що ідентифікація електромагнітної сталої часу проводиться успішно. При збільшенні різниці між істинним значенням та початковим наближенням ідентифікованої сталої часу збільшується час ідентифікації, коли істинне значення є меншим за початкове наближення. У випадку, коли початкове наближення менше за

істинне значення ідентифікація триває 0.3 с і не змінюється в залежності від початкових умов.

3.3 Ідентифікація електромеханічної сталої часу двигуна

Здійснення спостереження за механічною частиною об'єкта керування відбувається за допомогою моделі, яка містить інтегровальну ланку із сталою часу \hat{T}_M . Вхідним сигналом ланки є струм якорного кола, при чому вплив навантаження не враховується. Щоб виконати коректне оцінювання кутової швидкості, слід врахувати вплив збурення додавши спостерігач навантаження. Він представляє собою аперіодичну ланку першого порядку із сталою часу T_B (нім. *Beobachter* – «спостерігач») та підсилюючим коефіцієнтом K_B . Для погашення статичної помилки швидкості буде заведений сигнал оціненого навантаження, але із подальшим обмеженням отриманого сумарного максимального значення.

На рисунку 3.6 представлений об'єкт дослідження із спостерігачами струму, швидкості та навантаження.

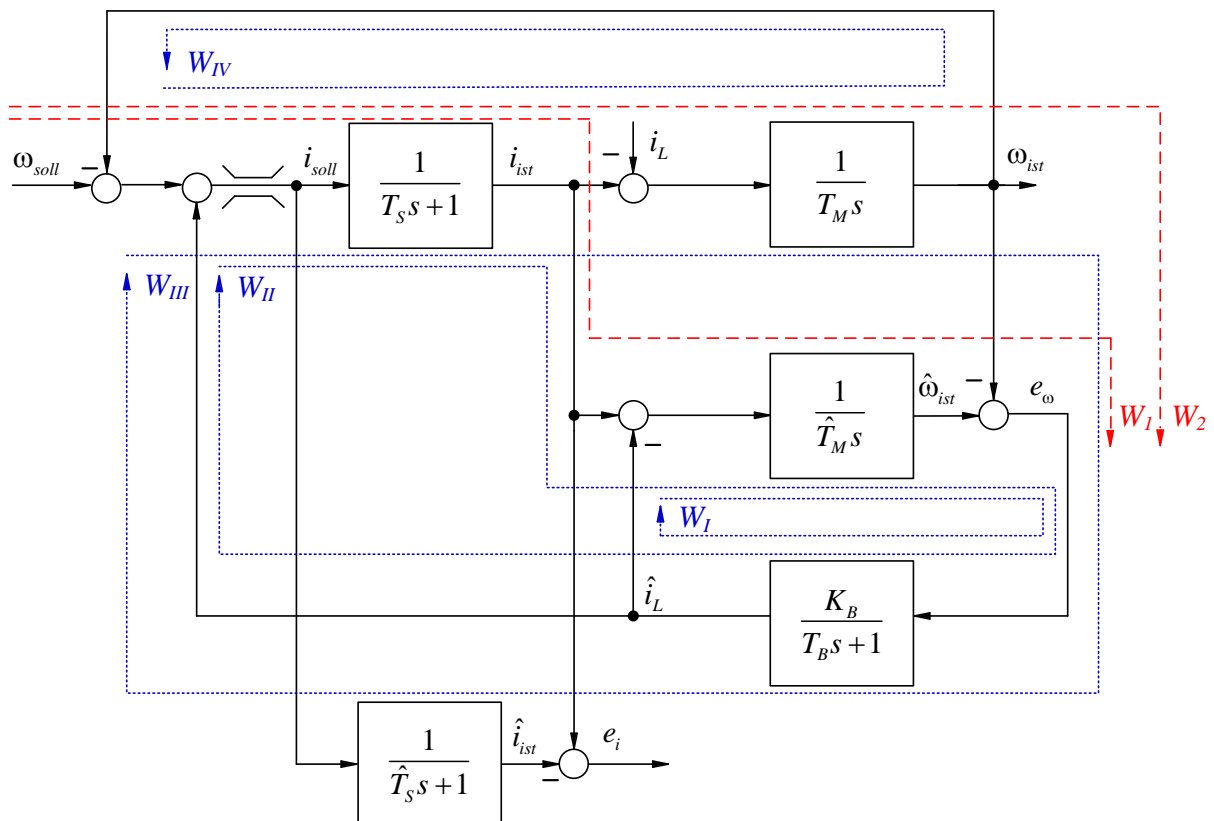


Рисунок 3.6 – Структурна схема двигуна постійного струму, спостерігачів струму та швидкості із нанесеними незалежними контурами та двома прямими шляхами від сигналу завдання до значення помилки швидкості

На рисунку 3.6 прийнято наступні позначення:

- $\hat{\omega}_{ist}, \hat{i}_{ist}$ – оцінені спостерігачами кутова швидкість та якірний струм;
- e_{ω}, e_i – помилки оцінювання швидкості та струму.

Щоб визначити чутливість сигналу помилки спостереження швидкості $\frac{\partial e_{\omega}}{\partial \hat{T}_M}$, слід вивести передатну функцію цієї помилки e_{ω} від сигналу завдання швидкості ω_{soll} .

Досліджувана структурна схема є складною, тому розрахунок передатної функції чутливості сигналу помилки спостереження швидкості $\frac{\partial e_{\omega}}{\partial \hat{T}_M}$ приведений у додатку А.

Результуюча передатна функція чутливості сигналу помилки спостереження швидкості $\frac{\partial e_{\omega}}{\partial \hat{T}_M}$ має вигляд:

$$\frac{\partial e_{\omega}}{\partial \hat{T}_M} = -\omega_{ist} \frac{\frac{1}{\hat{T}_M} s^2 + \frac{1}{T_B \hat{T}_M} s}{s^2 + \frac{1}{T_B} s + \frac{1}{2T_B^2}}. \quad (3.17)$$

Вираз знаходження чутливості вихідного сигналу помилки оцінювання швидкості (3.17) є простим у реалізації. Структурна схема реалізації представлена на рисунку 3.7.

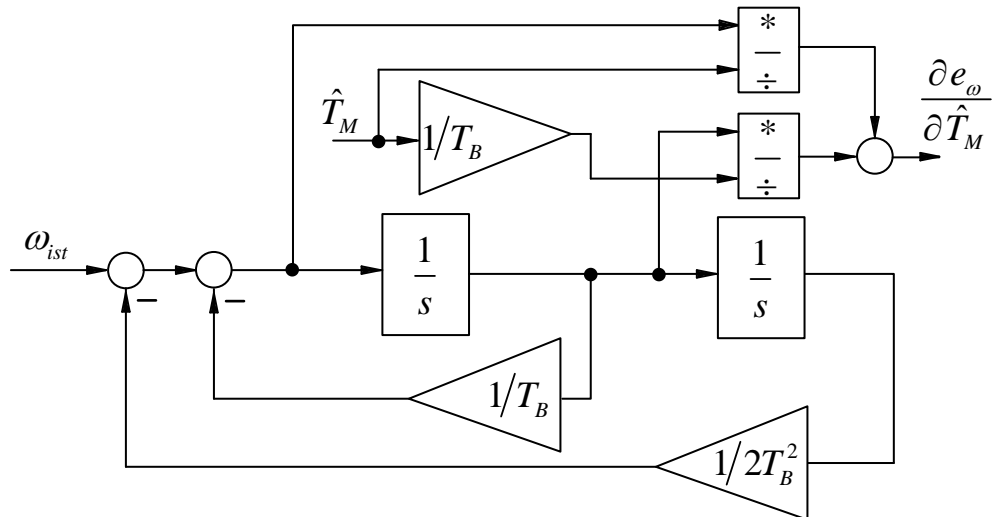


Рисунок 3.7 – Структурна схема блоку чутливості вихідної помилки механічної частини

Для дослідження правильності виводу формули чутливості (3.17) та спостерігача невідомого збурення \hat{i}_L (2.31) побудовано модель у середовищі MATLAB.

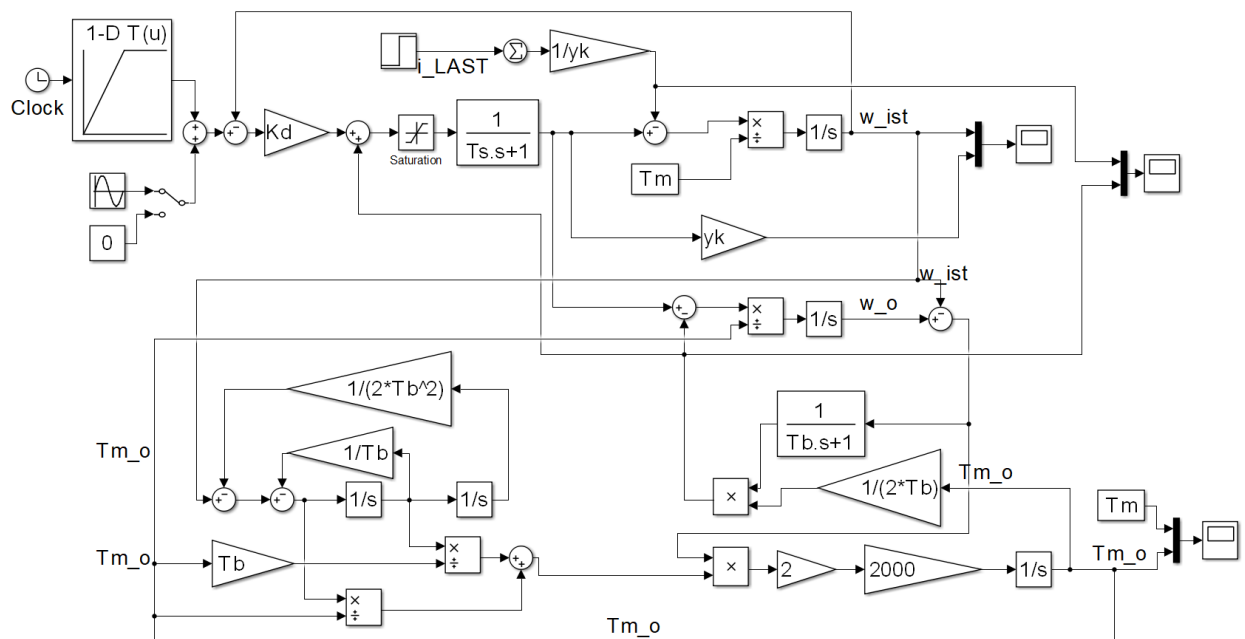


Рисунок 3.8 – Вигляд моделі дослідження ідентифікації електромагнітної сталої часу

Виконаємо ідентифікацію електромеханічної сталої часу при розгоні, роботі на холостому ході та при прикладенні навантаження.

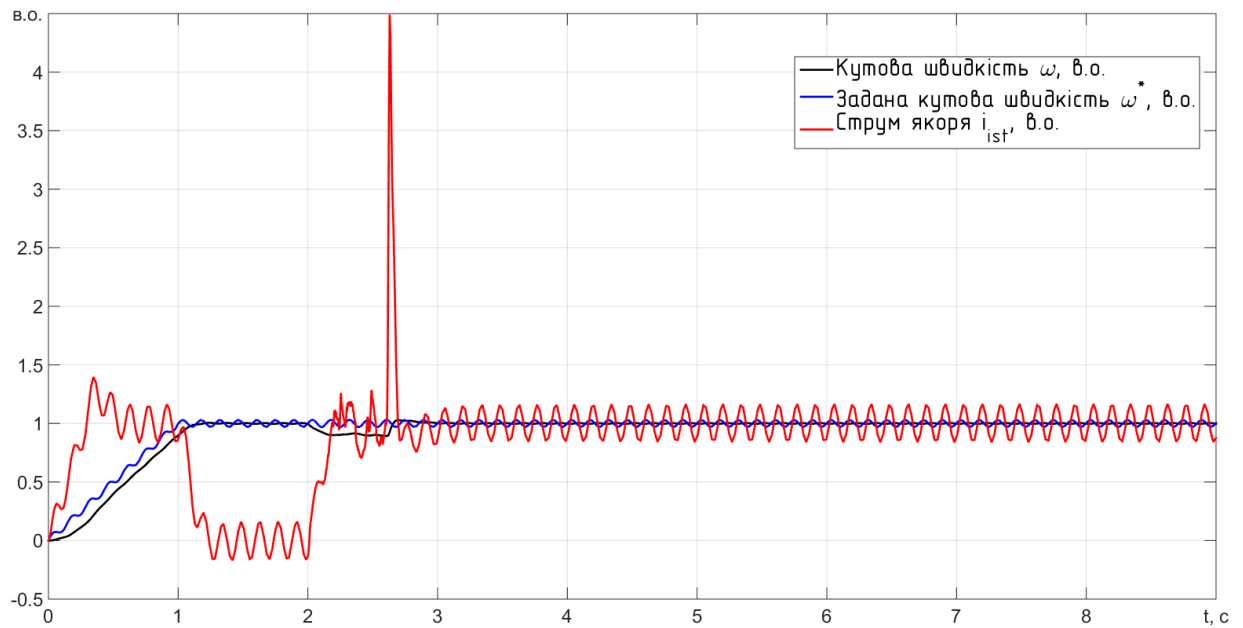


Рисунок 3.9 – Вигляд перехідних процесів струму та кутової швидкості при оцінюванні електромеханічної сталої часу

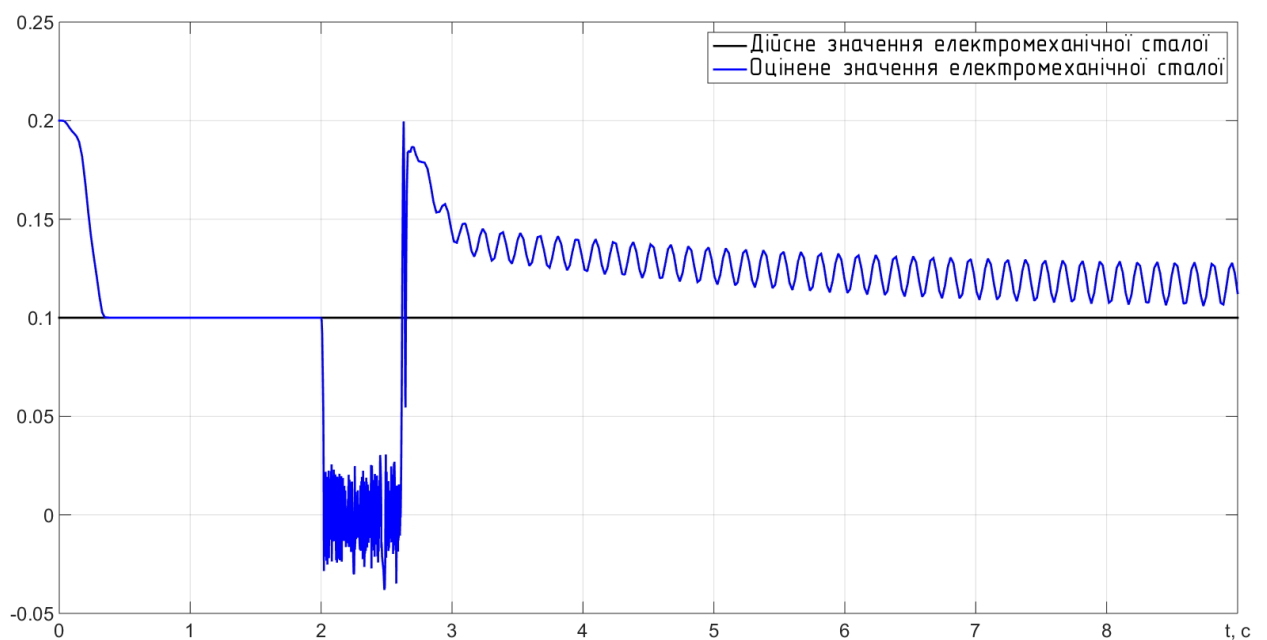


Рисунок 3.10 – Процес ідентифікації електромеханічної сталої часу ДПС

Як видно із рисунку 3.10, синтезована система працює правильно лише при ненавантаженій електричній машині. При прикладеному збуренні виникають незатухаючі коливання, які породжуються у спостерігачі навантаження. Щоб уникнути цього, слід внести змін до спостерігача збурення.

Причиною коливань (рис.3.10) є те, що за прикладеного навантаження сигнал помилки оцінювання швидкості, який заводиться до блоку «Закон ідентифікації», стає високочастотним сигналом, який сформовано із запізненням. Запізнення виникає, тому що до моделі оцінки швидкості заводиться ідентифікована стала часу, у ідентифікації якої приймає участь інтегратор. При використанні у алгоритмі сигналу помилки, який немає запізнення, можна уникнути помилки ідентифікації.

Сигнал без запізнення можна отримати безпосередньо із регулятора спостерігача $\frac{1}{T_B s + 1}$.

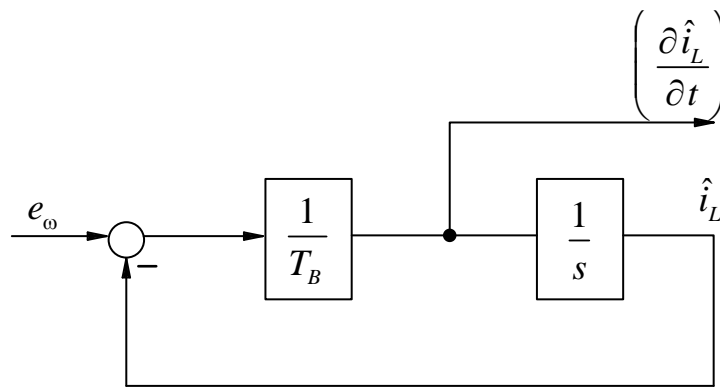


Рисунок 3.11 – Структурна схема регулятора спостерігача

На рисунку 3.11 сигнал $\left(\frac{\partial \hat{i}_L}{\partial t} \right)$ містить необхідний сигнал помилки без запізнення, який буде використано замість e_ω відповідно до схеми 3.6.

Він не містить затримки, тому що є похідною від оцінюваного моменту і у виразі його визначення не присутній інтегратор. Під час моделювання було встановлено, що під час прикладення моменту навантаження похідна від оцінюваного моменту навантаження $\left(\frac{\partial \hat{i}_L}{\partial t} \right)$ (на рисунку 3.11) має значні викиди, що було очікуваним. Щоб система через таку коливальність не втратила стійкість та працездатність, слід обмежити формуючий викиди сигнал помилки оцінювання кутової швидкості. Величина обмеження

обирається експериментально відповідно до амплітуди та частоти тестового сигналу, а також до величини ідентифікованого параметру T_M .

Вихідний сигнал моделі чутливості слід пропустити також через відповідний фільтр $\frac{s}{T_B s + 1}$, оскільки отримана чутливість також створює значні неконтрольовані коливання, які виводять систему із стану рівноваги.

Експериментально встановлено, що покращити швидкість ідентифікації можна за рахунок підвищення коефіцієнту k у виразі (3.12) із додатковим встановленням фільтру після операції мультиплікації у блоці «Закон ідентифікації».

Відповідно до описаних вище змін модель прийме вигляд:

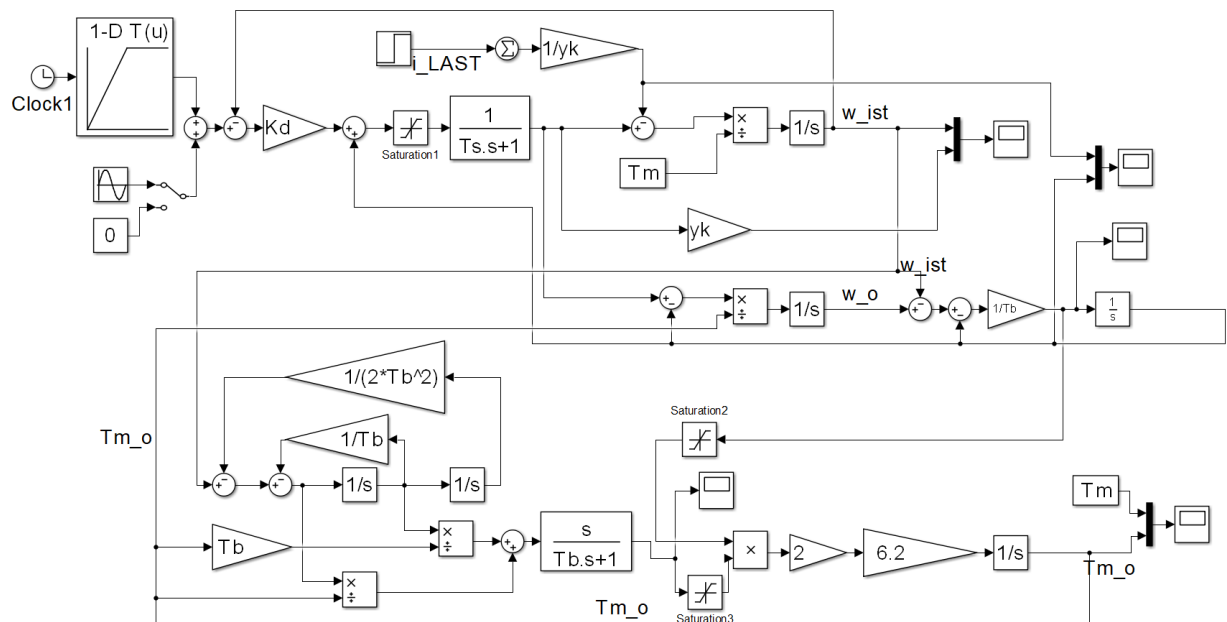


Рисунок 3.12 – Вигляд моделі ідентифікації електромеханічної сталої часу із покращеним спостерігачем

Проведемо аналогічний попередньому тест на моделі із покращеним спостерігачем навантаження(рис.3.12).

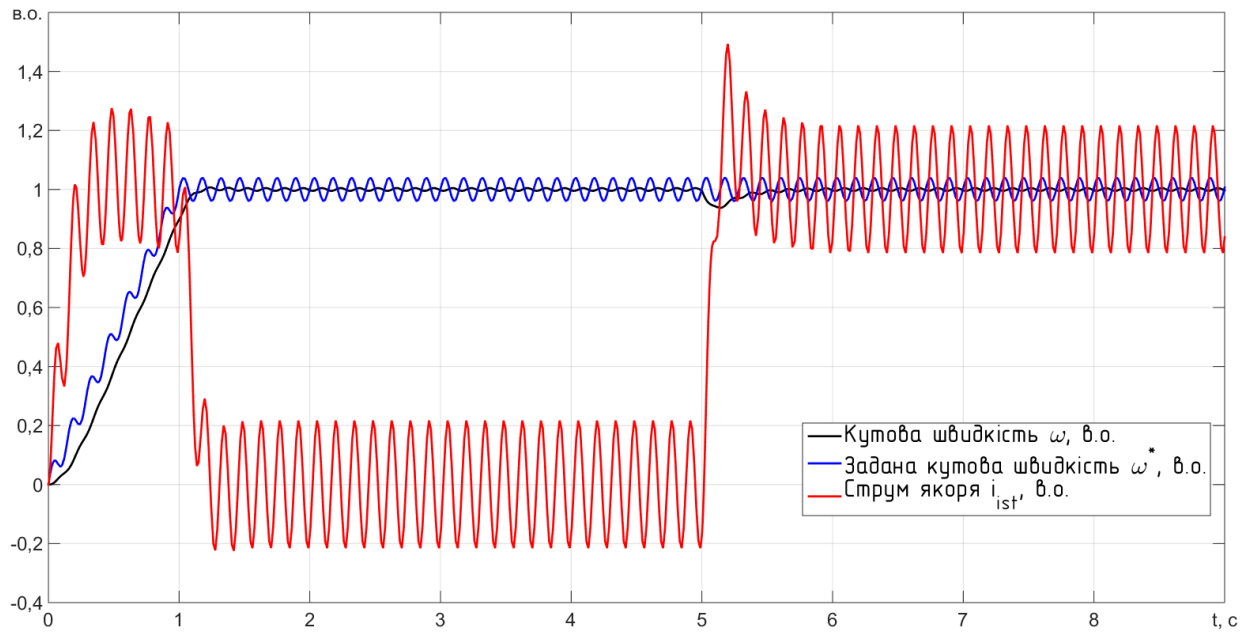


Рисунок 3.13 – Вигляд перехідних процесів струму та кутової швидкості при оцінюванні електромеханічної сталої часу покращеним спостерігачем

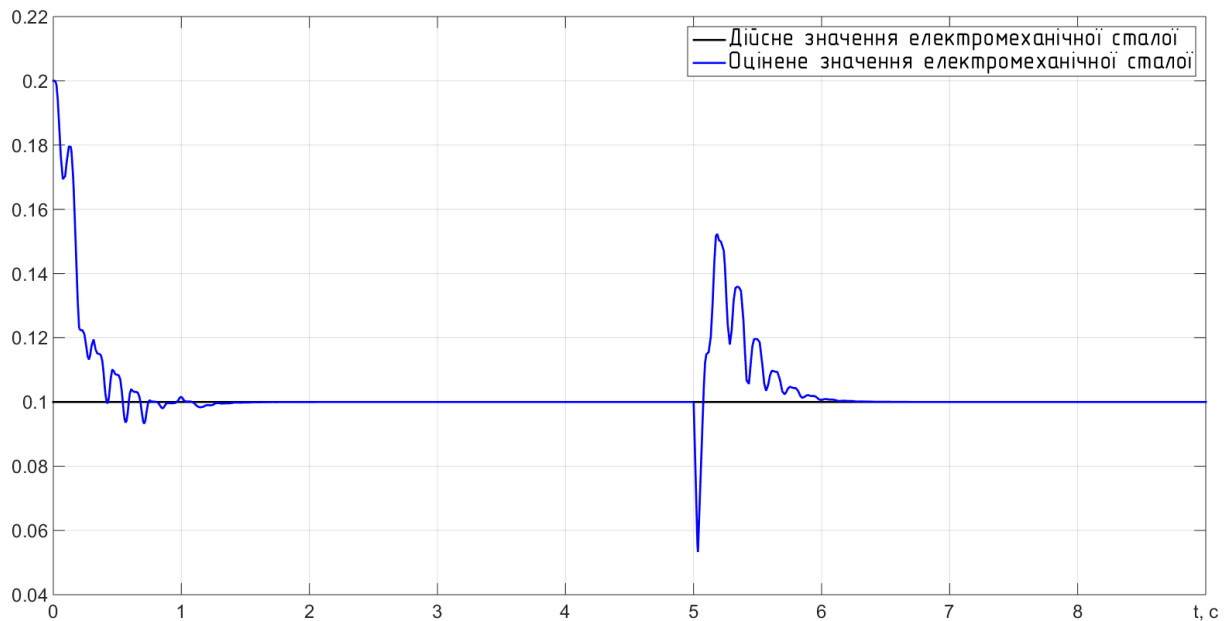


Рисунок 3.14 – Процес ідентифікації електромеханічної сталої часу ДПС при використанні покращеного спостерігача

Отримані результати(рис.3.13-3.14) свідчать про те, що отриманий спостерігач придатний до роботи із навантаженням. Перехідний процес

ідентифікації триває близько однієї секунди, після чого ідентифіковане значення абсолютно точно рівне дійсному.

3.4 Дослідження моделюванням системи параметричної ідентифікації із використанням дійсного значення струму якоря

На основі рівнянь (2.10)-(2.13), (3.12), (3.16)-(3.17) зібрано загальну систему підпорядкованого регулювання двигуна постійного струму із використанням у регуляторах ідентифікованих сталих часу об'єкта. Вона представлена на рисунку 3.15.

Для здійснення ідентифікації до входу системи слід штучно додати тестовий сигнал. Це необхідно, оскільки градієнтний метод базується на знаходженні чутливості помилок, що включає у себе диференціювання. У разі відсутності незначної коливальності процесу похідні будуть рівні нулю і визначення чутливості помилок не буде відбуватись. В якості тестового використовується синусоїдальний високочастотний сигнал.

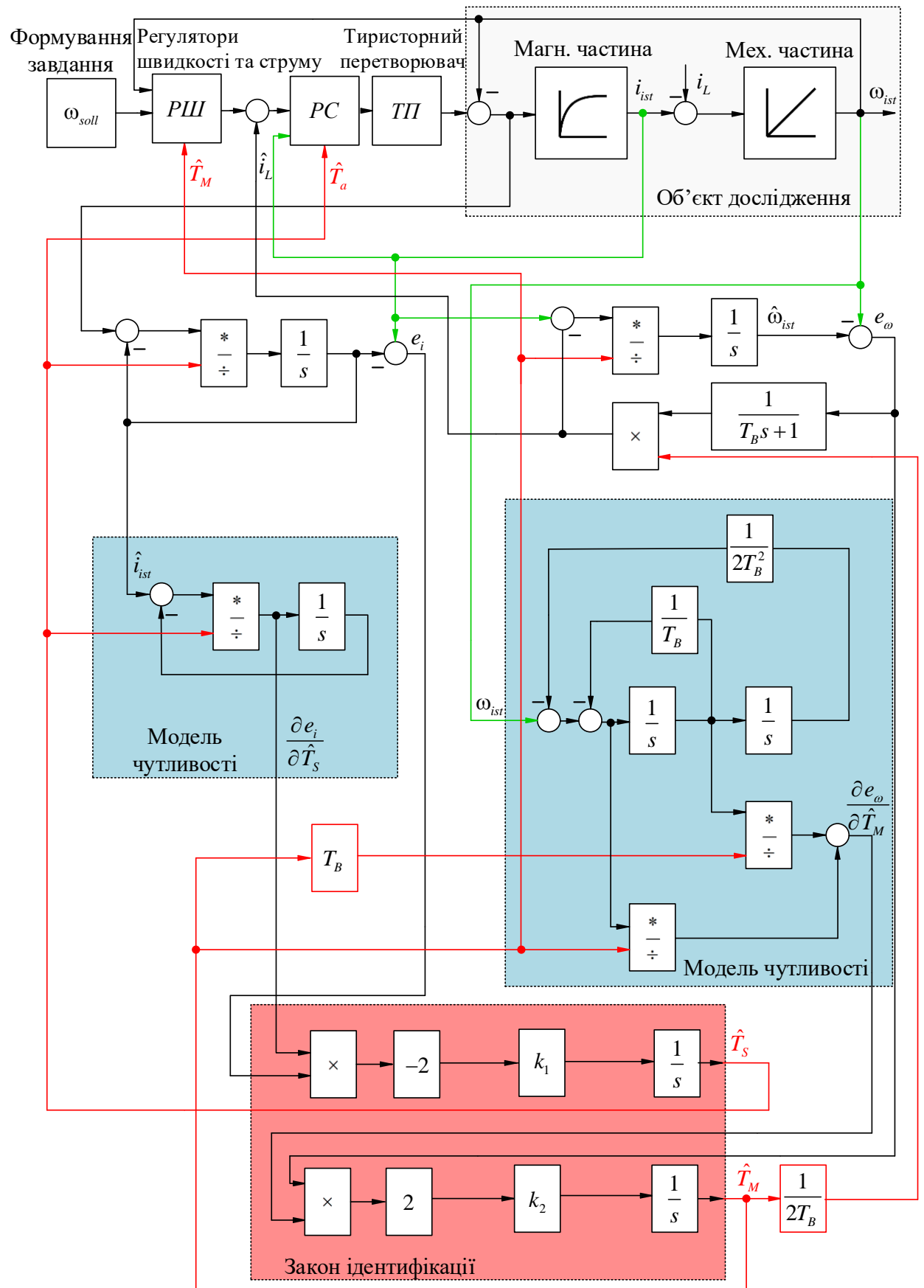


Рисунок 3.15 – Структурна схема СПР ДПС із використанням у регуляторах ідентифікованих із використанням якірного струму параметрів ДПС

Шляхом практичного підбору визначено, що наразі із допустимим коливанням та найшвидше система працює за частоти 90 Гц при амплітуді тестового сигналу 2 %. Стала часу спостерігача $T_B = 0.005$ с обрана таким чином, щоб усі полюси спостерігача знаходились правіше полюсів системи, тобто спостерігач має бути синтезованим із більшою швидкодією.

На основі структурної схеми 3.15 у середовищі MATLAB зібрано структурну схему. Її подано у додатку Б. Блоки ідентифікації електромеханічної «Ident_TM» та електромагнітної «Ident_TA» сталих містять відповідні алгоритми ідентифікації. Вони вміщують у себе алгоритми знаходження помилки оцінювання струму чи швидкості відповідно та вирази чутливості помилок.

На рисунку 3.15 червоним фоном позначено закон ідентифікації, який побудований відповідно до виразу (3.12). Під час ідентифікації електромеханічної сталої часу зникає від’ємний знак перед виразом, оскільки заведена помилка швидкості сформована від’ємною, так як для компенсації струму i_L вихід спостерігача має бути від’ємним.

Як видно із дослідів п.3.2, процес ідентифікації можна пришвидшити двома способами – або збільшити коефіцієнт k у виразі (3.12), що призводить до виникнення додаткових коливань, або зміни параметрів тестового сигналу. Останнє призводить до того, що при збільшенні амплітуди тестового сигналу коливальність сигналів системи досягає таких значень, при яких використання системи ідентифікації не є оправданим. Бажаною є така система, яка при введенні найменшого тестового сигналу, за найменших шумів, оцінює найбільш точно та швидко досліджуваний параметр.

Виконаємо підбір вдалих параметрів.

Задача підбору найоптимальніших коефіцієнтів системи ідентифікації є однією із основних, оскільки за рахунок їх правильного вибору досягається бажана швидкодія та точність системи керування.

Із огляду на уже проведені дослідження можна виділити чотири основні чинники, що впливають на швидкість та працездатність ідентифікації: амплітуда A_M і частота f_T тестового сигналу, стала часу спостерігача навантаження T_B та коефіцієнти підсилення у законі ідентифікації k_1, k_2 .

Ідентифікація градієнтним методом передбачає розв'язку процесів пошуку різних параметрів, тобто ідентифікація електромеханічної сталої не вносить корективів у встановлення електромагнітної сталої (допоки жоден із параметрів не використовується у відповідному регуляторі).

Проведення підбору параметрів виконуватиметься відразу на СПР (рис.3.15). У першу чергу слід визначитись із таким тестовим сигналом, який буде прийнятним із огляду на якість перехідних процесів – не буде завдавати великої коливальності у системі, та у той же час буде формувати придатні до використання під час ідентифікації сигнали.

Приймемо допустимою амплітудою коливання струму 20% від середнього значення. Частота коливань має бути рівною чи близькою частоті побутової мережі. Шляхом практичних випробувань знайдено найвдаліше співвідношення, а саме при частоті 44 Гц та амплітуді тестового сигналу 0.2 % досягається формування прийнятного сигналу вихідних координат об'єкта та реалізація в загальному ідентифікації.

Сформуємо наступну послідовність операцій при використанні дійсних величин параметрів об'єкта в СПР: розгін до номінальної швидкості при номінальному струмі, робота на номінальній швидкості без навантаження, робота на номінальній швидкості при прикладеному моменті.

Перехідні процеси заданої та реальної кутових швидкостей і якірного струму показані на рисунку 3.16.

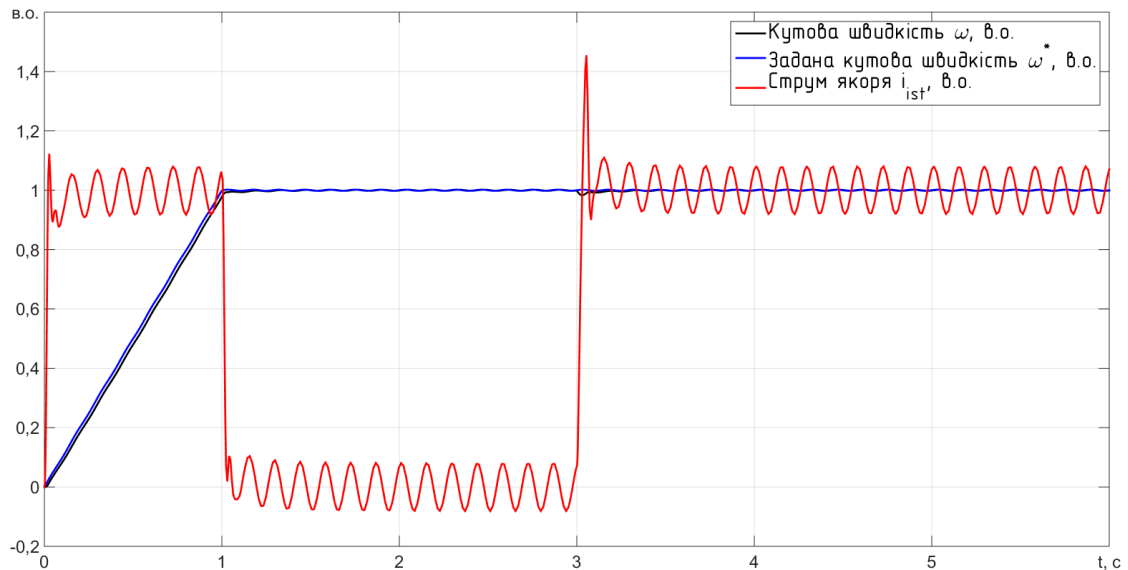


Рисунок 3.16 – Перехідні процеси кутової швидкості та якорного струму при внесенні тестового сигналу частотою 44 Гц та амплітудою 0.2 %

Як видно із рисунку 3.16 амплітуда коливання струму лежить у межах 20 %, сигнал реальної кутової швидкості відтворює завдання на ділянці ненавантаженої роботи.

При відсутності коефіцієнту підсилення у законі ідентифікації процес ідентифікації відбувається, але не із бажаною швидкістю (рис. 3.17-3.18). Отже, слід розглянути параметри спостерігача й коефіцієнти підсилення закону ідентифікації.

Стала часу спостерігача має бути обрана таким чином, щоб усі його полюси розташовувались правіше полюсів системи. Таким чином буде синтезовано такий спостерігач, який є більш швидкодіючим ніж система, що і є необхідним. Встановимо T_B на рівні 5 мс, коли електромагнітна стала часу рівна 10 мс та електромеханічна 250 мс.

Процес ідентифікації при різних коефіцієнтах підсилення у блоках закону ідентифікації показано на рисунках 3.17 та 3.18.

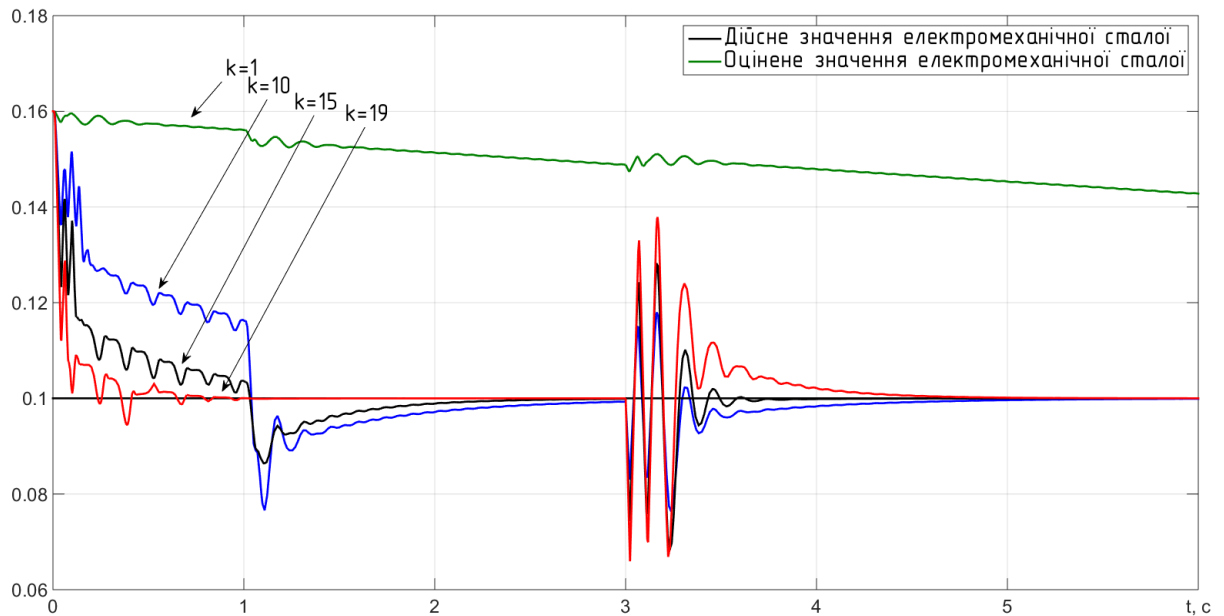


Рисунок 3.17 – Процес ідентифікації електромеханічної сталої часу при різних коефіцієнтах підсилення у блоці закону ідентифікації

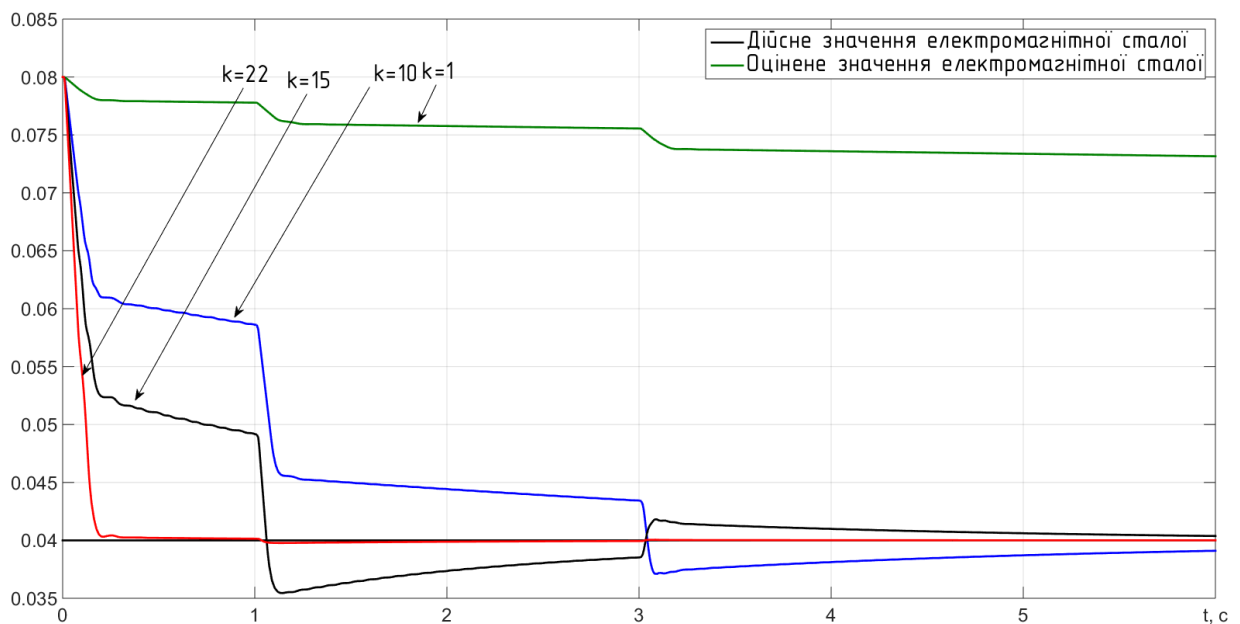


Рисунок 3.18 – Процес ідентифікації електромагнітної сталої часу при різних коефіцієнтах підсилення у блоці закону ідентифікації

Вибір коефіцієнта закону ідентифікації передбачає встановлення швидкодії системи ідентифікації. Негативною стороною цього явища є виникнення перерегулювання та поява коливальності. Таким чином, основною задачею при виборі коефіцієнтів є знаходження оптимального співвідношення між часом пошуку істинного значення та якістю перехідного процесу.

Після виконання дослідів встановлено, що найкраще співвідношення між швидкістю та якістю перехідних процесів ідентифікації отримано при коефіцієнтах закону ідентифікації електромагнітної T_a та електромеханічної T_M сталої 22 та 19 відповідно.

Як видно із рисунку 3.17 електромеханічна стала часу T_M знаходиться повільніше і із незначними затухаючими коливаннями у порівнянні із рис. 3.14. Це обумовлено тим, що у законі ідентифікації додано обмеження сигналу мультиплікації помилки та чутливості, що сповільнює процес ідентифікації. Але електромеханічна стала часу двигуна T_a ідентифікується швидше у порівнянні із рис. 3.5.

Дослідимо систему на двох дослідах. Перший дослід полягатиме у дослідженні швидкодії ідентифікації у початковий момент часу, другий дослід – порівнянні якості СПР із використанням постійних та ідентифікованих параметрів об'єкта в регуляторі при регулюванні швидкості.

У першому досліді параметри ланок двигуна постійного струму будуть змінними сигналами, а не постійними значеннями. Також зазнає зміни блок ідентифікація електромагнітної сталої часу та амплітуда тестового сигналу. Буде збільшено коефіцієнт та для уникнення утворених коливань встановлено блок обмеження.

Тест реалізовано наступним чином: початкове значення ідентифікованих параметрів лежить у подвійному інтервалі від реальної величини, двигун розганяється до номінальної швидкості при номінальному струмові та працює певний час на номінальній швидкості без прикладання навантаження поки перехідний процес ідентифікації електромеханічної сталої часу не завершиться. Потім прикладається навантаження і по стабілізації сигналу T_M параметри двигуна піддаються зміні. Вони спочатку будуть зменшені удвічі, а після успішної ідентифікації збільшені до істинного рівня. Зміна сигналів відбувається за експотенційним законом, оскільки реальні параметри двигуна не можуть зазнавати змін стрибком.

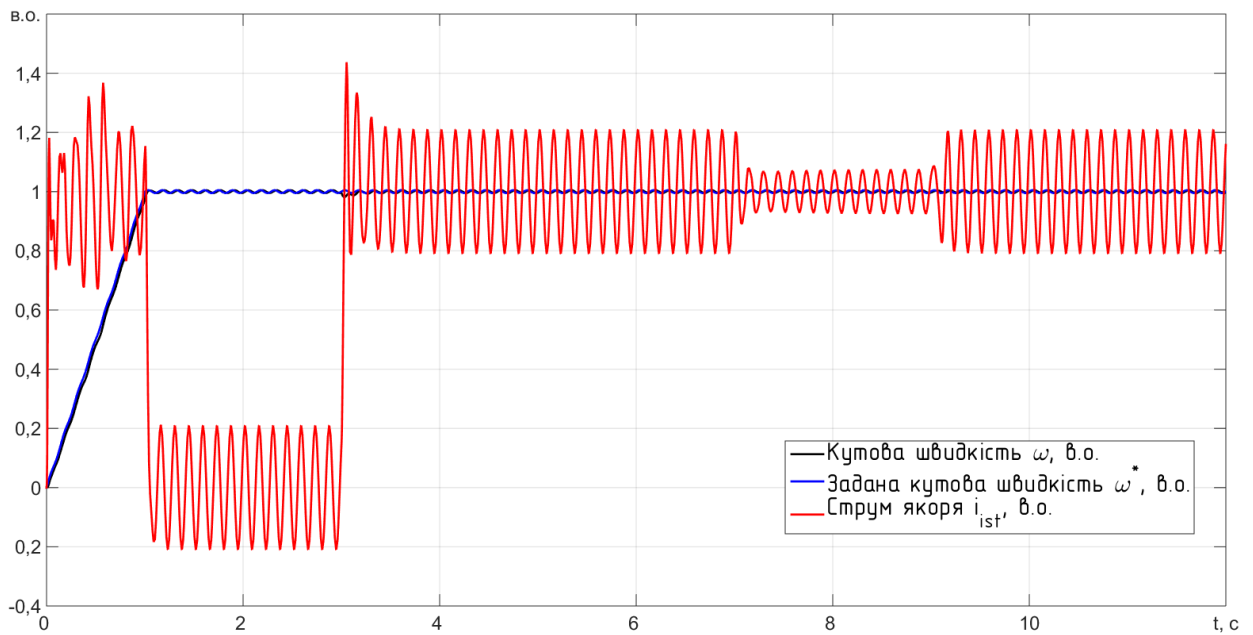


Рисунок 3.19 – Перехідні процеси кутової швидкості та струму при дослідженні швидкодії ідентифікації за зміни параметрів під навантаженням

Із перехідного процесу струму видно, що зменшення електромеханічної сталої двигуна призводить до зменшення амплітуди сигналу струму при незмінному прикладеному моменті.

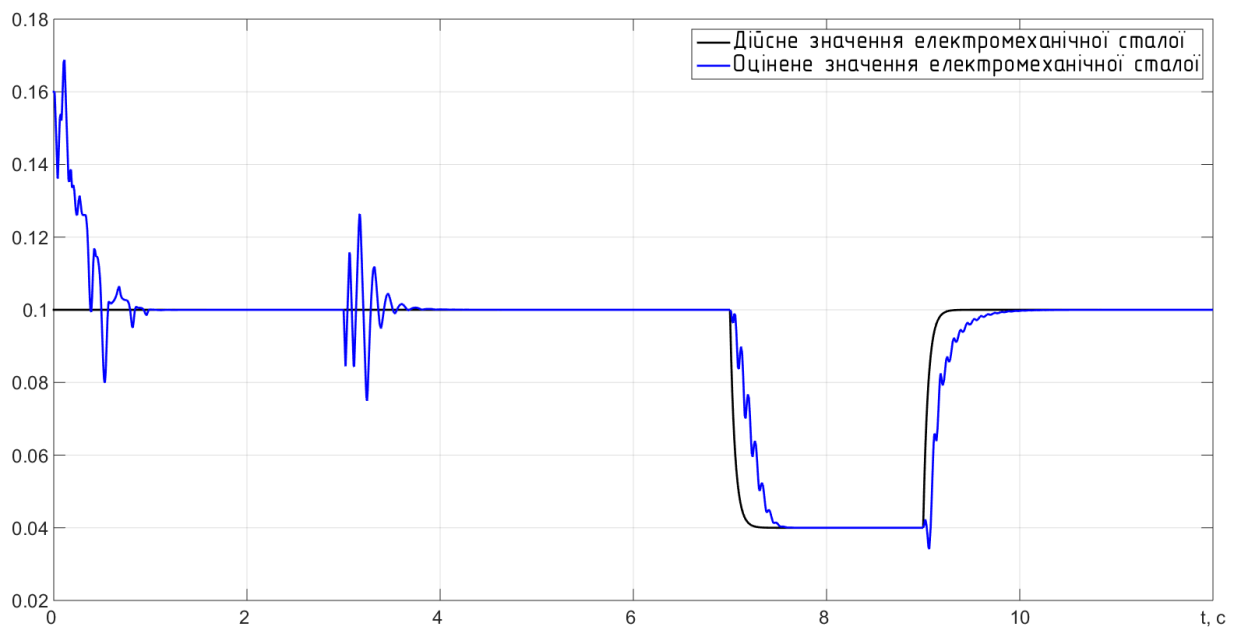


Рисунок 3.20 – Процес ідентифікації електромеханічної сталої при дослідженні швидкодії ідентифікації за зміни параметрів під навантаженням

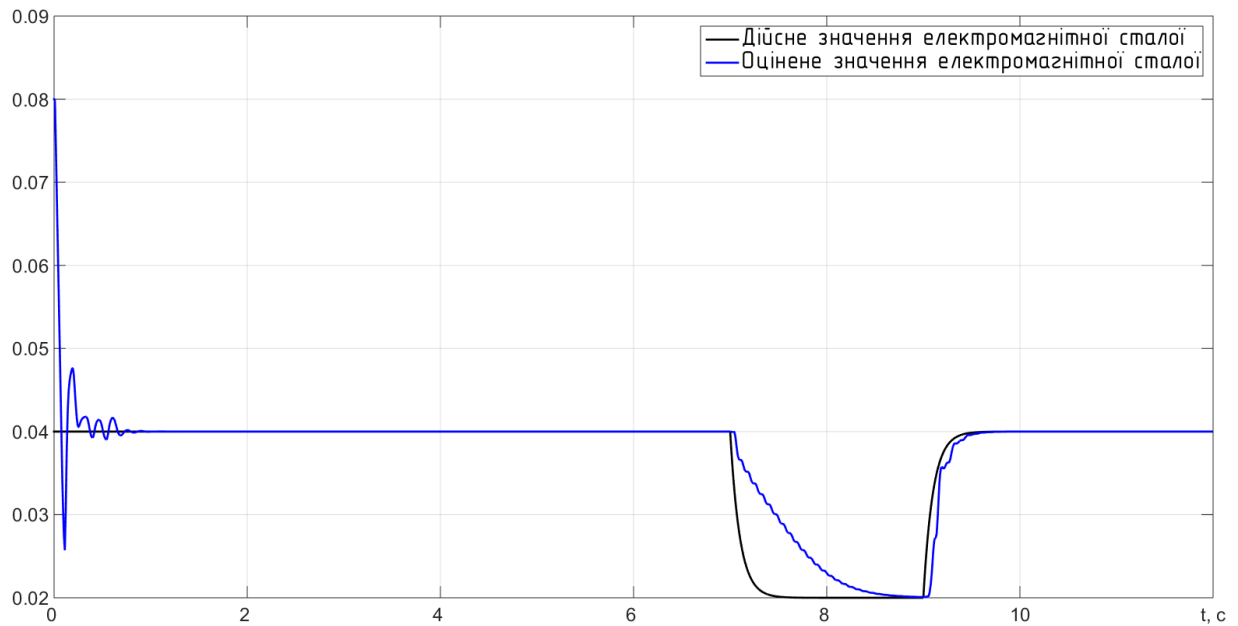


Рисунок 3.21 – Процес ідентифікації електромагнітної сталі при дослідженні швидкодії ідентифікації за зміни параметрів під навантаженням

Із рисунків 3.20 та 3.21 слідує, що виведена системи ідентифікації придатна до роботи не лише у початковий момент часу, але й при тривалій роботі. Система вірно визначає параметри об'єкта як на холостому ходу так і під навантаженням.

Виконаємо другий тест, який демонструє необхідність процесу ідентифікації параметрів об'єкта. Задавшись завданням, дослідити вплив застосування ідентифікованих параметрів в регуляторах СПР, порівняємо якість перехідних процесів керованої вихідної координати – швидкості.

Тест другого досліджу реалізовано таким чином, що двигун вхолосту розганяється до номінальної швидкості із номінальним моментом, на усталеній швидкості прикладається номінальний момент навантаження. Після чого досліджується якість перехідних процесів відпрацювання змінюваного завдання кутової швидкості. На рисунку 3.22 представлено перехідні процеси у двигуні при відсутності ідентифікації параметрів. Параметри у регуляторі більші за параметри об'єкта керування у чотири рази.

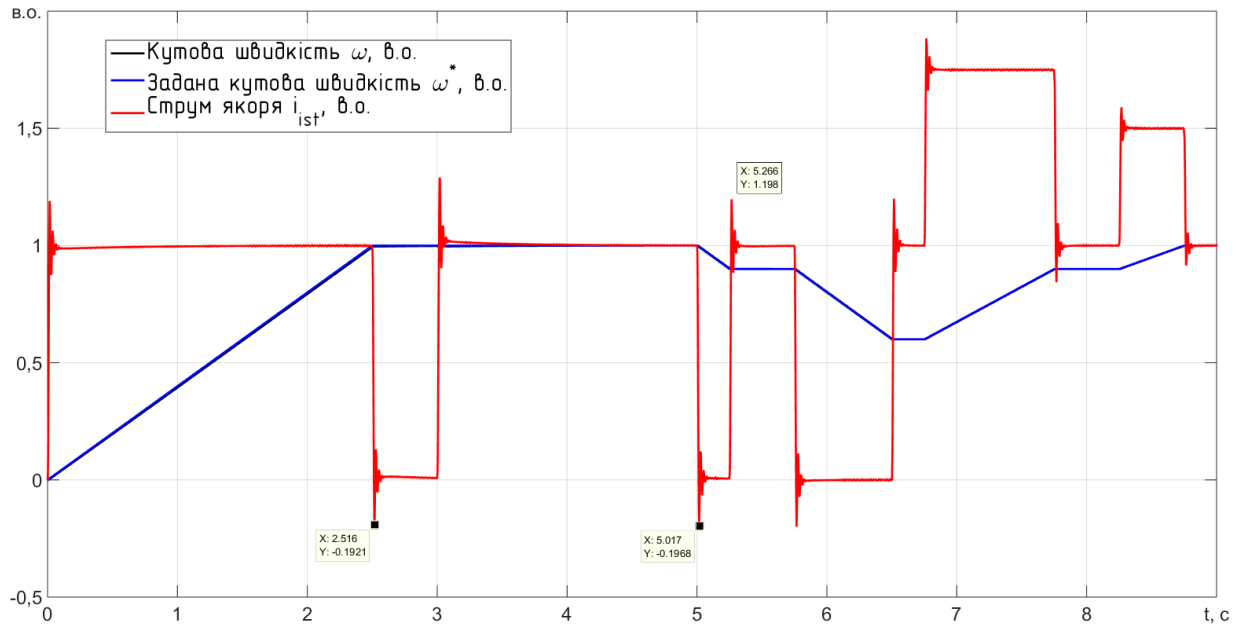


Рисунок 3.22 – Перехідні процеси кутової швидкості та струму при дослідженні впливу параметрів регуляторів СПР за неідентифікованих параметрів

Із рисунку 3.22 видно, що перерегулювання складають близько 20% у найгіршому випадку. Прийнемо такими початкові умови для ідентифікації, які у чотири рази більші за параметри об'єкта та проведемо ідентифікацію на інтервалах розгону та прикладення навантаження. Задля уникнення коливальності процесів вимкнемо ідентифікацію після наближення ідентифікованого значення до дійсного.

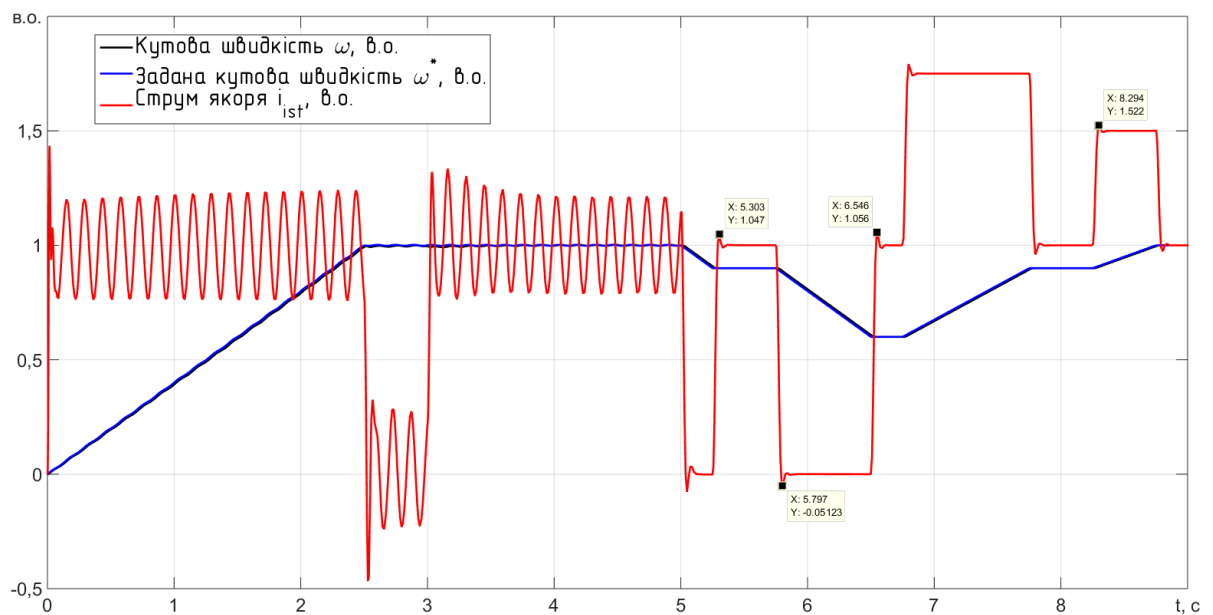


Рисунок 3.23 – Перехідні процеси кутової швидкості та струму при дослідженні впливу параметрів регуляторів СПР за ідентифікованих параметрів

Рисунок 3.23 демонструє, що за використання у системі підпорядкованого регулювання ідентифікованих параметрів досягається закладена при проектуванні якість перехідних процесів системи. У даному випадку перерегулювання складають близько 5%.

Висновки до розділу

У даному розділі ідентифіковано електромагнітну та електромеханічну сталі часу двигуна постійного струму із використанням дійсного струму силового кола. Встановлено, що

1. Процеси ідентифікації електромеханічної та електромагнітної сталої часу при ідентифікації із використанням виміряного значення струму якоря протікають незалежно один від одного.
2. На швидкість ідентифікації електромеханічних сталих часу впливає коефіцієнт ідентифікації.
3. За використання у СПР ідентифікованих параметрів якість перехідних процесів при керуванні вихідної координати покращується.
4. При відхиленні початкового наближення якнайменш у чотири рази від дійсного значення процес ідентифікації не втрачає працездатності.

4 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ГРАДІЄНТНИМ МЕТОДОМ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ДІЙСНОГО СТРУМУ ЯКОРЯ

У даному розділі описано ідентифікацію параметрів ДПС градієнтним методом без використання реального значення якірного струму. Сутність градієнтного методу, математичний опис ДПС та синтез СПР приведено у попередньому розділі. Лейтмотивом частини є підтвердження можливості параметричної ідентифікації за наявних лише вхідної та вихідної координат.

4.1 Виведення передатних функцій чутливості

Ідентифікація сталої часу контуру струму та електромеханічної сталої часу згідно з (3.12) передбачає наявність сигналу помилки оціненого сигналу та чутливості цієї помилки.

Виведений у третьому розділі алгоритм ідентифікації базується на наявності сигналу струму якірного кола, але у реальній системі не завжди якірний струм є вимірюваною величиною. Крім того, сигнал вимірюваного струму завжди містить значні коливання. Тому у цьому розділі замість дійсного значення струму якоря буде використовуватись оцінюване. Для цього у згорнутій структурі СПР (рис. 3.6) коло ідентифікації буде змінено, шляхом додавання спостерігача кола керування струму, що представлений аперіодичною ланкою $W(p) = \frac{1}{\hat{T}_s s + 1}$. Отримана структура представлена на рисунку 4.1.

Задля отримання чутливості $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M}$ слід отримати передатну функцію сигналу помилки e_ω від вхідного сигналу – ω_{soll} . Як і у попередньому розділі розрахунок проводитиметься за формулою Мейсона (А.1), оскільки структура ДПС із моделями і спостерігачем збурення є складною для елементарного спрощення.

$$W_1 = -\frac{1}{T_M s(T_S s + 1)}, \quad (4.5)$$

$$W_2 = \frac{1}{\hat{T}_M s(\hat{T}_S s + 1)}. \quad (4.6)$$

Тоді відповідно до формули Мейсона (А.1):

$$\frac{e}{\omega_{soll}} = \frac{W_1 + W_2}{1 - (W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}) + W_I W_{IV}}. \quad (4.7)$$

Після підстановки передатних функцій у вираз (4.7), виконання усіх математичних операцій та спрощення отримано:

$$\frac{e_\omega}{\omega_{soll}} = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{Z_1(s)}{N_1(s)}, \quad (4.8)$$

де $b_1 = T_M - \hat{T}_M$;

$$b_2 = T_B(T_M - \hat{T}_M) + T_M T_S - \hat{T}_M \hat{T}_S;$$

$$b_3 = T_B(T_M T_S - \hat{T}_M \hat{T}_S);$$

$$a_0 = K_B;$$

$$a_1 = K_B \hat{T}_S + \hat{T}_M + K_B \hat{T}_M;$$

$$a_2 = \hat{T}_M T_B + \hat{T}_M \hat{T}_S + K_B \hat{T}_M \hat{T}_S + \hat{T}_M T_M + K_B T_M \hat{T}_S;$$

$$a_3 = T_M \hat{T}_M \hat{T}_S + K_B T_M T_S \hat{T}_S + T_M T_S \hat{T}_M + \hat{T}_M T_B \hat{T}_S + T_M T_B \hat{T}_M;$$

$$a_4 = T_M \hat{T}_M \hat{T}_S T_B + T_M \hat{T}_M \hat{T}_S T_S + T_M \hat{T}_M T_S T_B,$$

$$a_5 = T_M \hat{T}_M T_S \hat{T}_S T_B.$$

Для знаходження похідної сигналу помилки за сигналом оціненої електромеханічної сталої часу справедливий вираз:

$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} = \omega_{soll} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_M} \frac{Z_1(s)}{N_1(s)}. \quad (4.9)$$

Після диференціювання виразу (4.9) отримано:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_M} \frac{Z_1(s)}{N_1(s)} = & \frac{-(\hat{T}_S s + 1)(T_B s + 1)s}{N_1(s)} + \\ & + \frac{-(T_M - \hat{T}_M)(T_B s + 1)s(T_M T_S - \hat{T}_M \hat{T}_S)(b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s)}{N_1(s)^2}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

де $b_1 = K_B$;

$$b_2 = T_B + \hat{T}_S + K_B \hat{T}_S + T_M;$$

$$b_3 = T_M \hat{T}_S + T_M T_S + T_B \hat{T}_S + T_M T_B;$$

$$b_4 = T_M T_B \hat{T}_S + T_M T_S \hat{T}_S + T_M T_B T_S;$$

$$b_5 = T_M T_S \hat{T}_S T_B.$$

У другому доданку виразу (4.10) наявна різниця добутків дійсного та оціненого значень сталих часу, яка за логікою ідентифікації рівна нулю. Крім того, другий доданок похідної сигналу помилки за електромеханічною сталою містить дійсні значення сталих часу, що не можуть бути відомі. Тому при подальших розрахунках другий доданок виразу (4.10) розглядатись не буде. Похідна сигналу помилки e по оціненому значенню електромеханічної сталої часу \hat{T}_M рівна:

$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} = -\omega_{soll} \frac{(T_B s + 1)(\hat{T}_S s + 1)s}{N_1(s)}. \quad (4.11)$$

Оскільки помилка моделі, яка використовуватиметься у законах ідентифікації електромеханічної сталої часу та сталої часу контуру струму однакова, виконаємо диференціювання виразу (4.8) за сигналом оціненої сталої часу струмового контуру \hat{T}_S :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_S} \frac{Z_1(s)}{N_1(s)} = & \frac{-s^2 \hat{T}_M (T_B s + 1)}{N_1(s)} + \\ & + \frac{-(T_M - \hat{T}_M)(T_B s + 1)(T_M T_S - \hat{T}_M \hat{T}_S)(b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s)}{N_1(s)^2}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

де $b_1 = K_B$;

$$b_2 = \hat{T}_M + K_B \hat{T}_M + K_B T_M;$$

$$b_3 = T_M \hat{T}_M + K_B T_M T_S + T_B \hat{T}_M;$$

$$b_4 = T_M T_S \hat{T}_M + T_M T_B \hat{T}_M;$$

$$b_5 = T_M T_S \hat{T}_M T_B.$$

Як і вираз (4.10) , вираз (4.12) містить другий доданок, яким слід знехтувати. Тоді вираз похідної помилки за сталою часу контуру струму:

$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_S} = -\omega_{soll} \frac{s^2 \hat{T}_M (T_B s + 1)}{N_1(s)}. \quad (4.13)$$

Знаменник виразів (4.8)-(4.13) містить невідомі сталі часу, тому слід як і у попередньому розділі перейти від заданого значення кутової швидкості ω_{soll} до дійсного ω_{ist} . Оскільки об'єкт керування та регулятори в структурній схемі без використання якірного струму ідентичні схемі із використанням останнього та прямий шлях від заданої кутової швидкості до реальної не містить інших – передатна функція розімкнутої системи буде ідентична (А.14) , але передатна функція замкненої системи відповідно до (А.16) матиме вигляд:

$$\frac{\omega_{ist}}{\omega_{soll}} = \frac{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B)(\hat{T}_S s + 1)}{N_1(s)}. \quad (4.14)$$

Після чого виразимо із (4.14) ω_{soll} :

$$\omega_{soll} = \omega_{ist} \frac{N_1(s)}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B)(\hat{T}_S s + 1)}. \quad (4.15)$$

Підставивши (4.15) в (4.11) й в (4.13) та виконавши скорочення отримаємо передатні функції чутливості сигналу помилки за електромеханічною сталою часу $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M}$ та за сталою часу контуру струму $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_S}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} &= -\omega_{ist} \frac{\cancel{N_1(s)}}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B) (\cancel{\hat{T}_S s + 1})} \frac{(T_B s + 1) (\cancel{\hat{T}_S s + 1}) s}{\cancel{N_1(s)}} = \\ &= -\omega_{ist} \frac{(T_B s + 1)s}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B)}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_s} &= -\omega_{ist} \frac{\cancel{N_1(s)}}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B)(\hat{T}_s s + 1)} \frac{s^2 \hat{T}_M (T_B s + 1)}{\cancel{N_1(s)}} = \\ &= -\omega_{ist} \frac{(T_B s + 1)s}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B)} \frac{\hat{T}_M s}{(\hat{T}_s s + 1)}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Із формули (4.16) випливає, що чутливість сигналу помилки за електромеханічною сталою часу із використанням якірного струму та без використання є ідентичною (А.17).

Вираз (4.17) частково містить рішення формули (4.16), тому доречно буде використати значення чутливості $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M}$ в обрахунку чутливості $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_s}$, тим самим спростивши обрахунок останньої (рис. 4.2).

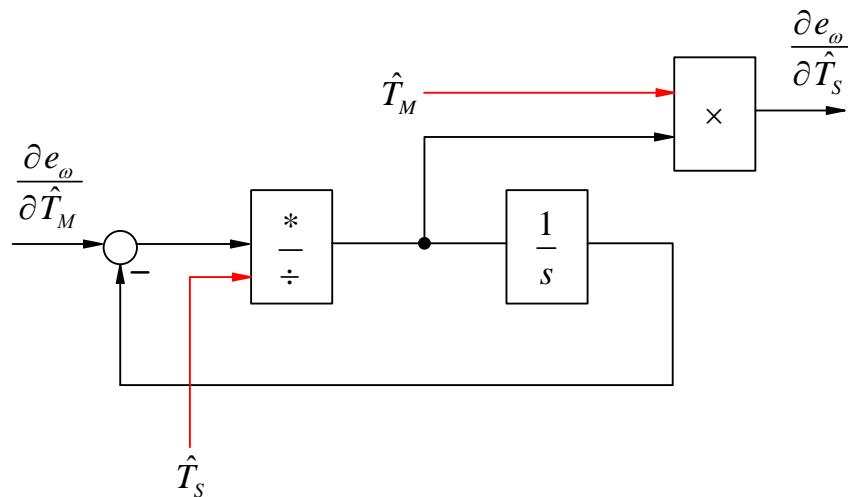


Рисунок 4.2 – Структурна схема моделі чутливості сигналу помилки оцінювання кутової швидкості за оціненою електромагнітною сталою часу

Загальна структурна схема системи ідентифікації параметрів ДПС градієнтним методом без використання якірного струму зображена на рисунку 4.3.

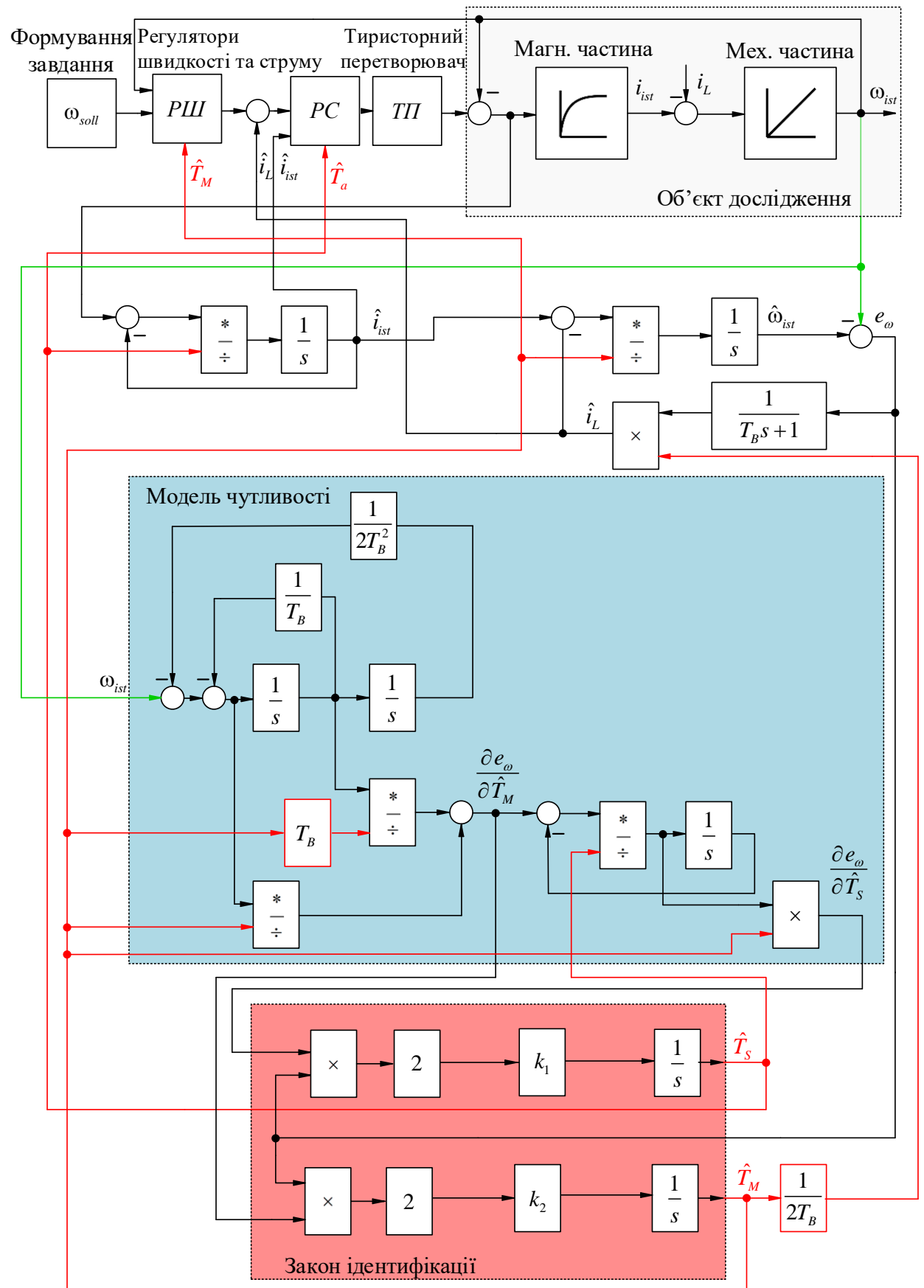


Рисунок 4.3 – Структурна схема СПР ДПС із використанням у регуляторах ідентифікованих без використання якірного струму параметрів ДПС

4.2 Дослідження моделюванням системи параметричної ідентифікації без використання дійсного значення струму якоря

Після виведення усіх математичних виразів і представлення їх у структурній схемі, можна приступити до збірки моделі симуляції в середовищі MATLAB. Зібрана модель ідентифікації сталих часу градієнтним методом без використання струму якоря представлена у додатку Б.

Виконаємо найпростіший тест, а саме проведемо ідентифікацію параметрів при розгоні, подальшій роботі на холостому ході до зведення помилки ідентифікації до нуля та прикладання навантаження. Для цього слід методом практичного підбору здійснити вибір вдалих коефіцієнтів системи. Вибір коефіцієнтів проводиться зважаючи на бажану швидкодію при заданій якості перехідних процесів.

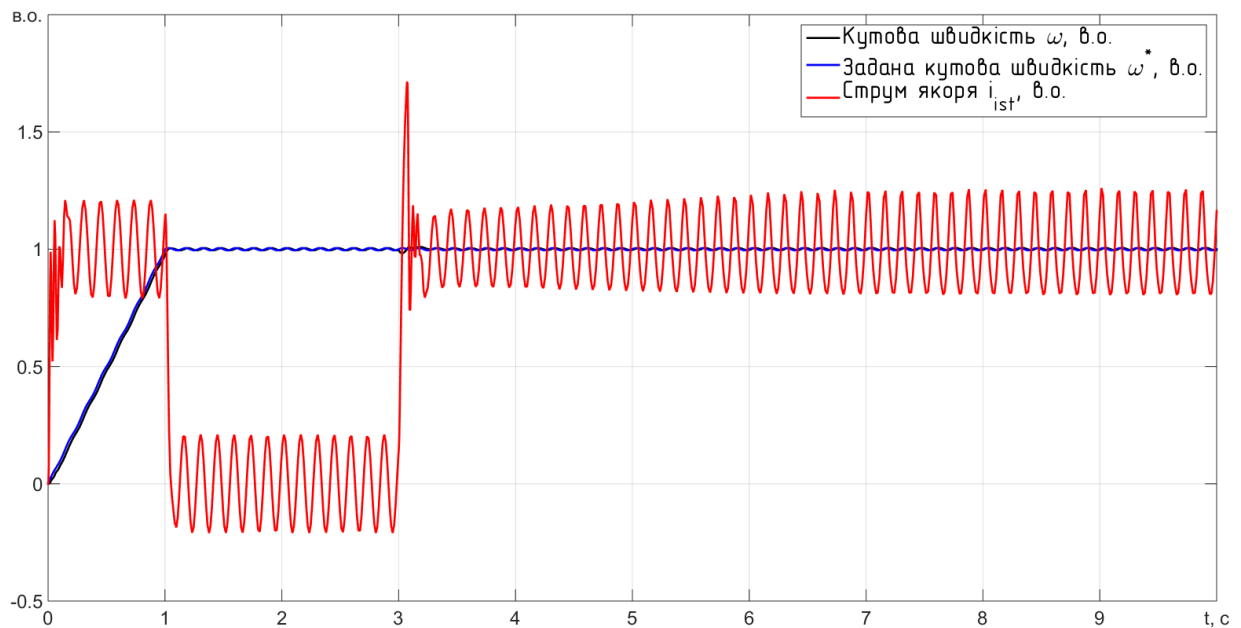


Рисунок 4.4 – Перехідні процеси кутової швидкості та струму при дослідженні алгоритму ідентифікації без використання якорного струму

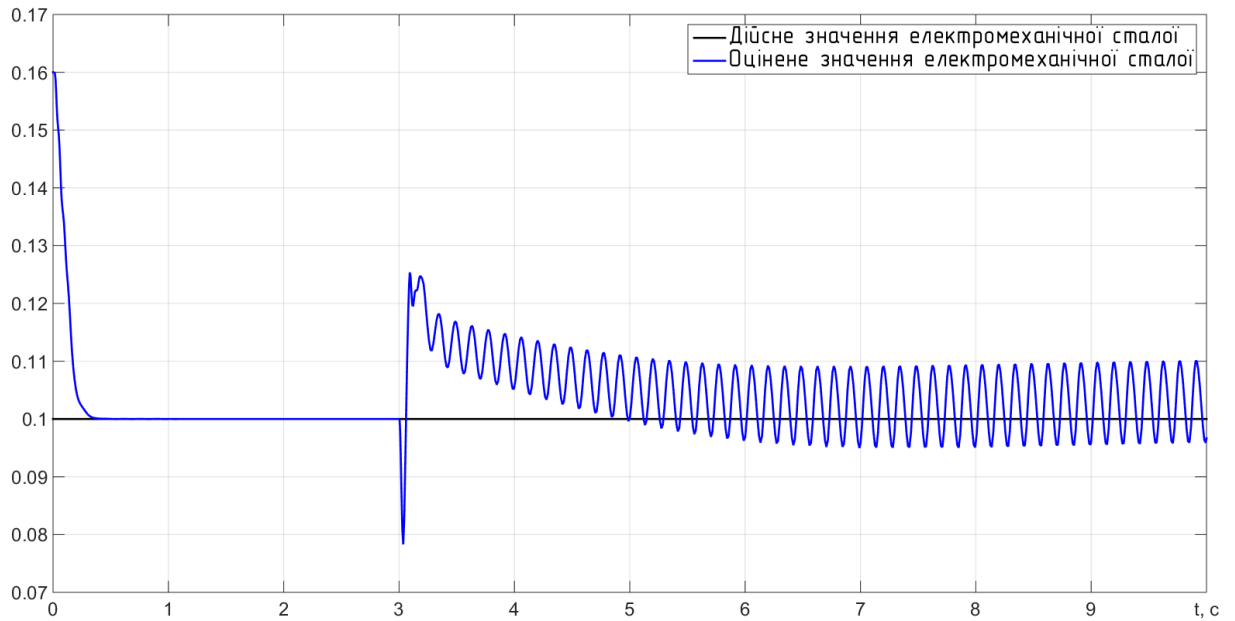


Рисунок 4.5 – Процес ідентифікації електро механічної сталої часу при дослідженні алгоритму ідентифікації без використання якірного струму

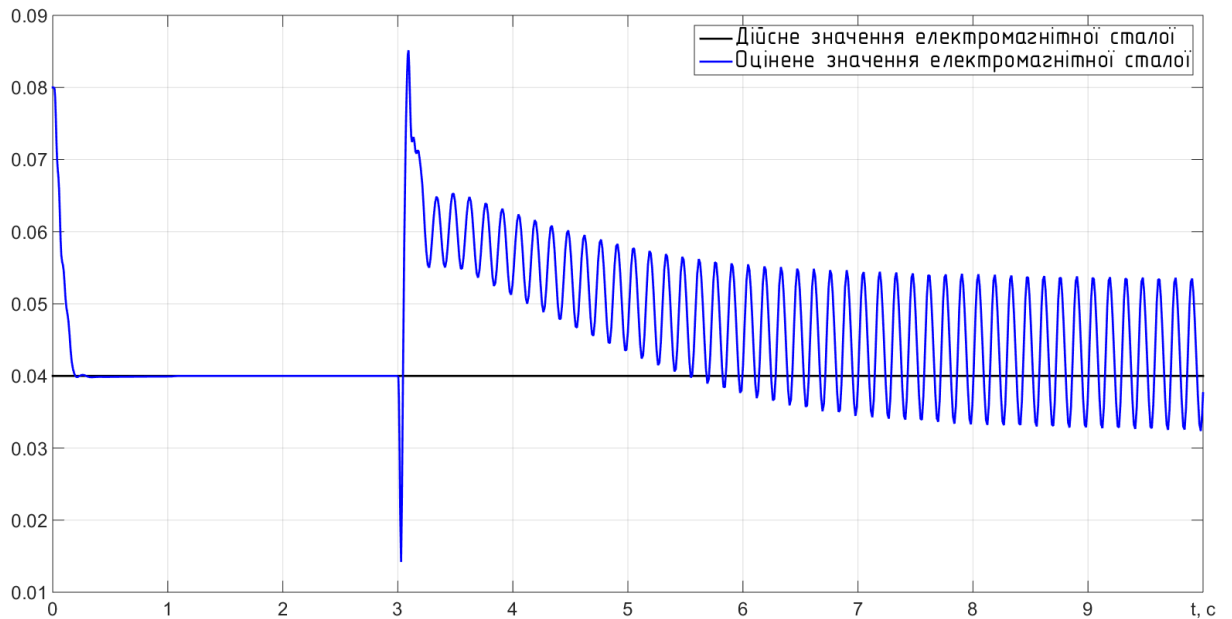


Рисунок 4.6 – Процес ідентифікації електромагнітної сталої часу при дослідженні алгоритму ідентифікації без використання якірного струму

Із результатів симуляції слідує, що ідентифікація за такої структури спостерігачів можлива лише на ненавантаженій машині. Щоб уникнути коливань, слід завдати таких самих змін, як і у алгоритмі ідентифікації електро механічної сталої при ідентифікації із використанням дійсного струму якоря, а саме взяти сигнал похідної від помилки та чутливості, коли остання

пропущена через додатковий фільтр. Також слід обмежити стрибки сигналу добутку помилки та чутливості у законі ідентифікації.

Після внесення змін при виконанні ідентичного тесту отримано наступні результати.

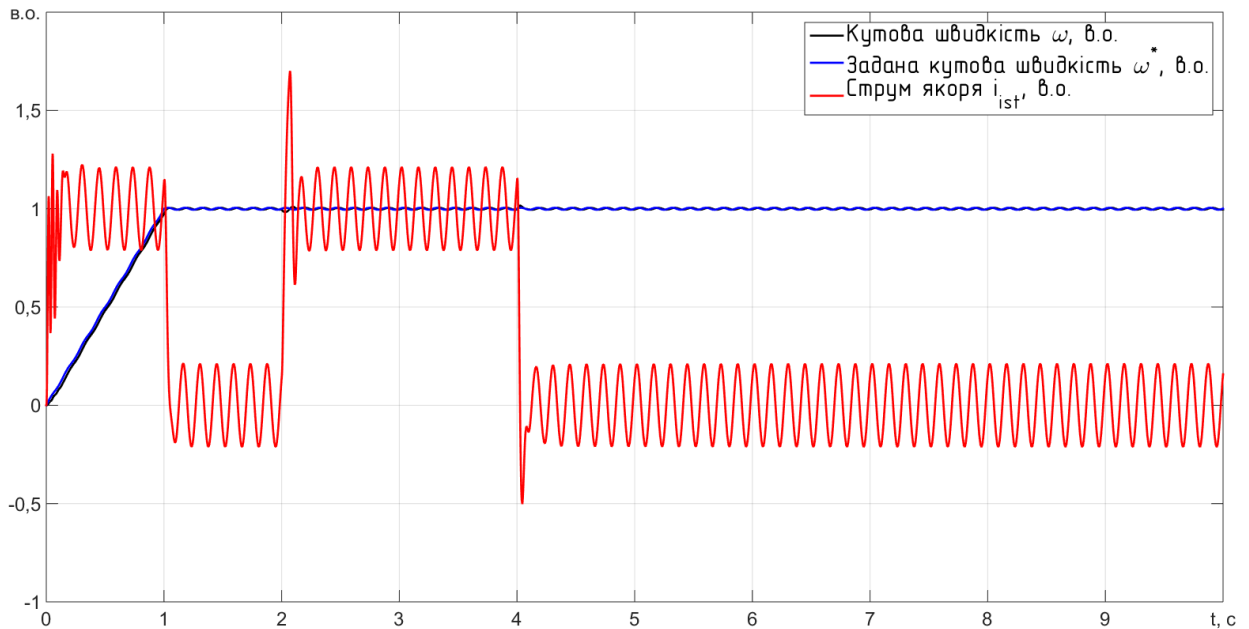


Рисунок 4.7 – Перехідні процеси кутової швидкості та струму при дослідженні алгоритму ідентифікації без використання якірного струму при пристосованому до навантаження спостерігачі

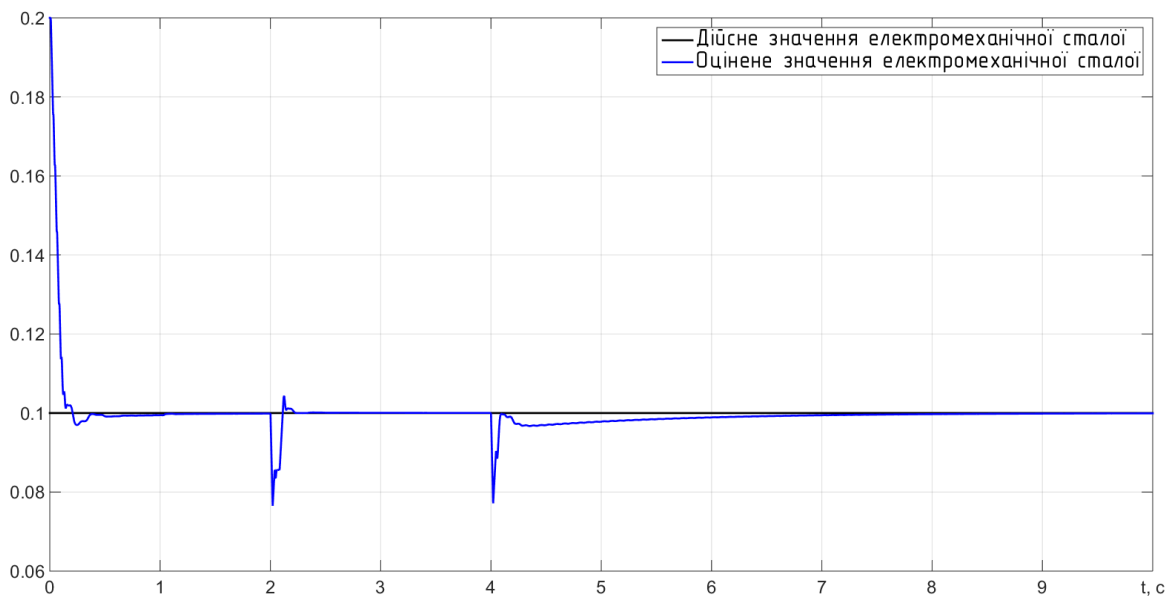


Рисунок 4.8 – Процес ідентифікації електромеханічної сталої часу при дослідженні алгоритму ідентифікації без використання якірного струму при пристосованому до навантаження спостерігачі

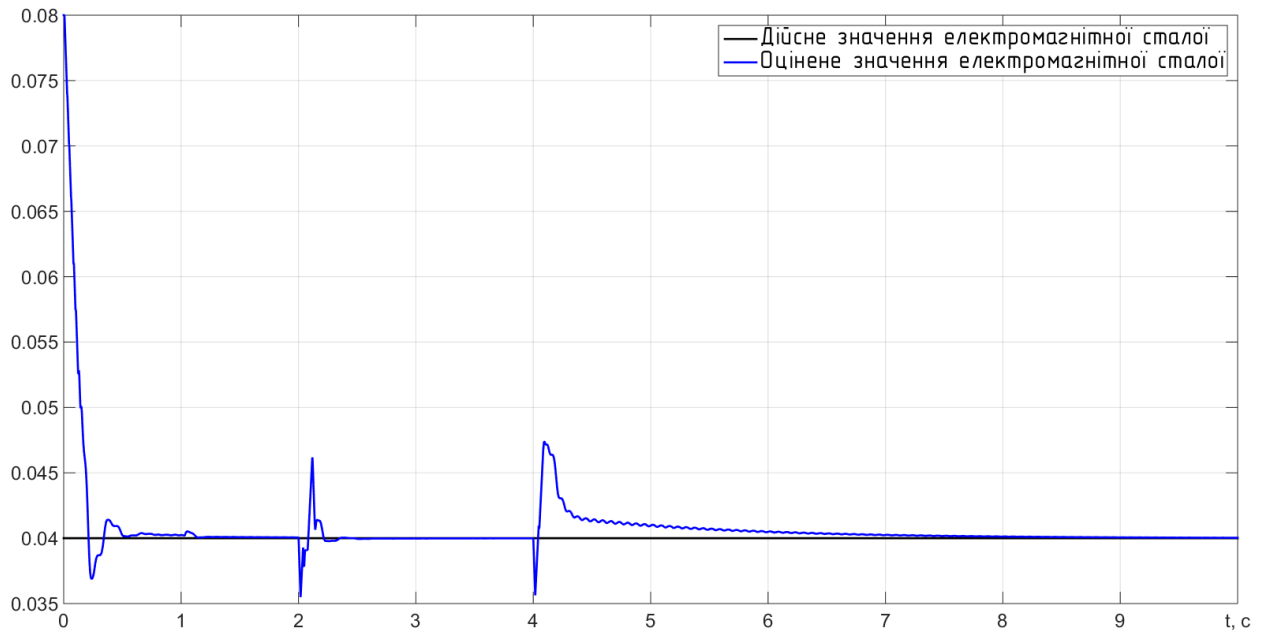


Рисунок 4.9 – Процес ідентифікації електромагнітної сталої часу при дослідженні ідентифікації без використання якірного струму при пристосованому до навантаження спостерігачі

Із результатів моделювання слідує, що ідентифікація без використання дійсного значення струму якоря за виведеною структурою є працездатною і в середньому за одну секунду точно ідентифікує ідентифікований параметр.

Підвищити швидкодію можливо за рахунок зміни коефіцієнтів чи меж обмеження сигналів. Але під час численних тестів виявлено, що підібрані коефіцієнти та межі обмеження є найоптимальнішими. На відміну від ідентифікації із використанням дійсного значення якірного струму процеси ідентифікації двох електромеханічних сталих пов'язані між собою і впливають один на інший. Також слід зважати і проводити підбір коефіцієнтів при заведених ідентифікованих параметрах в регуляторах, оскільки СПР із використанням ідентифікованих параметрів матиме іншу поведінку із порівнянням із системою СПР за постійних заданих параметрів.

Висновки до розділу

У даному розділі ідентифіковано електромагнітну та електромеханічну сталі часу двигуна постійного струму без використання дійсного струму силового кола. Встановлено, що

1. Процеси ідентифікації електромеханічної та електромагнітної сталої часу при ідентифікації без використання виміряного значення струму якоря протікають залежно один від одного.
2. На швидкість ідентифікації електромеханічних сталих часу впливає коефіцієнт ідентифікації.
3. Процес налаштування коефіцієнтів закону ідентифікації має відбуватись із використанням у регуляторах струму та швидкості ідентифікованих величин. У першу чергу налаштовується система при абсолютно точно відомих значеннях ідентифікованих величин для досягнення стійкості алгоритму, а після чого проводиться підбір найбільш вдалих коефіцієнтів ідентифікації.
4. За використання у СПР ідентифікованих параметрів якість перехідних процесів при керуванні вихідної координати покращується.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даному дипломному проекті на здобуття наукового рівня бакалавр було успішно виконано ідентифікацію параметрів та спостереження збурення машини постійного струму.

При цьому були отримані наступні результати:

1. Швидкодія спостерігача моменту статичного опору залежить від T_B , а якість оцінювання моменту статичного опору від K_B .
2. Встановлено, що при використанні компенсації спостереженого збурення у регуляторі струму СПР система є більш швидкодіючою, ніж система СПР із ПІ-регулятором швидкості.
3. Ідентифікація параметрів електричної машини постійного струму градієнтним методом із використанням дійсного значення струму силового кола є працездатною і за 0.2 с ідентифікує значення параметрів із початковим відхиленням у два рази.
4. Ідентифікація параметрів електричної машини постійного струму градієнтним методом без використання дійсного значення якірного струму є також працездатною, але у порівнянні із ідентифікацією із використанням якірного струму є більш складною у налаштуванні.
5. Встановлено працездатність розроблених законів ідентифікації та доведено доречність використання ідентифікованих параметрів у регуляторах СПР.
6. Теоретичні результати ідентифікації підтверджені результатами математичного моделювання.
7. Показано, що система ідентифікації, яка використовує лише вхідну координату та вихідну є працездатною, що можна використати у електричній машині змінного струму, яка має складнішу структуру та в якій неможливо виміряти усі сигнали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ABB. DC or AC Drives? A guide for users of variable-speed drives.
Електронний ресурс :
<https://library.e.abb.com/public/8843efec91f93d9fc1257b1300574a3b/3ADW000059.pdf>
2. Теряев В.І. Конспект лекцій по дисципліні «Автоматизація електромеханічних систем - 1» : навчальний посібник. Київ : КПІ, 2012. 308 с.
3. D. Schröder. Elektrische Antriebe. Regelung von elektrischen Antrieben. 3 Auflage. München : Springer, 2009. 1358 с.
4. Семёнов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления : навчальний посібник. Пенза : Пенз. Гос. Ун-тет, 2003. 211 с.
5. Ljung L. System Identification, Theorie for the User : теоретичні засади. Prentice - Hall, Upper Saddle River NJ, 1999. 432 с.
6. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану : навчальний посібник. Донецк : ООО “НОРД Комп’ютер”, 2004. 298 с.
7. Luenberger D.G. Observing the state of a linear system // IEEE Trans. Mil. Electron. – 1964. – №8. – P. 74-80.
8. Luenberger D.G. An Introductions to Observers // Proc. IEEE Transformation on Automatic Control. – 1971. – December. – P. 596-602.
9. Изерман Р. Цифровые системы управления / Изерман Р. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
- 10.Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Квакернаак Х., Сиван Р. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
11. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

- 12.Методика настройки наблюдателя состояния, восстанавливающего статический и динамический моменты двигателя постоянного тока / О.И. Толочко, П.Х. Коцегуб, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск, 2007. – С. 434-436.
- 13.Andreescu G. D. Torque-speed adaptive observer and inertia identification without current transducers for control of electric drives / Andreescu G. D., Rabinovici R. // International conference on electrical machines, Espoo, FINLANDE (28/08/2000). 2000. – P. 1428-1432.
- 14.Ключев В.И. Теория электропривода : підручник. Москва : Энергоатомиздат, 2005. 721 с.
- 15.Дрячев Г.И. Теория электропривода : підручник. Челябинск : ЮУрГУ, 2005. 209 с.
- 16.Островерхов М.Я., Красношарпа Н.Д. Электропривод: конспект лекцій з кредитного модуля : навчальний посібник. К.: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2018. 186 с.
- 17.Коцегуб П.Х. Синтез вентильных приводов постоянного тока. Навчальний посібник. Донецк : ДПИ, 1983. 109 с.
- 18.Казачковський М.М. Комплексні електроприводи : навчальний посібник. Дніпро : НГУ, 2003. 226 с.
- 19.Ладієва Л.Р. Оптимальне керування системами : Навчальний посібник. К.: НМЦ ВО, 2000. 187 с.
- 20.Rolf Isennann. Identifikation dynamischer Systeme 2 : підручник. Darmstadt : Springer-Lehrbuch, 1992. 346 с.
- 21.Островерхов М.Я., Бурик М.П., Каленчук Я.О. Верифікація параметрів електроприводу постійного струму підпорядкованої структури : стаття у міжнародно технічному віснику «Сучасні проблеми електроенерготехніки і автоматики». К.: КПІ, 683 с.
- 22.Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т1. Линейные системы : підручник. Москва : Физматлит, 2003. 288 с.

ДОДАТОК А

Виведення передатної функції чутливості сигналу помилки спостереження швидкості.

Для виведення чутливості помилки спостереження швидкості $\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M}$ слід мати функцію цієї помилки e_ω від сигналу завдання швидкості ω_{soll} .

Оскільки досліджувана структурна схема є складною, доцільно для пошуку передатної функції використати формулу Мейсона.

Застосування формули Мейсона вимагає виокремлення усіх незалежних контурів та усіх прямих шляхів між точками структурної схеми. [22] Чотири незалежні контури та два прямі шляхи нанесені на рисунок 3.2.

$$W_{zx} = \frac{\sum_{i=1}^m W_{ni} \Delta_i}{\Delta}, \quad (\text{A.1})$$

де Δ – визначник графа системи керування;

W_{zx} – передатна функція системи керування від входу x до виходу z ;

W_{ni} – передатна функція прямого шляху за номером i від x до z ;

Δ_i – визначник підграфу прямого шляху за номером i .

Досліджуючи структурну схему даного об'єкта ідентифікації можна виокремити чотири незалежні контури, які позначені на рисунку 3.2 синім коротким пунктиром. Вони мають відповідні передатні функції:

$$W_I = \frac{-K_B}{\hat{T}_M s (T_B s + 1)}, \quad (\text{A.2})$$

$$W_{II} = \frac{K_B}{\hat{T}_M s (T_B s + 1) (T_a s + 1)}, \quad (\text{A.3})$$

$$W_{III} = \frac{-K_B}{T_M s (T_B s + 1) (T_a s + 1)}, \quad (\text{A.4})$$

$$W_{IV} = -\frac{1}{T_M s (T_a s + 1)}. \quad (\text{A.5})$$

Усі контури окрім першого та четвертого взаємо дотикаються. Існує лише два прямих шляхи від сигналу завдання швидкості ω_{soll} до сигналу помилки спостереження швидкості e_ω . Вони позначені червоною пунктирною лінією і мають відповідні передатні функції:

$$W_1 = -\frac{1}{T_M s(T_a s + 1)}, \quad (A.6)$$

$$W_2 = \frac{1}{\hat{T}_M s(T_a s + 1)}. \quad (A.7)$$

Усі незалежні контури мають дотикаються із двома прямими шляхами, тому відповідно до формули Мейсона (A.1) передатна функція шуканої ділянки знаходиться як:

$$\frac{e_\omega}{\omega_{soll}} = \frac{W_1 + W_2}{1 - (W_I + W_{II} + W_{III} + W_{IV}) + W_I W_{IV}}. \quad (A.8)$$

Після виконання усіх математичних операцій у середовищі MATLAB отримано поліном:

$$\frac{e_\omega}{\omega_{soll}} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{Z(s)}{N(s)}, \quad (A.9)$$

де $b_1 = T_M - \hat{T}_M$;

$$b_2 = T_B (T_M - \hat{T}_M);$$

$$a_0 = K_B;$$

$$a_1 = \hat{T}_M + K_B \hat{T}_M;$$

$$a_2 = \hat{T}_M T_B + T_M \hat{T}_M + K_B T_M T_B;$$

$$a_3 = T_M \hat{T}_M T_a + T_M \hat{T}_M T_B;$$

$$a_4 = T_M \hat{T}_M T_a T_B.$$

Чутливість вихідної помилки спостереження швидкості $\partial e_\omega / \partial \hat{T}_M$ визначається як:

$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} = \omega_{soll} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_M} \frac{Z(s)}{N(s)}. \quad (A.10)$$

Похідна від виразу (A.9) за \hat{T}_M рівна:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \hat{T}_M} \frac{Z(s)}{N(s)} = & -\frac{T_B s^2 + s}{N(s)} - \\ & - \frac{(T_M - \hat{T}_M)(T_B s^2 + s)(b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s)}{N(s)^2}, \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

де $b_1 = K_B$;

$$b_2 = T_B + T_M;$$

$$b_3 = T_M T_a + T_M T_B;$$

$$b_4 = T_M T_a T_B.$$

У виразі (A.11) другий доданок містить різницю оціненої і дійсної електромеханічних сталих часу і не може бути розрахованим, оскільки оцінене значення буде шуканим. При рівності дійсного та оцінюваного значень $T_M = \hat{T}_M$ другий доданок перетворюється в нуль, тому він до розгляду не буде прийматись. Враховуючи це, перепишемо вираз для чутливості вихідної помилки оцінювання швидкості (A.10) у наступному вигляді:

$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} = -\omega_{soll} \frac{T_B s^2 + s}{N(s)}. \quad (\text{A.12})$$

Знаменник виразів (A.10)-(A.12) містить також шукану електромеханічну сталу T_M . Оскільки електромеханічна стала ідентифікується у часі, її величина має бути заведена як зовнішній сигнал. Сигнал заданої кутової швидкості ω_{soll} доцільно замінити на сигнал дійсної кутової швидкості, так як наступне підвищить точність та швидкодію ідентифікації.

Відповідно до формули Мейсона визначимо передатну функцію прямого шляху(розімкненої системи) від ω_{soll} до ω_{ist} , враховуючи що наявний тільки один прямий шлях від входу ω_{soll} до виходу ω_{ist} [7]:

$$W_G = \frac{\omega_{soll}}{\omega_{ist}} = \frac{1}{T_M s(T_a s + 1)}. \quad (\text{A.13})$$

Тільки один із чотирьох контурів не стикається із цим шляхом. Тоді виведемо за формулою Мейсона передатну функцію від бажаної до реальної швидкості:

$$\frac{\omega_{ist}}{\omega_{soll}} = \frac{W_G(1-W_I)}{1-(W_I+W_{II}+W_{III}+W_{IV})+W_I W_{IV}}. \quad (A.14)$$

Після підстановки рівнянь (A.2)-(A.5) та (A.13) у вираз (A.14) отримано:

$$\frac{\omega_{ist}}{\omega_{soll}} = \frac{T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B}{N(s)}. \quad (A.15)$$

Виразимо із виразу (A.15) значення завдання швидкості як:

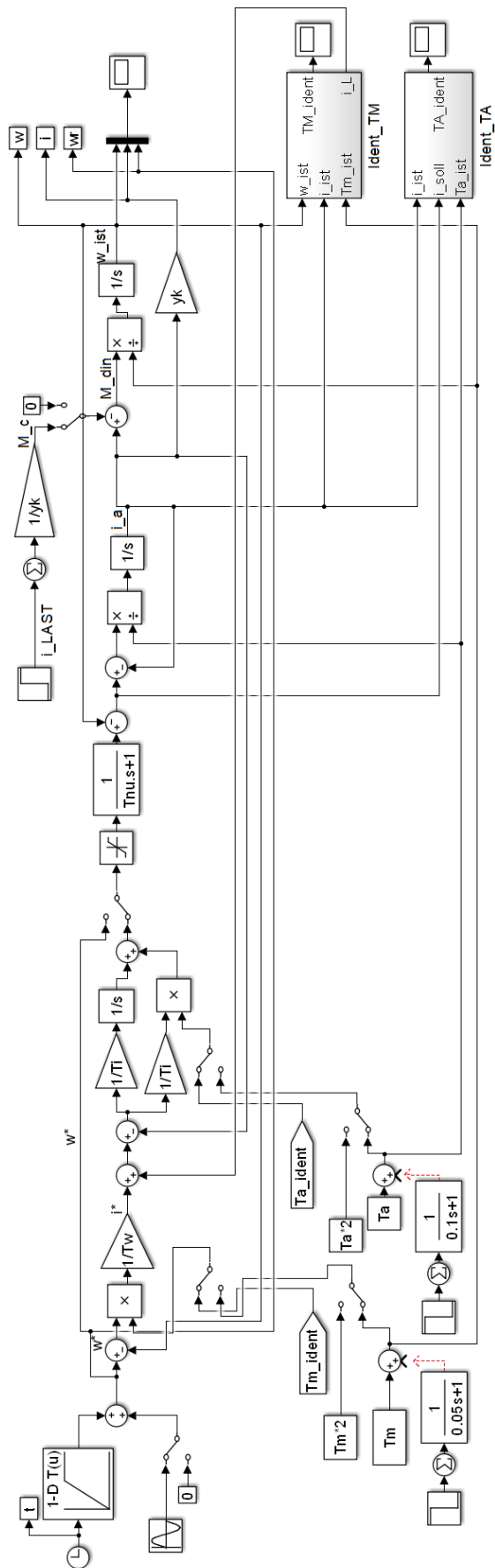
$$\omega_{soll} = \omega_{ist} \frac{N(s)}{T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B}. \quad (A.16)$$

Для отримання кінцевого виразу для чутливості помилки оцінювання швидкості слід підставити отриманий вираз для заданої швидкості (A.16) у (A.12).

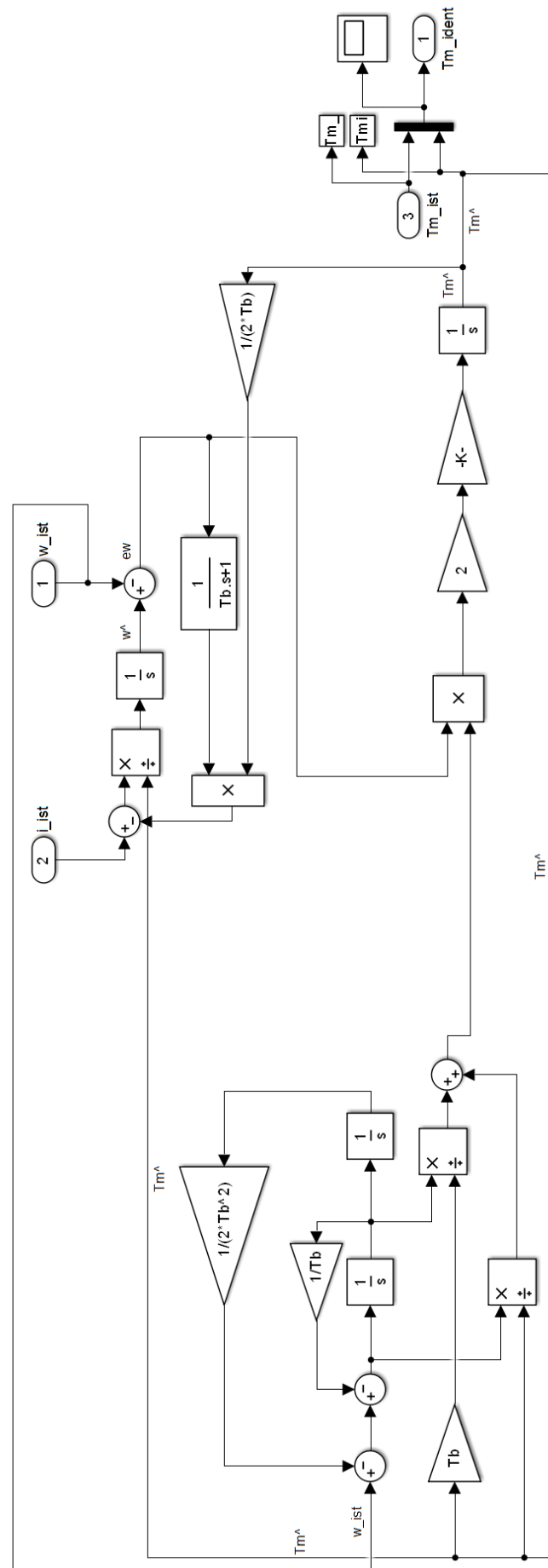
$$\begin{aligned} \frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} &= -\omega_{ist} \frac{T_B s^2 + s}{N(s)} \frac{N(s)}{T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B} = \\ &= -\omega_{ist} \frac{T_B s^2 + s}{T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + K_B}. \end{aligned} \quad (A.17)$$

Електромеханічна стала T_M є змінною величиною, що входить до знаменника і має бути «заведена» як зовнішній сигнал. Щоб реалізувати вираз (A.17) як передатну функцію поділимо знаменник і чисельник на $\hat{T}_M T_B$ та замінімо K_B відповідно до виразу (2.31):

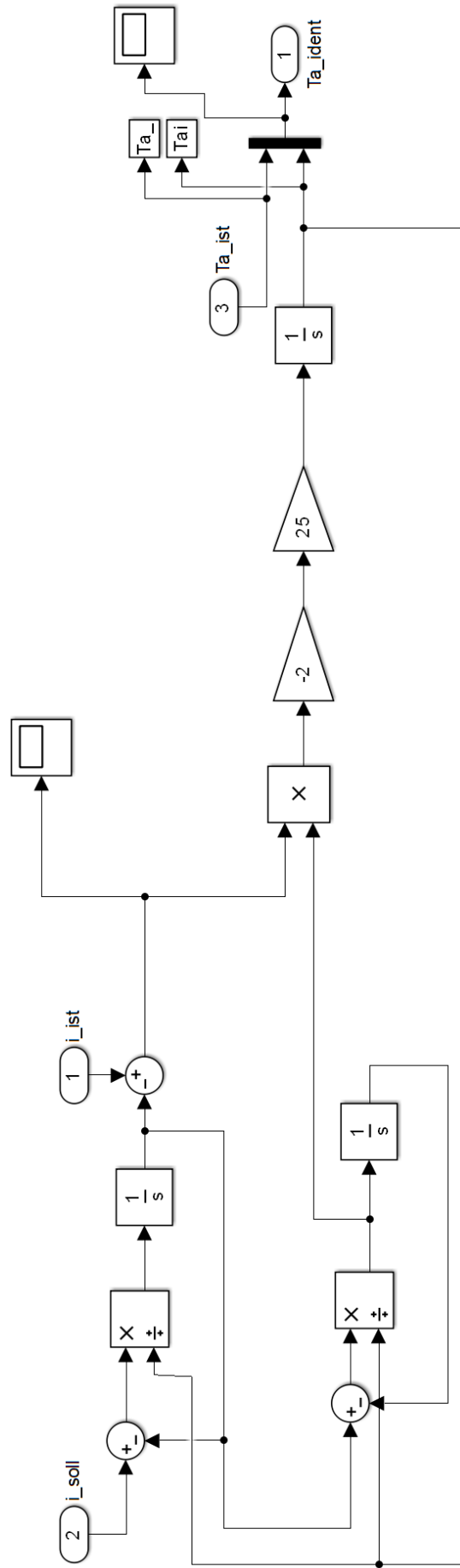
$$\frac{\partial e_\omega}{\partial \hat{T}_M} = -\omega_{ist} \frac{(T_B s^2 + s) / T_B \hat{T}_M}{(T_B \hat{T}_M s^2 + \hat{T}_M s + \hat{T}_M / 2T_B) / T_B \hat{T}_M} = -\omega_{ist} \frac{\frac{1}{\hat{T}_M} s^2 + \frac{1}{T_B \hat{T}_M} s}{s^2 + \frac{1}{T_B} s + \frac{1}{2T_B^2}}. \quad (A.18)$$



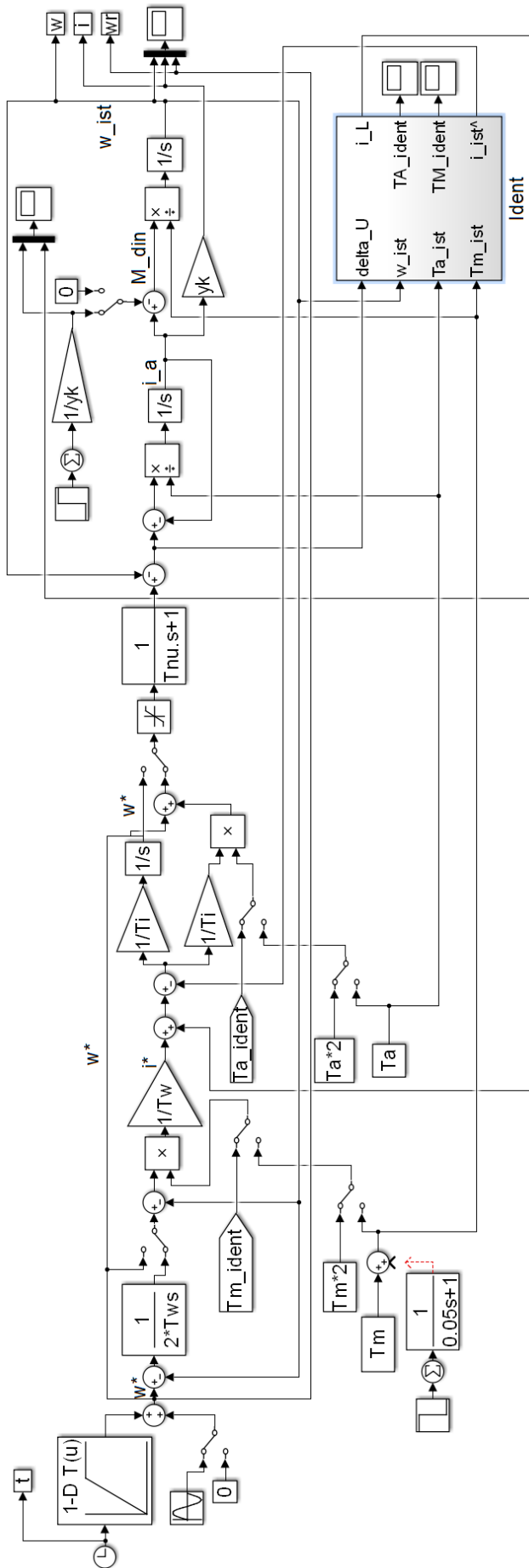
Вигляд моделі дослідження параметричної ідентифікації із використанням дійсного значення струму якоря



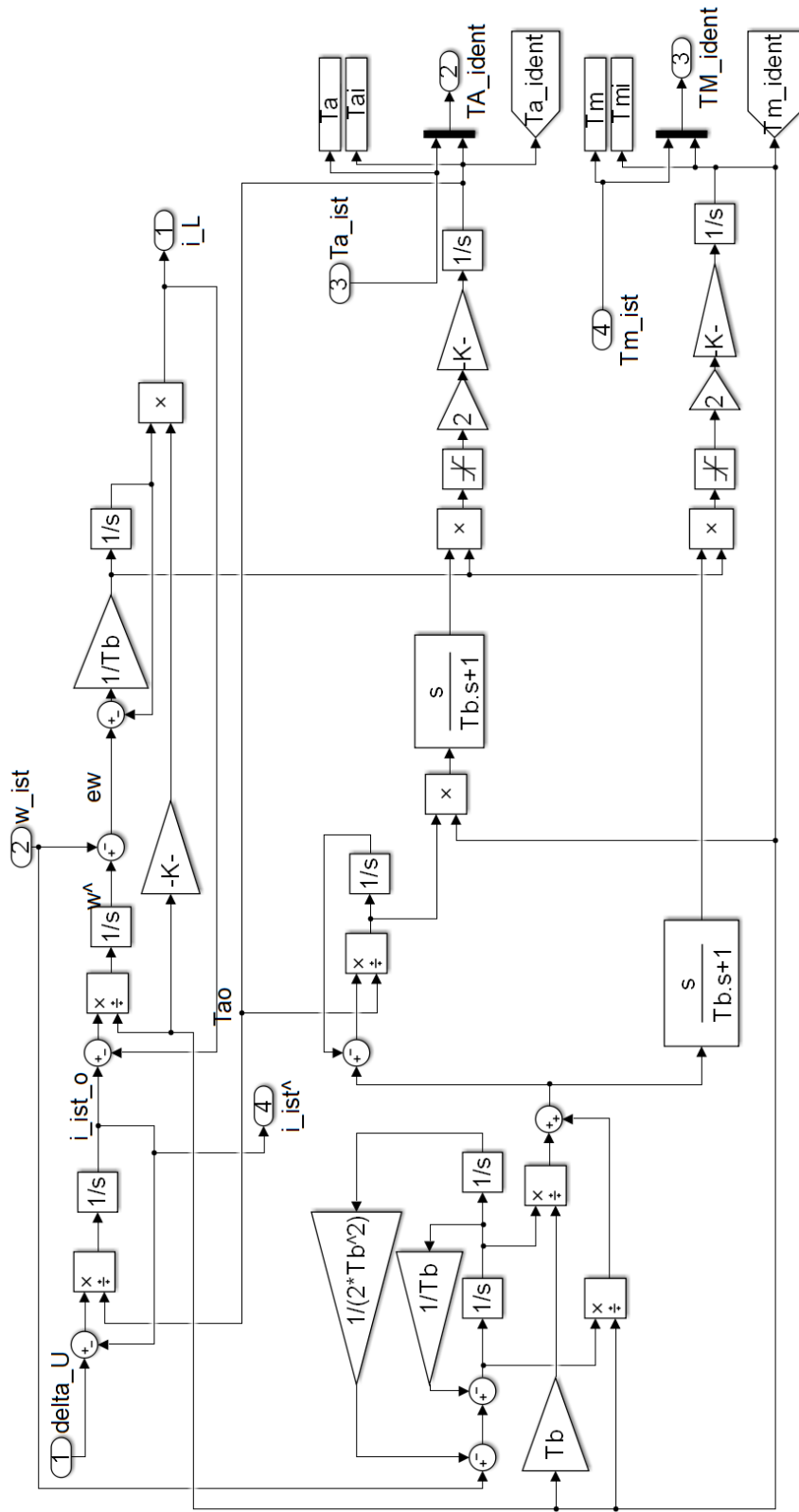
Вигляд блоку ідентифікації електромеханічної сталої часу Ident_TM в моделі дослідження параметричної ідентифікації із використанням дійсного значення струму якоря



Вигляд блоку ідентифікації електромагнітної сталої часу `Ident_TA` в моделі дослідження параметричної ідентифікації із використанням дійсного значення струму якоря



Вигляд моделі дослідження параметричної ідентифікації без використання дійсного значення струму якоря



Вигляд блоку ідентифікації сталих часу Ident в моделі дослідження параметричної ідентифікації без використання дійсного значення струму якоря