

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної магістерської роботи
ступінь вищої освіти магістр

галузі знань 14 Електрична інженерія

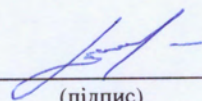
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему Оптимальна система керування електроприводом
механізму переміщення козлового крану

Виконав: студент групи ЕЕ-22дм

Горлов І. І.

(прізвище, та ініціали)



(підпис)

Керівник

доц. Руднев Є. С.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри

доц. Руднев Є. С.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Рецензент

доц. Іванов В. Г.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Київ 2023 р.

Факультет Інженерії
Кафедра Електричної інженерії
Ступінь вищої освіти магістр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
(шифр і назва)
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕІ

доц. Руднев Є. С.
“ ” 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Горлову Іллі Іллічу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимальна система керування електроприводом
механізму переміщення козлового крану

керівник проекту Руднев Є. С. д-р. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “23” 10 2023 р. № 564 / 15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 8 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту Технологія роботи. Кінематична схема механізму.
Технічні, технологічні та конструктивні дані. Вимоги до системи електроприводу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Постановка задачі синтезу системи релейного керування електроприводом. Математичний опис об'єкта курування та його технологічні данні. Вибір обладнання для реалізації системи електроприводу. Синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Кінематична схема, технічні данні та навантажувальна діаграма (лист 1-2).
Принципова схема силової частини електропривода (лист 3-4). Функціональна схема та конструкція ЕП (лист 5). Структурна схема та математична модель релейної системи керування ЕП (лист 6). Графіки перехідних процесів (листи 7-8).

6. Консультанти розділів проекту

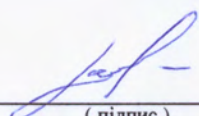
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	доц. Руднев Є. С.		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	1-2 тиждень	
2	Постановка задачі синтезу системи релейного керування електроприводом	3 тиждень	
3	Математичний опис об'єкта курування та його технологічні данні	4-5 тиждень	
4	Вибір обладнання для реалізації системи електроприводу	6-7 тиждень	
5	Синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом	8-9 тиждень	
6	Оформлення пояснювальної записки та демонстраційного матеріалу магістерської роботи	10 тиждень	

Студент


 (підпис)

Горлов І. І.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

(підпис)

Руднев Є. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Оптимальна система керування електроприводом механізму переміщення козлового крану», містить 98 сторінки, 36 рисунків, 70 найменування літературних посилань.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та механічні процеси в електроприводі постійного струму та підвищення показників якості його роботи (мінімізація статичної й динамічної помилок відпрацювання швидкості).

Предметом дослідження є електропривод постійного струму механізму переміщення козлового крану з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Методи досліджень. При рішенні поставлених завдань використовувалися загальні методи автоматичного керування, чисельного рішення систем диференціальних рівнянь, методи математичного аналізу і математичного моделювання, метод аналітичного конструювання регуляторів, метод найменших квадратів. Перевірка основних теоретичних положень і результатів виконувалася з використанням чисельного моделювання шляхом застосування пакетів розширення системи MATLAB / Simulink.

Розроблено електропривод за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму. Синтезовані дві системи керування: система підпорядкованого керування з безперервними регуляторами (ПІ-регулятора струму та П-регулятора швидкості) і релейна система оптимального керування. В середовищі MATLAB розроблені моделі систем електропривода та програмні коди розрахунку параметрів регуляторів релейної системи.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, КРАН, ПЕРЕМІЩЕННЯ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РЕЛЕЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ.....	11
1.1 Опис конструкції.....	11
1.2 Кран козловий грейферний типу ККД г/п 15т.....	13
1.3 Механізм пересування крана.....	16
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	18
2.1 Вимоги, які висуваються до електроприводів і системи електропостачання.....	18
2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна	21
3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	29
3.1 Вибір комплектного електроприводу	29
3.2 Вибір струмообмежувального реактора.....	40
3.3 Вибір згладжувального реактора	40
3.4 Розрахунок параметрів об'єкта керування.....	42
4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ...	44
4.1 Математичний опис об'єкта управління.....	44
4.2 Розрахунок регулятора струму	47
4.3 Розрахунок регулятора швидкості	50
4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості.....	54
5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB / SIMULINK.....	56
6 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ В ПРОСТОРИ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ	68
6.1 Синтез регулятора струму в просторі природних координат.....	69
6.2 Синтез регулятора швидкості в просторі природних координат.....	74
6.3 Математичне моделювання електроприводу з релейною системою управління	81

ВИСНОВОК	4
ВИСНОВОК	90
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	91

ВСТУП

На сучасному етапі козлові крани представляють собою найбільш розповсюджений вид кранів, широко використовуваний у будівництві та виробництві. Їхня велика популярність пояснюється практичністю, доступною ціною, значною вантажопідйомністю та простотою у використанні. В порівнянні з баштовими та гусеничними кранами з аналогічною вантажопідйомністю, козлові крани вигідніше за ефективністю праці та експлуатаційними витратами. Ці крани широко використовуються для обслуговування складів, завантаження, розвантаження, монтажу та демонтажу будівельних і промислових споруд, а також в суднобудуванні та обслуговуванні ГЕС.

Стандартні козлові крани мають вантажопідйомність від 5 до 60 тонн та прольот від 10 до 50 метрів. Однак існують і нестандартні моделі, здатні піднімати та переміщувати вантажі вагою від 60 до 500 тонн. Завдяки своєму пристрою, козлові крани можна використовувати в різних умовах. Вони базуються на конструкції балочного мосту, закріпленого на рейковому шляху та талі. Рух цих кранів забезпечується електродвигуном, встановленим на галереї мосту. Крани включають опори, пролітну балку, таль з механізмом переміщення, електрообладнання, хідові візки та пульт або кабінку управління.

Козлові крани розрізняються за призначенням на універсальні та спеціальні. Універсальні крани служать для обслуговування будівельних і складських майданчиків з схожими умовами. Вони мають довжину прольоту від 12 до 32 метрів, висоту підйому вантажу від 7 до 9 метрів і робочий виліт консолі в межах 6-8 метрів. Застосовуються також крани з жорсткими та жорстко-еластичними опорами, які різняться конструкційною складністю та зменшенням згинальних моментів від навантаження. Тривалість служби козових кранів оцінюється в 20-25 років.

Для козових кранів можуть бути використані різноманітні вантажозахватні пристрої, такі як грейфер, крюк та магніт. Грейфер, що

представляє собою черпак, прикріплений до підйимального механізму крана, призначений для захоплення та вивантаження різних матеріалів, таких як вугілля, кокс, пісок, земля, гірські породи і інше. Крюк використовується для переміщення штучних вантажів, закріплених на тросах. Магніт призначений для пересування металевих вантажів.

У сучасний період автоматизації технологічних процесів спостерігається тенденція до пошуку загальних принципів синтезу систем керування для складних об'єктів. Цей підхід, в максимальній мірі враховуючи та використовуючи властивості об'єкта керування, спрямований на досягнення ефективності. Саме в цьому напрямку можливе виникнення нових принципів і законів управління, які, нарівні з забезпеченням високої якості керування, гарантують високі техніко-економічні показники системи. Проте, в нелінійному світі не існує загальних шляхів або універсальних методів, які були б характерні для лінійної теорії управління. Кожна нелінійність є унікальною і породжує свої власні методи синтезу.

Серед нелінійних об'єктів управління визначне місце належить автоматизованим електроприводам (ЕП), які забирають більше 60% усієї споживаної енергії у промислово розвинених країнах [7-12]. Приблизно третина виробленої електроенергії сьогодні використовується на виробництво, часто невідновної, первинної енергії, а споживання електроенергії продовжує зростати. Таким чином, важливою є задача ефективного використання електроенергії та вирішення управлінських завдань із мінімальними енергетичними витратами. Один із можливих методів для вирішення цієї задачі - це алгоритмічний підхід, тобто розробка алгоритмів керування електроприводами, які гарантують виконання управлінських завдань із мінімальними втратами електроенергії [13-18].

У сучасний період найбільш обіцянковими щодо ККД та компактності конструкції є електроприводи на основі змінного струму, які живляться від силових напівпровідникових перетворювачів напруги. Проте електроприводи

постійного струму залишаються широко використовуваними на існуючих підприємствах, зокрема на металургійних комбінатах.

Типовою особливістю цих електроприводів є релейна нелінійність, що обумовлена операцією сучасних силових пристроїв, які переважно працюють в «ключовому режимі» для мінімізації втрат енергії [8-9, 11, 15-16, 19-22]. Такі динамічні системи є фундаментально нелінійними, описуваними диференціальними рівняннями з режимами керування з розривом. Тому їх часто називають релейними системами або системами із розривним керуванням.

Історія релейних систем налічує значно більше років, ніж існування напівпровідникових пристроїв. Своєрідний виток цієї історії відзначається винайденням релейного зворотного зв'язку, яке було вперше застосовано Ч. Шофілдом у 1836 році [14, 23, 24]. Навіть не зважаючи на тенденцію релейних систем до автоколивань, їх висока динамічна стабільність та здатність до самоадаптації при зміні параметрів і навантаження роблять їх дуже привабливими. Ця комбінація простоти в реалізації і високої функціональності призвела до широкого поширення релейних систем, що в свою чергу визначило створення та розвиток теорії цих систем.

На етапі свого становлення теорія релейних систем в першу чергу визначалася внеском видатних вчених, таких як А.А. Андронов [25], Я.З. Ципкін [24, 26] та І.Флюгге-Лотц [27, 28]. З часом ця теорія розгалужилася на самостійні напрямки, що визначили нові перспективи в розвитку автоматичного керування. Зокрема, з'явилися та виокремилися два ключових напрямки:

Перший напрямок - теорія нелінійних систем автоматичного керування з різноманітними видами модуляції [29-32]. Цей напрямок глибоко досліджує аспекти, пов'язані з нелінійною динамікою систем та різними методами модуляції. Застосування цієї теорії дозволяє розуміти та керувати системами, які проявляють нелінійні властивості у різноманітних умовах.

Другий напрямок - теорія систем автоматичного керування зі змінною структурою [33-35]. Цей напрямок фокусується на системах, які можуть змінювати свою структуру в залежності від змінних умов чи завдань. Такий підхід є дуже актуальним в умовах, де динаміка системи змінюється з часом або потребує адаптації до різноманітних сценаріїв.

Таке диференціювання та спрямування досліджень вказують на постійний розвиток теорії релейних систем та її важливість в сучасних технологічних застосуваннях.

Саме академік С.В. Ємельянов, який виховав цілу групу видатних вчених, є ключовою постаттю в становленні та розвитку теорії систем автоматичного керування. Його наукова школа внесла значний внесок у цю галузь. Засновник теорії висловив головну ідею, яка полягає в використанні ковзного режиму для синтезу систем автоматичного керування. Ковзний режим є спеціальним видом руху, що виникає в релейних системах при певних умовах і властивий саме їм. Цей режим забезпечує високу якість керування в динамічних системах, інваріантність до зовнішніх збурень та малу чутливість до змін динамічних властивостей об'єкта управління.

Далі, теорія систем змінною структурою розширилася і узагальнилася до теорії систем з розривними управліннями [36-41] та теорії бінарних систем [1-2, 7]. Перша з цих гілок ґрунтується на використанні багатовимірного змінного режиму в просторі стану для вирішення завдань керування. З свого боку, друга теорія базується на принципі бінарної природи сигналів в нелінійних динамічних системах, дозволяючи впроваджувати синтез оператора стабілізуючого зворотного зв'язку на допоміжну нелінійну систему. Це відкриває нові можливості для розвитку та застосування в сучасних технологічних вирішеннях.

Можливості та перспективи використання ковзних режимів для управління електроприводами на базі напівпровідникових перетворювачів напруги з релейними регуляторами отримали широке визнання [42-45]. Це особливо помітно, оскільки не лише фахівці з контролю, але й експерти в

галузі електроприводу звертаються до релейних принципів керування, заснованих на ковзних режимах [46-49]. Використання цих принципів визначено прогресом у напівпровідниковій техніці та переходом до силових напівпровідникових перетворювачів напруги або струму, елементи яких працюють у ключовому (релейному) режимі.

Розвиток силової напівпровідникової техніки призвів до виникнення нових видів високочастотних силових пристроїв, базованих на технологіях MOSFET і IGBT. Це відкрило широкі можливості для створення та удосконалення провідникових перетворювачів електричної енергії, що в свою чергу є основою для будівництва автоматизованих електроприводів. Упродовж останнього десятиліття ці технології все активніше використовують багатовимірне релейне керування, зокрема в контурі регулювання фазних струмів електродвигуна. Свідченням цього є зростаюча кількість наукових публікацій.

Зазначимо, що різні дослідження називають цей вид керування різними термінами: «релейне керування» [8, 9], «розривне керування» [19, 50], частотно-токове керування, «керування на ковзних режимах», "hanging control", "hysteresis current control", current forced control, direct torque control і т.д. З точки зору максимального зрозуміння процесів, що відбуваються при використанні цього типу керування, більш практичним є термін «керування на ковзних режимах».

Об'єктом дослідження є комплекс електромагнітних та механічних процесів, що відбуваються в електроприводі постійного струму та підвищення показників якості функціонування цього електроприводу, зосереджуючись на мінімізації як статичних, так і динамічних помилок в режимі швидкості.

Предметом дослідження є електропривод постійного струму механізму переміщення козлового крану з оптимальною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Метою роботи є синтез релейної системи керування електроприводом

механізму переміщення козлового крану, яка має необхідні (високі) показники якості в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- розрахувати та вибрати двигун та силове обладнання електропривода;
- синтезувати регулятори класичної системи підпорядкованого керування;
- синтезувати релейні регулятори, структура яких реалізована на доступних технічних засобах та забезпечують необхідні динамічні і статичні показники електропривода механізму ножиць поперечного різання;
- провести аналіз роботи синтезованих систем за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях у середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink;
- визначити залежності показників якості релейної системи від параметрів об'єкта керування.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ

1.1 Опис конструкції

Крани козлові грейферні спеціально призначені для операцій з перевантаження сипучих і навалочних вантажів, використовуючи різні види грейферів, такі як канатний або приводний ковшовий грейфер, або моторний і електрогідравлічний грейфер. В області видобування і переміщення матеріалів ці крани є незамінними. На рисунку 1.1 можна побачити загальний вигляд козлового грейферного крана, який ілюструє його конструкцію та основні елементи. Ці крани володіють вражаючою функціональністю, яка дозволяє використовувати різноманітні види грейферів для ефективного та точного вантажопідйому та вивантаження. Їхні конструкції ретельно пристосовані до різноманітних завдань вантажоперевезення, що забезпечує високий рівень продуктивності та безпеки в роботі.



Рисунок 1.1 - Грейферний козловий кран

Крани, обладнані багаточелюстковим канатним або приводним грейфером, використовуються для вантажопідйому та перевантаження складних конструкцій з чорних і кольорових металів. Канатні грейфери можуть мати різні характеристики, включаючи можливість розкриття щодо підкранових колій, які можуть бути як поздовжні, так і поперечні. Ці крани знаходять своє використання, зазвичай, на великих складах, спеціалізованих у

сипучих і навалочних вантажах, де потрібно оптимізувати рух великих обсягів вантажів.

Грейферні крани широко використовуються в металургійній і вугільній промисловості, а також в сфері виробництва будівельних матеріалів та обробки вторинного сировини з чорних і кольорових металів. Основний параметр, що характеризує їхню продуктивність, - це вантажопідйомність, яка визначається сумарною масою вантажу та грейфера, що використовується в операціях підйому та перенесення.

У таблиці 1.1 наведені основні технічні характеристики козлових грейферних кранів.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики козлових грейферних кранів

Найменування параметрів і розмірів		Величина (діапазон) параметра
Вантажопідйомність, т	підйом 1 (грейфера)	5,0 ... 75
	-	-
Проліт, м		8 ... 70
Консолі, м		до 15
Швидкість механізму, м / с (м / хв)	підйом 1 і 2	0,125 ... 1,5 (7,5 ... 90)
	пересування візка	0,2 ... 2,0 (12,0 ... 120)
	пересування крана	0,2 ... 2,0 (12,0 ... 120)
Частота обертання вантажозахоплювального органа (вантажного візка), об / хв		-
Висота підйому від рівня головки підкранової рейки, м		до 30
Глибина опускання від рівня головки підкранової рейки, м		до 20
Максимальне навантаження на колесо, кН		100 ... 500 задається замовником
Група класифікації (режиму) роботи крана по ISO 4301-1: +1986		A6 ... A8 (6К-8К)

1.2 Кран козловий грейферний типу ККД г/п 15т

Козловий грейферний кран типу ККД з вантажопідйомністю 15 т розроблений для здійснення операцій вантажно-розвантаження штучних, сипучих або навалочних матеріалів на матеріальних базах і складах. Використовується для цих цілей як канатний, так і моторний ковшовий грейфер.

Грейферні крани даного типу широко використовуються в металургійній і вугільній промисловості, а також у виробництві будівельних матеріалів та підприємствах, що спеціалізуються на обробці вторинного сировини з чорних і кольорових металів. Технічні характеристики ККД-15 подаються в таблиці 1.2 для детальнішого ознайомлення з параметрами та можливостями цього крана.

Таблиця 1.2 -Технічні характеристики козлового грейферного крана ККД-15

характеристика	значення
1	2
Вантажопідйомність, т	15
Ємність грейфера V, м ³ і насипна щільність вантажу g, т / м ³ :	
- V = 3 м ³	2,0 <g <2,5
- V = 4 м ³	1,5 <g <1,8
- V = 5 м ³	1,0 <g <1,5
Група режиму роботи крана по ІСО 4301/1	A4
Підведення живлення:	
- до візка	гнучкий кабель
- до крана	гнучкий кабель
Маса крана, т	150
Тиск на підкранових шлях, кН	350
Тип підкранової рейки	P65 ГОСТ8161
Швидкість пересування, м / с (м / хв):	
- крана	0,43 (25,8)
- візки	0,6 (36)
Сумарна номінальна потужність електродвигунів, встановлених на крані, кВт, не більше	215
Механізм підйому і замикання грейфера:	
- швидкість підйому, м / с (м / хв)	0,42 (25)
- група режиму роботи крана по ІСО 4301/1:	M5
- швидкість замикання грейфера, м / с (м / хв)	0,21 (12,5)

Зовнішній вигляд і габаритні розміри козлового грейферного крана г/п 15т наведені на рисунку 1.2.

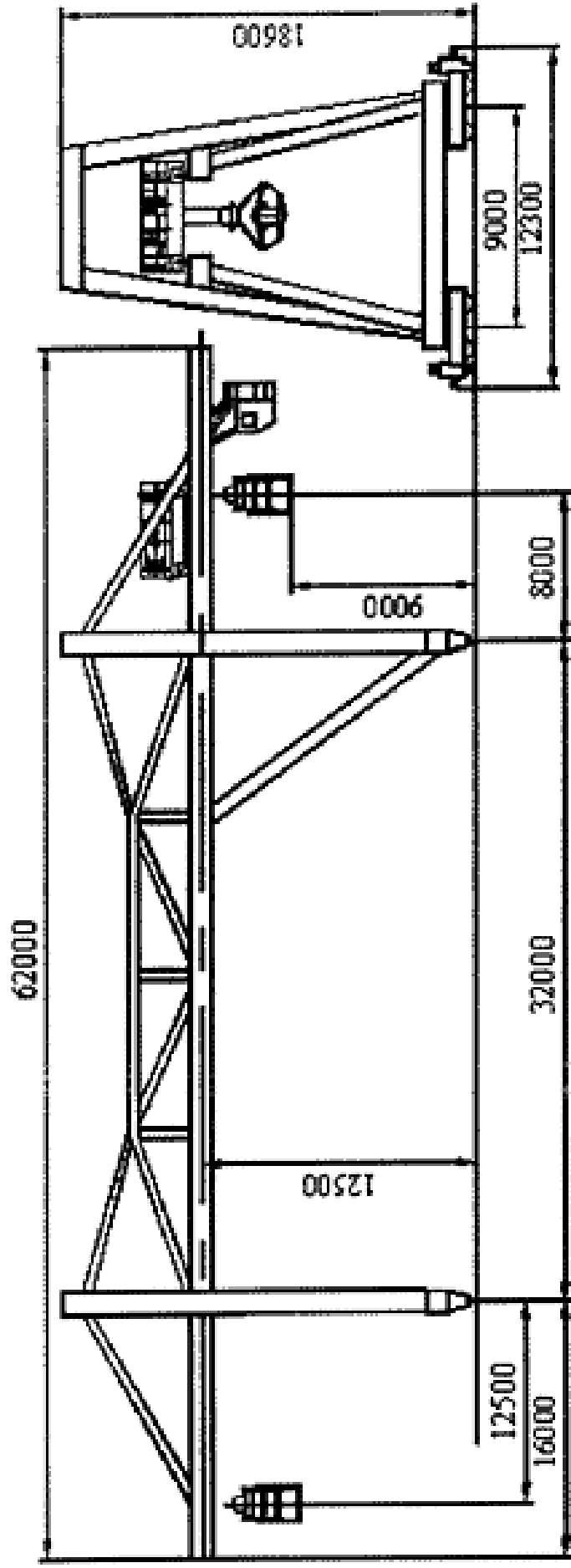


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд і габаритні розміри козлового грейферного крана г / п 15т

1.3 Механізм пересування крана

На рисунку 1.3 наведено конструкцію ходового візка козлового крана. Всі вузли та механізми візка розміщені на рамі трапецеподібної форми, з малою основою, що звернута вниз. Рама складається з чотирьох вертикальних стінок, які зварені до верхнього та нижнього майданчиків. В похилих гранях стінок варені напівгнізда для буксових вузлів.

Візок обладнаний двома ходовими колесами: ведучим і веденим. Зубчасті вінця пресуються і закріплені на маточинах коліс. Ведуче колесо прикріплене до вала через сферичні самоустановлювальні підшипники кочення, які вставлені в буксові вузли. Також, але на цьому разі на осі, закріплене ведене колесо. Передача обертання від ведучого колеса до веденого здійснюється за допомогою зачеплення їх зубчастих вінців з проміжним зубчастим колесом. Останнє обертається на спарених підшипниках кочення відносно нерухомої осі, закріпленої в стінках рами.

Вал ведучого колеса пов'язаний з вихідним валом вертикального редуктора. Обертання швидкоходового валу редуктора передається електродвигуну через зубчасті муфти і вал-вставку, які захищені кожухом. Муфта виготовлена з вбудованим гальмівним шківом, на якому розміщено гальмо.

На рисунку 1.3 застосовані наступні позначення:

1 – зубчаста муфта; 2 – кожух муфти; 3 – вал-вставка; 4 – муфта шків;
 5 – гальма; 6 – електродвигун; 7 – планка кріплення осі; 8 – захисний козирок;
 9 – редуктор; 10 – кожух гальма; 11 – щоки балансірні; 12 – рама візка;
 13 – буксових вузол; 14 – ведуче ходове колесо; 15 – зубчастий вінець;
 16 – підшипник; 17 – вал; 18 – проміжне зубчасте колесо; 19 – вісь;
 20 – підшипники; 21 – ведене ходове колесо.

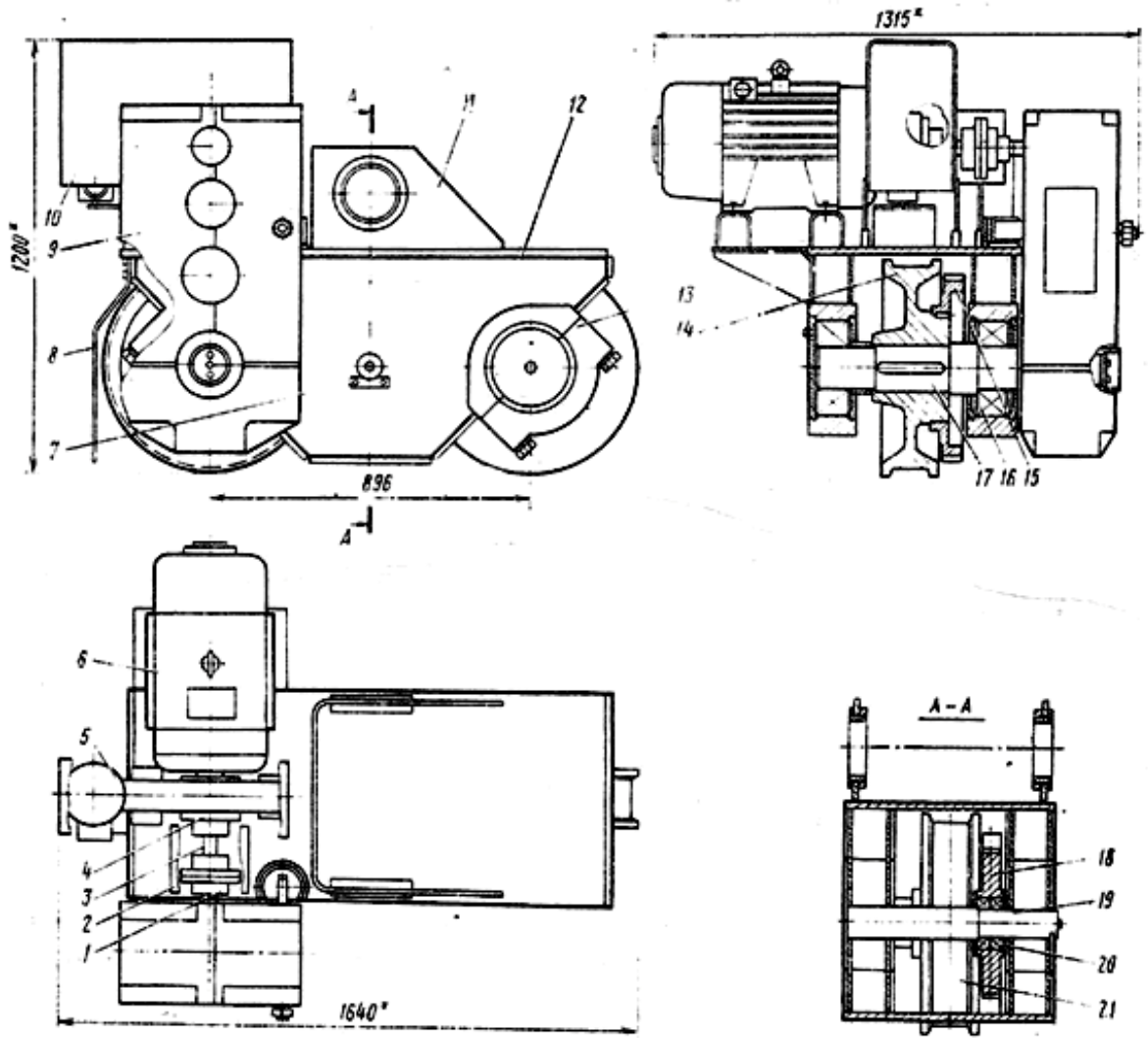


Рисунок 1.3

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Системи управління електроприводом та механізмів переміщення повинні гарантувати наступне: ефективні прискорення та уповільнення, які відповідають умовам технологічного процесу; надійне механічне гальмування в аварійних ситуаціях; ефективне робоче електричне гальмування, що уникне небезпечного розгойдування вантажів; можливість регулювання швидкості переміщення в потрібному діапазоні; безперешкодний розгін механізму із запобіганням пробуксовування ходових коліс та відсутність проблем при гальмуванні.

Для механізмів переміщення кранів у режимах "Т" і "ВТ" використовуються системи електроприводів як постійного, так і змінного струму.

2.1 Вимоги, які висуваються до електроприводів і системі електропостачання

2.1.1 Вимоги, які висуваються до електродвигунів підйомних установок.

В залежності від конкретних операцій підйомних пристроїв, до привідних двигунів висуваються різноманітні вимоги, які визначають їх ефективність та надійність. Основні критерії включають:

1) Забезпечення можливості безперебійного пуску механізму, здатність до реверсу напрямку руху вантажів та точне зупинення механізмів з необхідною точністю.

2) У деяких випадках необхідність регулювання швидкості руху відповідно до вимог технологічних процесів.

3) Створюваний момент двигуна повинен відповідати вимогам для повноцінної роботи механізму з заданою інтенсивністю.

4) При визначених частоті та кількості запусків в годину, не повинно

відбуватися перегрів обмоток двигуна, що може спричинити тривалий зупин підйомного механізму.

5) Для особливих умов експлуатації (підвищена температура, велика вологість, наявність газів і парів хімічних речовин, забруднення навколишнього середовища, можливість вибухонебезпечних сумішей тощо), двигун повинен мати конструкцію, а його обмотки – термостійку та просиростною ізоляцію.

6) Привідний двигун повинен мати мінімальні махові маси, які значно впливають на перебіг перехідних процесів, особливо при частих запусках.

7) В умовах інтенсивної експлуатації та неможливості тривалого зупину за технологічними умовами, повинна бути передбачена можливість швидкої заміни двигуна; в окремих випадках корпус двигуна повинен бути роз'ємним.

8) Потужність привідного двигуна повинна відповідати потужності підйомної установки, мати необхідну перевантажувальну здатність та підвищену механічну міцність.

9) Напряга двигуна повинна відповідати напрузі мережі живлення; коливання напруги повинні бути враховані при розрахунку потужності двигунів, особливо змінного струму, для яких зниження напруги сильно впливає на їх пускові та перевантажувальні можливості.

10) Конструктивні особливості двигунів повинні бути враховані з урахуванням безпеки та легкості обслуговування.

З поданого переліку основних вимог, які пред'являються до привідних двигунів, можна вбачити, наскільки важливим є визначення реальних умов, в яких буде функціонувати дане обладнання. Перед вибором типу двигуна слід детально проаналізувати всі можливі фактори, які впливають на його роботу, а, отже, і на ефективність підйомної установки. Важливо усвідомлювати, що зупинка підйомного механізму може викликати припинення роботи не лише безпосередньо пов'язаних механізмів виробничого цеху, але й вплинути на функціонування кількох цілих виробничих підрозділів. Перед прийняттям рішення щодо вибору двигуна необхідно ретельно розглянути всі аспекти, що

можуть відзначитися на роботі системи.

2.1.2 Вимоги які висуваються до автоматичного керування електроприводами

Механізми мостових кранів оперують у високозавантажених умовах, що характеризуються інтенсивним числом включень в годину, швидкими перехідними процесами при розгоні, гальмуванні, реверсуванні, супроводжуючись значущими моментами навантаження тощо. Необхідно також забезпечити високу надійність всіх механізмів крана. Оскільки потужності електродвигунів кранових установок значні, управління ними вручну є складним завданням. Тільки перехід до автоматичного управління електродвигунами механізмів крана може забезпечити оптимальні результати. Основні вимоги до автоматизації управління крановими механізмами можуть бути сформульовані наступним чином:

1) Система автоматичного управління повинна володіти простою структурною схемою.

2) Окремі елементи мають вирізнятися підвищеною надійністю в роботі, легкою заміною та простою конструкцією.

3) У схемі автоматичного управління слід передбачати різноманітні види захисту, такі як від втрати напруги в мережі, перевищення допустимих значень струму або моменту, і від коротких замикань в системі.

4) Пуск двигуна повинен відбуватися відповідно до заданого закону, незалежно від швидкості комутації операторського пристрою.

5) Система повинна перешкоджати пуску двигуна після відновлення напруги мережі, коли командоапарат все ще знаходиться в будь-якому робочому положенні; пуск повинен бути можливий лише після повернення командоапарата в початкове (нульове) положення.

6) При різкому переміщенні рукоятки командоапарата з положення "вперед" в положення "назад" слід передбачити автоматичне плавне

реверсування двигуна зі струмами перемикачів, що не перевищують допустимі значення.

7) При повному відключенні живлення двигунів у схемі слід передбачити механічне гальмування.

8) Система повинна передбачати роздільне керування кожним двигуном механізму (підйом, пересування візка або моста, поворот) від окремого командоапарата.

9) При переміщенні вантажів у всіх напрямках в схемі слід передбачити обмежувачі ходу, які відключають живлення двигунів, коли пересування вантажу стає небезпечним; при роботі декількох кранів в одному прольоті цеху слід передбачити блокування, яке виключає можливість зіткнення кранів.

10) Між пристроями проти викрадення та робочими двигунами пересування крана повинно бути блокування, яке унеможливує включення двигунів пересування при застопореному крані.

11) За необхідності плавного опускання вантажу повинна бути передбачена можливість отримання низьких швидкостей.

12) У схемі слід передбачити блокування, яке дозволяє відключати всю систему живлення крана, якщо на поверхні моста або візка знаходиться людина.

2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна

У процесі вибору двигуна для кранового механізму необхідно враховувати кілька ключових аспектів. Спочатку слід провести аналіз і обрати відповідний тип двигуна. Після цього необхідно розрахувати його роботу в умовах теплового режиму, а також перевірити здатність забезпечити необхідні прискорення, що включають пусковий режим і запас зчеплення для рухливих механізмів.

Однак найбільш складною частиною є розрахунок теплового режиму двигуна. Звичайні методи теплового розрахунку, які використовують

еквівалентні параметри навантаження, такі як струм, момент і потужність, або середні втрати, дають точні результати лише в тому випадку, якщо навантажувальна діаграма роботи електродвигуна відома досить точно. Проте для кранових електроприводів характерною є невизначеність режиму роботи, особливо при використанні кранів закритого типу з підвищеними постійними втратами та ускладненими умовами тепловіддачі. Це призводить до значних похибок при використанні традиційних методів розрахунку. Отже, ефективний вибір і розрахунок двигуна для кранового механізму вимагає вдосконалення методів теплового розрахунку, зокрема при роботі з механізмами, що мають унікальні властивості та умови експлуатації.

Для визначення потужності, яку необхідно забезпечити приводному електродвигуна механізму підйому крана, використаємо метод еквівалентного коефіцієнта корисного дії (ККД) [71]. Цей метод виявляється найбільш повним у врахуванні особливостей функціонування електроприводів кранів.

Метод еквівалентного ККД є надзвичайно ефективним знаряддям для врахування різних нюансів, які супроводжують експлуатацію кранових електроприводів. Цей підхід не лише дозволяє враховувати різноманітні умови роботи, але й забезпечує точність при розрахунках потужності, необхідної для ефективного функціонування механізму підйому крана.

Застосування методу еквівалентного ККД стає важливою ланкою в інженерному підході до оптимізації та вибору електродвигунів для кранових систем.

Максимальна статична потужність, при переміщенні вантажу:

$$\begin{aligned}
 P_c &= \frac{(G + Q) \cdot v_k}{\eta_{\text{мех}}} \cdot \left(\frac{\varphi_n \cdot d_{\text{ст}} + 2 \cdot \mu}{D_k} \cdot K_{\text{рб}} + \beta \right) \cdot g = \\
 &= \frac{(150000 + 15000) \cdot 0.43}{0.85} \cdot \left(\frac{0.015 \cdot 0.1375 + 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}}{0.55} \cdot 1.35 + 0.05 \right) \cdot 9.81 = \quad (2.1) \\
 &= 47098 \text{ (Вт)} = 47,1 \text{ (кВт)}
 \end{aligned}$$

де Q - маса вантажу, що піднімається (вантажопідйомність),

$$Q = 15000 \text{ кг};$$

G - сумарна маса крана, $G = 150000$ кг;

v_k - необхідна швидкість пересування крана: $v_k = 0.43$ м/с;

$\eta_{\text{мех}}$ - ККД механізму пересування, $\eta_{\text{мех}} = 0.85$;

$\varphi_{\text{п}}$ - коефіцієнт тертя в підшипниках кочення маточин коліс,
 $\varphi_{\text{п}} = 0,015$;

D_k - діаметр ходового колеса, $D_k = 0.55$ м;

$d_{\text{ст}}$ - діаметр маточини ходового колеса,

$$d_{\text{ст}} = 0.25 \cdot D_k = 0.25 \cdot 0.55 = 0.1375 \text{ м};$$

μ - коефіцієнт тертя кочення, $\mu = 0.5 \cdot 10^{-3}$;

$K_{\text{рб}}$ - коефіцієнт форми ходового колеса, що враховує тертя реборд ходового колеса, $K_{\text{рб}} = 1.3 \div 1.4$;

β - ухил шляху крана, $\beta = 0.05$;

g - прискорення вільного падіння, $g = 9.81$ м/с².

Статична потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{\text{ст}} = \frac{P_c}{n} = \frac{47,1}{4} = 11.8 \text{ (кВт)} \quad (2.2)$$

де $n = 4$ - кількість приводних візків механізму пересування.

Розрахункова потужність приводу переміщення:

$$\begin{aligned} P_p &= \frac{1}{k_n \cdot \gamma_n} \cdot \left[\frac{(G + Q) \cdot v_k \cdot \alpha' \cdot a}{\eta_{\text{мех}}} + P_c \right] = \\ &= \frac{1}{0.9 \cdot 2} \cdot \left[\frac{(150000 + 15000) \cdot 0.43 \cdot 2 \cdot 0.25}{0.85} + 47098 \right] = \\ &= 49352 \text{ (Вт)} = 49.4 \text{ (кВт)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

де k_n - коефіцієнт використання двигуна по пусковому моменту, згідно [1, табл. 6.2] $k_n = 0.9$;

γ_n - кратність відносини максимального пускового моменту до номінального моменту двигуна, згідно [1, табл. 6.2] $\gamma_n = 2$;

α' - відношення моментів інерції загального до наведеного моменту

інерції поступально двіжущіхся частей, попередньо приймаємо:

$$\alpha' = \frac{J_{\Sigma}}{J'_{\text{пост}}} = 2;$$

а - прискорення крана при пуску, приймаємо $a = 0.25 \text{ м / с}^2$.

Розрахункова потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{\text{pl}} = \frac{P_{\text{p}}}{n} = \frac{49.4}{4} = 12.35 (\text{кВт}) \quad (2.4)$$

Так як $P_{\text{pl}} > P_{\text{cl}}$, то для подальших розрахунків приймаємо P_{pl} . По таблиці 6.5 з [71] коефіцієнт $k_p = 0.75$ для прийнятої системи електроприводу з регульованим перетворювачем. Отже необхідна розрахункова потужність двигуна складе:

$$P_{\text{ном.т1}} = \frac{P_{\text{pl}}}{k_p} = \frac{12.35}{0.75} = 16.47 (\text{кВт}) \quad (2.5)$$

Попередньо вибираємо двигун постійного струму краново-металургійної серії Д806 з паспортними даними наведеними в таблиці 2.1. Дані взяті з [71].

Таблиця 2.1 - Паспортні дані двигуна Д806

1. Номінальна потужність P_{H} , кВт при ПВ, 40%	17
2. Номінальна потужність P_{H} , кВт при ПВ, 25%	20
3. Напруга живлення якоря U_{H} , В	220
4. Струм якоря номінальний I_{H} , А	84
5. Номінальна частота обертання n_{H} , об / мин	710
6. Момент інерції $J_{\text{дв}}$, кг · м ²	1
7. Опір якоря і додаткових полюсів $r_{\text{я}}$, Ом	0,047

Номинальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 710}{30} = 74,3 \text{ с}^{-1}. \quad (2.6)$$

Загальний радіус приведення механізму переміщення складе:

$$R = \frac{V_k}{\omega_H} = \frac{0,43}{74,3} = 0,0058 \text{ м}. \quad (2.7)$$

Приведений момент інерції поступально рухомих мас в розрахунку на один двигун:

$$J'_{\text{пост1}} = \frac{(G + Q)}{n} \cdot R^2 = \frac{(150000 + 15000)}{4} \cdot 0,0058^2 = 1,39 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (2.8)$$

Визначаємо сумарний момент інерції в розрахунку на один двигун:

$$J_{\Sigma 1} = 1,2 \cdot J_{\text{ДВ}} + J'_{\text{пост1}} = 1,2 \cdot 1 + 1,39 = 2,59 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.9)$$

Еквівалентний ККД визначається за формулою:

$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{1 + \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ.Н}}}{\eta_{\text{ЭКВ.Н}}} \cdot \frac{J_{\Sigma 1}}{1,2 \cdot J_{\text{ДВ}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{МАХ}}}{1000} \right)^2}, \quad (2.10)$$

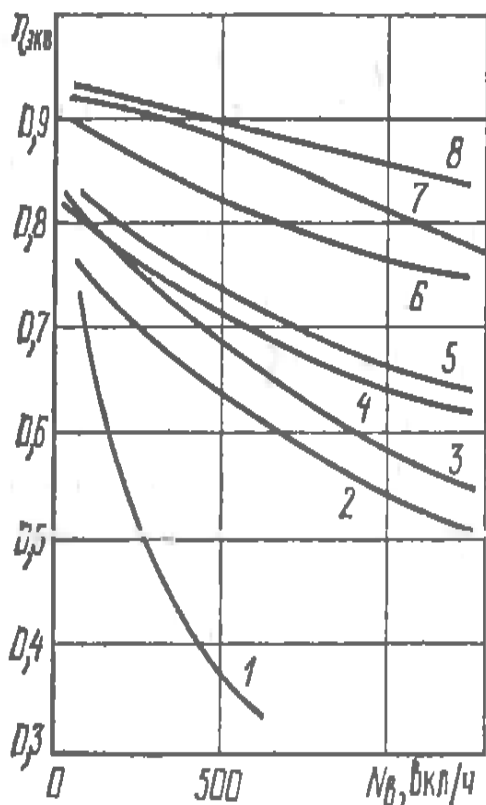
де $\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} = 0,94$ - еквівалентний ККД, який визначається з таблиці 6.5 в [71];

$n_{\text{МАХ}} = 1,05 \cdot n_H = 1,05 \cdot 710 = 746 \text{ об / мин}$ - максимальна частота обертання двигуна (при однозонному регулюванні дорівнює швидкості

холостого ходу);

$\eta_{\text{ЭКВ.N}}$ - ККД в зависимости от числа включений двигателя в минуту N_B по рисунку 2.1.

При числе включений в минуту $N_B = 200$ для тиристорного электропривода постоянного тока $\eta_{\text{ЭКВ.N}} = 0,92$.



1 — двухскоростной короткозамкнутый двигатель при $2p = 4/24$; 2 — параметрическое регулирование двигателей с фазным ротором и торможением противовключением; 3 — трехскоростные короткозамкнутые двигатели при $2p = 4/8/24$; 4 — параметрическое регулирование двигателей постоянного тока, короткозамкнутых двигателей с $2p = 6$ и двигателей с фазным ротором при динамическом торможении; 5 — трехскоростные короткозамкнутые двигатели при $2p = 6/12/24$; 6 — с ограниченной зоной частотного управления двухскоростных короткозамкнутых двигателей; 7 — тиристорный привод постоянного тока; 8 — частотно-управляемые односкоростные короткозамкнутые двигатели

Рисунок 2.1 — Зависимости $\eta_{\text{ЭКВ.N}} = f(N_B)$

В результате получаем:

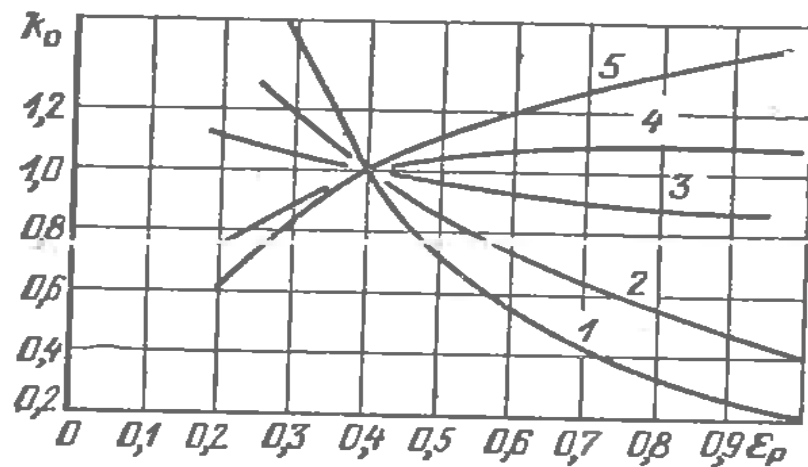
$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{0,94}{1 + \frac{0,94 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{2,59}{1,2 \cdot 1} \cdot \left(\frac{746}{1000}\right)^2} = 0,916. \quad (2.11)$$

Проверяем двигатель по тепловому режиму:

$$P_{\text{НОМ.Т}} = \frac{K_3 \cdot K_{\text{ЭКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_H}}}{K_0 \cdot K_p} \cdot \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - K_d \cdot (\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ}})} \cdot P_{\text{пл}} = \quad (2.12)$$

$$= \frac{1 \cdot 0.8 \cdot \sqrt{\frac{0.4}{0.4}}}{1 \cdot 1} \cdot \frac{0.94}{0.94 - 1.25 \cdot (0.94 - 0.916)} \cdot 12.35 = 10.2 \text{ кВт}$$

тут коефіцієнти $K_3 = 1$, $K_{\text{ЭКВ}} = 0.8$, $\varepsilon_p = 0.4$ прийняті згідно з таблицею 6.4 з [71]; $K_p = 1$; $K_d = 1,25$ згідно з таблицею 6.5 з [71], $K_0 = 1$ по рисунку 2.2 взятому з [71].



1 — невентилюемые асинхронные; 2 — постоянного тока; 3 и 4 — вентилируемые соответственно тихоходные и быстроходные с фазным ротором; 5 — вентилируемые быстроходные короткозамкнутые

Рисунок 2.2 – Залежності $E_0 = f(\varepsilon_p)$

Оскільки $P_{\text{НОМ.Т}} < P_{\text{Н}}$, то двигун Д806 підходить по тепловому режиму.

Перевіряємо двигун за умовами зчеплення. Максимально допустимий прискорення визначаємо за формулою з [71], з урахуванням роботи механізму на відкритому повітрі (мокрі рейки):

$$a_{\max} = 0.85 \cdot \beta - 0.2 = 0.85 \cdot 1 - 0.2 = 0.65 \quad (\text{м / с}^2), \quad (2.13)$$

де β – відношення числа ведучих коліс до загальної кількості коліс, $\beta = 1$.

Знаходимо реальне відношення моментів інерції механізму:

$$\alpha'_p = \frac{J_{\Sigma 1}}{J'_{\text{пост1}}} = \frac{2.59}{1.39} = 1,86. \quad (2.14)$$

Визначаємо прискорення, яке забезпечується двигуном:

$$a_p = \frac{k_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot P_{\text{н}} - P_{\text{cl}}}{0.25 \cdot (G + Q) \cdot v_{\text{н}} \cdot \alpha'_p} = \frac{0.9 \cdot 2 \cdot 0.85 \cdot 17 \cdot 10^3 - 11.8 \cdot 10^3}{0.25 \cdot (150000 + 15000) \cdot 0.43 \cdot 1.86} = \\ = 0.43 (\text{м / с}^2). \quad (2.15)$$

Так як $a_p > a_{\max}$, то для забезпечення умови зчеплення необхідно обмежити прискорення застосувавши задатчик інтенсивності швидкості.

Остаточно приймаємо двигун Д806 як приводного для механізму пересування крана ККД-15.

Статичний момент опору (повний на два двигуна) визначимо, виходячи зі статичної потужності

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_{\text{н}}} = \frac{47,1 \cdot 10^3}{74,3} = 634 (\text{Нм}).$$

3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

3.1 Вибір комплектного електроприводу

Згідно з вимогами, які ставляться до механізму підйому крана, було обрано регульований електропривод постійного струму, оснащений тиристорним перетворювачем. У сучасних електроприводах загального призначення системи перетворення електромашинного типу Г-Д не широко застосовуються.

При прийнятті рішення щодо вибору типу електроприводу, було враховано ряд важливих критеріїв. Серед них була врахована жорсткість механічних характеристик, адаптованість системи регулювання, а також економічні аспекти, пов'язані з витратами електроенергії, а також первинними і експлуатаційними витратами.

Обране рішення у вигляді регульованого електроприводу постійного струму із тиристорним перетворювачем відповідає високим вимогам ефективності та гнучкості регулювання, які важливі для оптимального функціонування механізму підйому крана. Такий вибір технології дозволяє забезпечити оптимальну ефективність системи та відповідати всім технічним та економічним вимогам, що стоять перед крановим механізмом.

Недоліки та переваги системи ТП-Д представлені низкою важливих аспектів, які варто враховувати при її впровадженні.

Серед недоліків можна виділити наступні моменти:

1) М'якша механічна характеристика, що може впливати на точність і стійкість роботи системи у різних умовах експлуатації.

2) Чутливість до перенапруг, що ставить під питання стійкість системи до можливих змін в електромережі.

3) Низька перевантажувальна здатність, що може обмежувати можливість використання системи в умовах великих навантажень.

4) Вплив на мережу, що може створювати додаткові труднощі в

управлінні та плануванні роботи системи.

Незважаючи на ці недоліки, система ТП-Д володіє значними перевагами:

- 1) Висока швидкодія, що забезпечує ефективність та оперативність у роботі.
- 2) Миттєва готовність до роботи, що робить її ефективною в ситуаціях, де потрібна оперативна реакція.
- 3) Відсутність системи власних потреб і обертових частин, що сприяє довгому терміну служби та надійності.
- 4) Високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що вказує на ефективне використання енергії.
- 5) Менше габарити, що полегшує інтеграцію системи в різноманітні умови простору.
- 6) Менше витрат на конструкційні матеріали, що впливає на вартість та економічність впровадження.
- 7) Простота обслуговування, виготовлення і монтажу, що робить її доступною та зручною в експлуатації.
- 8) Простіша система охолодження, що знижує витрати на обслуговування та подовжує термін служби.
- 9) Можливість участі в централізованій системі управління технологічним процесом, що розширює можливості впровадження і інтеграції у великі комплексні системи.

Отже, серед різних методів регулювання та зміни напрямку швидкості в електроприводах постійного струму, використання реверсивного тиристорного перетворювача (РТП) визнається одним з передових способів. Цей метод дозволяє створити швидкодіючий регульований електропривод, що забезпечує ефективність та точність у різних умовах експлуатації.

Термін «реверсивний тиристорний перетворювач» вказує на те, що через цей перетворювач струм може протікати в обох напрямках. Оскільки тиристори пропускають струм тільки в одному напрямку, для зміни напрямку

струму у навантаженні потрібно використовувати дві групи вентилів. Кожна група вентилів проводить струм у своєму напрямку, забезпечуючи необхідну зміну напрямку руху.

Ці групи вентилів часто збираються відповідно до трифазної мостової або трифазної нульової схеми. Трифазна нульова схема, яка відрізняється простотою та меншою кількістю вентилів у схемі, є одним з варіантів збору РТП. З іншого боку, трифазна мостова схема має низку переваг у порівнянні з трифазною нульовою, що робить її привабливою з точки зору ефективності та функціональності. Трифазна мостова схема має низку переваг у порівнянні з трифазною нульовою:

1) При тій самій вторинній напрузі трансформатора випрямлена ЕРС досягає подвоєної величини.

2) Пульсації випрямленої ЕРС удвічі перевищують частоту та знаходяться на меншому рівні за амплітудою.

3) Вентильні групи можуть здійснювати підключення до електричної мережі без використання трансформатора.

4) Типова потужність трансформатора є меншою.

Вищезазначені переваги свідчать про переважне використання трифазної мостової схеми в системах електроприводу (ЕП) з потужністю від декількох десятків до сотень кіловат. Ураховуючи значну потужність трансформатора, який живить якірний ланцюг, зрозуміло вибрати саме трифазну мостову схему.

Як вже зазначено, для отримання реверсивного тиристорного електроприводу (РТП) дві групи вентилів повинні бути певним чином з'єднані між собою. Виділяють два види з'єднань - зустрічно-паралельне та перехресне. Зустрічно-паралельне з'єднання включає в себе використання простого двохобмоткового трансформатора меншої потужності. У той час як перевагою перехресної схеми є легший перебіг аварійних процесів при одночасному включенні тиристорних груп, що робить її наочно вигідною для відповідальних ЕП. Таким чином, ми вибираємо зустрічно-паралельне

з'єднання випрямних груп.

Існують два основних методи управління комплектами РТП: спільне та роздільне. У випадку спільного управління імпульси подаються на тиристори обох груп одночасно. При цьому одна група працює в випрямному режимі з кутом регулювання α_B , розвиває середнє значення випрямленої напруги $U_{ав}$ та забезпечує проходження струму через навантаження. Тоді друга група переходить в інверторний режим з кутом регулювання $\alpha_{и}$ і середнім значенням випрямленої напруги $U_{аи}$. При такому управлінні у РТП утворюється замкнутий контур, по якому може протікати зрівняльний струм. З метою зменшення цього струму, кути регулювання повинні бути в певному відношенні, задовольняючи рівняння: $\alpha_B + \alpha_{и} = 180^\circ$. Це рівняння виконується за умови $\alpha_B < 90^\circ$. При такому управлінні струм, що протікає в зрівняльному контурі, є переривчастим, його середнє значення називають статичним зрівняльним струмом, а його величину обмежують допустимими зрівняльними реакторами. З метою подальшого зменшення зрівняльного струму застосовується неузгоджене управління групами тиристорів в РТП.

У зв'язку з цим важливим аспектом, важливим є співвідношення кутів управління: $\alpha_B + \alpha_U > 180^\circ$. В зрівняльному контурі завжди присутня постійна компонента напруги, направленої проти провідності тиристорів, оскільки інверторна група розвиває більшу напругу, ніж випрямна. Це спричиняє різке зменшення статичного зрівняльного струму, хоча динамічний зрівняльний струм зменшується незначно. Важливо відзначити, що навіть невеликий струм в зрівняльному контурі благотворно впливає на статичні характеристики тиристорного привоу. Таким чином, переваги спільного управління включають:

- 1) Непотребу в переходах силового ланцюга.
- 1) Висока швидкодія при переході між режимами та постійна готовність до цього переходу.

2) Чіткість у статичних характеристиках тиристорного привоу.

У розроблюваному електроприводі буде застосовано перетворювач із

роздільним управлінням вентиляними групами.

У сучасних системах управління тиристорним приводом, основними методами є фазове управління з пилкоподібною або синусоїдальною опорною напругою. Використання синусоїдальної форми опорної напруги відзначається лінійністю результуючої характеристики тиристорного приводу. Таким чином, у розробці тиристорного приводу застосовано синусоїдальну опорну напругу.

Для вирівнювання навантаження вздовж однієї осі (передньої або задньої) та, відповідно, для зменшення перекосів під час руху, включено приводні двигуни за ланцюгом якоря послідовно і живимо їх від одного перетворювача. Збуджувальні ланцюги обох двигунів на одній осі підключені до збуджувача паралельно, що дозволяє налаштовувати механічні характеристики двигунів в необхідних межах. Схема включення електроприводів переміщення козлового крана показана на рисунку 3.1.

З огляду на те, що обрані двигуни мають номінальну напругу $U_n = 220\text{В}$ і включаються по два послідовно, живлення тиристорних перетворювачів здійснюється через мережу 380 В за допомогою струмообмежувальних реакторів.

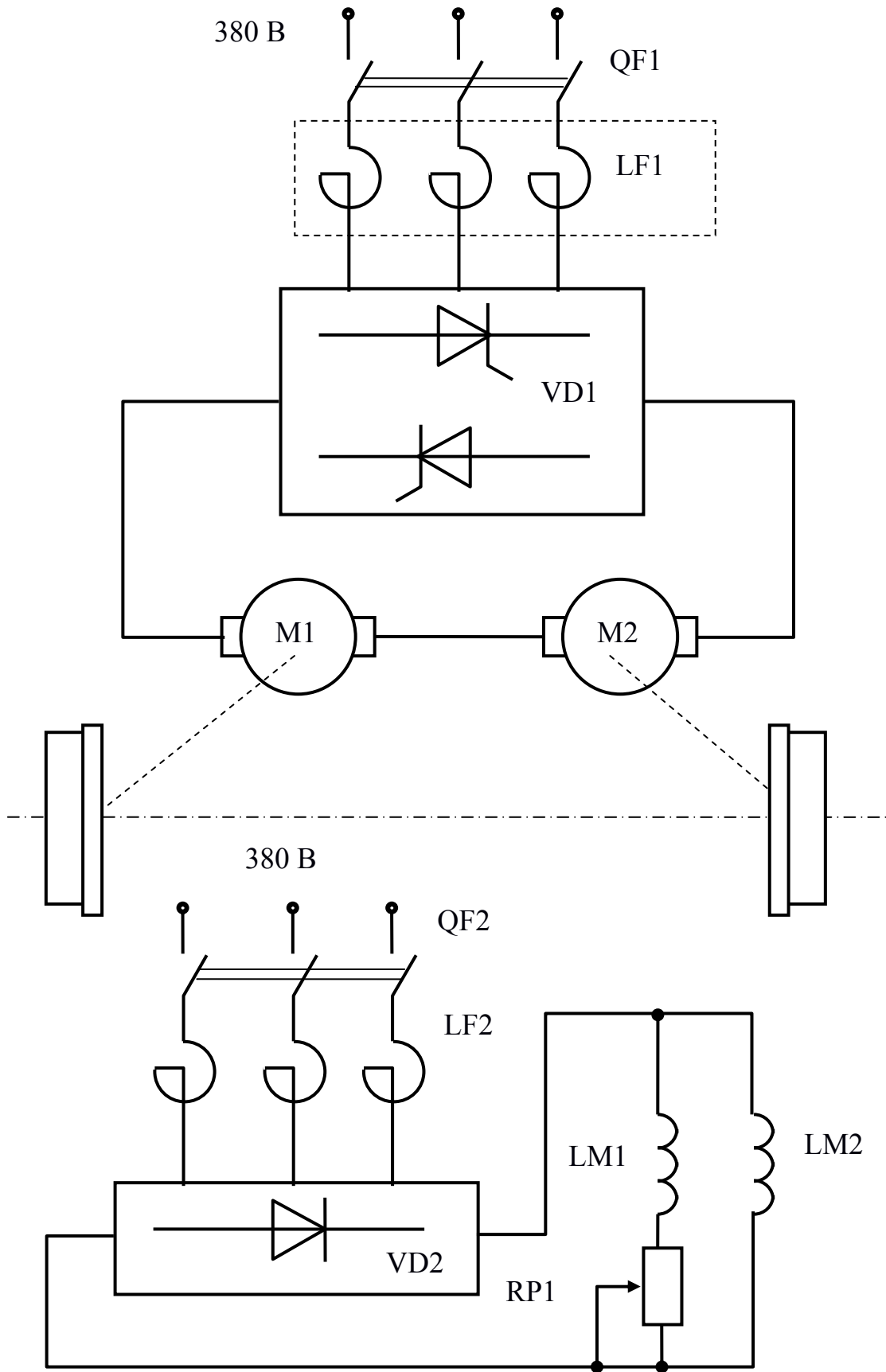


Рисунок 3.1 – Схема вмикання електропривода одної осі

Для живлення двигуна вибираємо комплектний електропривод серії КТЕ. Електроприводи комплектні тиристорні постійного струму (КТЕ) з природним і примусовим повітряним охолодженням призначені для споживачів постійного струму, що вимагають автоматичного регулювання швидкості обертання, положення вала, потужності, випрямленої напруги, ЕРС двигуна, струму збудження, натягу матеріалу.

КТЕ використовуються в металургійній промисловості та інших галузях народного господарства. На струми 2500 А і вище випускаються також тиристорів з примусовим водяним охолодженням.

Структура умовного позначення

КТЕ Х / Х Х Х-Х Х Х-Х-Х Х Х Х Х-Х УХЛ4:

КТЕ – комплектний тиристорний електропривод;

Х / Х номінальний струм електроприводу, групи "ВПЕРЕД" / групи "НАЗАД" *;

Х – номінальна напруга двигуна, В;

Х – виконання: М – модернізований (до 1000 А; 750 В), Е – посиленої ізоляції, з природним охолодженням, В – посиленої ізоляції, з вбудованим вентилятором;

Х – виконання КТЕ за кількістю питомих двигунів: 1 – однодигунний, 2 – з двома двигунами, 0 – збудник **;

Х – режим роботи: 1 – нереверсивний, 2 – реверсивний;

Х – зв'язок з мережею живлення: Р – реакторна, Т – трансформаторна (Т2 – для 12-пульсної схеми випрямлення), Н – безпосередня, 0 – поставка без трансформатора і реактора (02 – для 12-пульсної схеми випрямлення);

Х – умовне позначення системи автоматичного регулювання (САР): 4 – швидкості (ЕРС), однозонна, 5 – положення, однозонна, 8 – швидкості, двохзонна, 2 – індивідуального виконання на вимогу замовника;

Х – наявність вбудованого лінійного контактора: 0 – відсутній, К – наявний;

X – наявність вбудованого пристрою динамічного гальмування: 0 – відсутній, Д – наявний;

X – наявність вбудованого пристрою живлення електромагніту механічного гальма: 0 – відсутній, М – наявний;

X – наявність пристрою живлення обмотки збудження тахогенератора: 0 – відсутній, Т – наявний;

X – виконання вбудованого збудника (таблиця);

X – кількість КТЕ в одній шафі;

УХЛ4 – кліматичне виконання і категорія розміщення по ГОСТ 15150-69.

* Струм групи "Назад" вказується для реверсивних несиметричних КТЕ.

** В КТЕ-збудниках вбудовані пристрої відсутні (відповідні індекси не ставляться).

Перетворювачі випускаються на наступні напруги і струми:

- номінальний випрямлений струм, А – 10; 25; 50; 100; 200; 320; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000;

- номінальна випрямлена напруга, В – 220; 440; 600; 750; 930
Номінальна напруга трифазної мережі силових ланцюгів, В – 205; 380; 410; 6000, 10 000.

Враховуючи параметри обраного двигуна, вибираємо **КТЕ 100. 440. М-2 2 Р-4- УХЛ4**, тобто перетворювач на струм 100 А і випрямлену напругу 440 В модернізований, дводвигуновий, реверсивний з живленням від мережі 380 В через струмообмежувальним реактор. Система регулювання ЕРС або швидкості.

На рисунку 3.2 представлена функціональна схема КТЕ

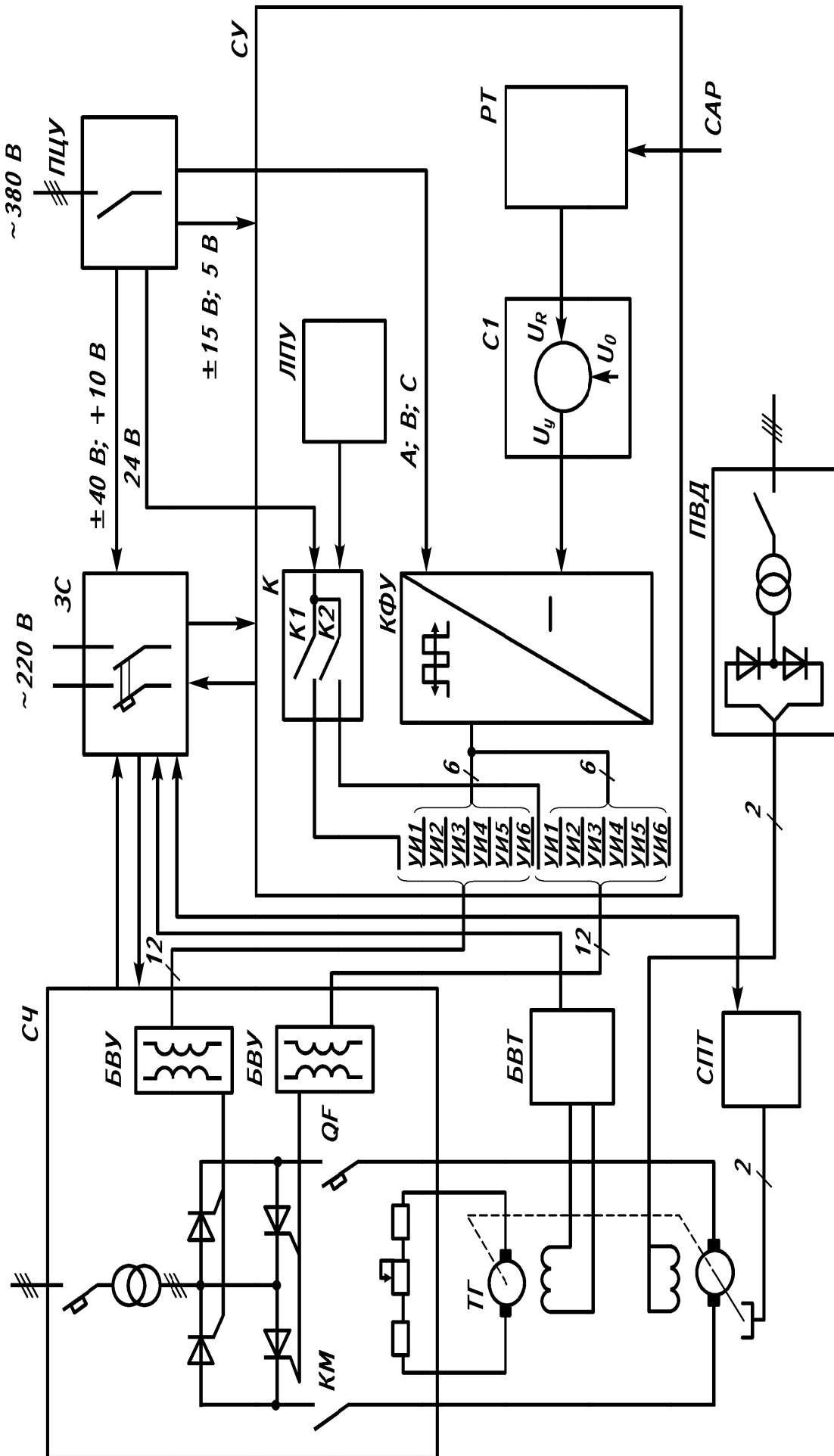


Рисунок 3.2 – Функціональна схема КТЕ

На рисунку 3.2 прийняті наступні позначення:

ЛПУ – логічний перемикаючий пристрій;

К – ятка ключів перемикаючих імпульсів;

ПВД – живлення збудження двигуна;

СПТ – система живлення електромагнітного гальма;

ПЦУ – живлення ланцюгів управління;

УИ1-УИ6 – імпульси управління;

БВУ – блок вихідних пристроїв;

КФУ – канал фазового управління;

ТГ – тахогенератор;

С1 – ятка зв'язку;

КМ – силовий контактор;

РТ – регулятор струму;

U_y, U_R, U_0 – зовнішні сигнали;

QF – автоматичний вимикач.

На рисунку 3.3 приведена функціональна схема системи автоматичного регулювання швидкості реверсивного однозонного електроприводу серії КТЕ.

На рисунку 3.3 позначено:

ZI_c – задатчик інтенсивності швидкості;

$U_{зи}$ – напруга задатчика інтенсивності;

Σ – сумматор;

d_n – прискорення;

$\Sigma_{n_{\max}}$ – сумарний сигнал, який відповідає максимальному значенню швидкості;

Σ_n – сумарне значення швидкості;

РС – регулятор швидкості;

i_{\max} – сигнал, який відповідає максимальному значенню струму двигуна;

П-режим – пропорційний режим;

ПІ-режим – пропорційно-інтегральний режим;

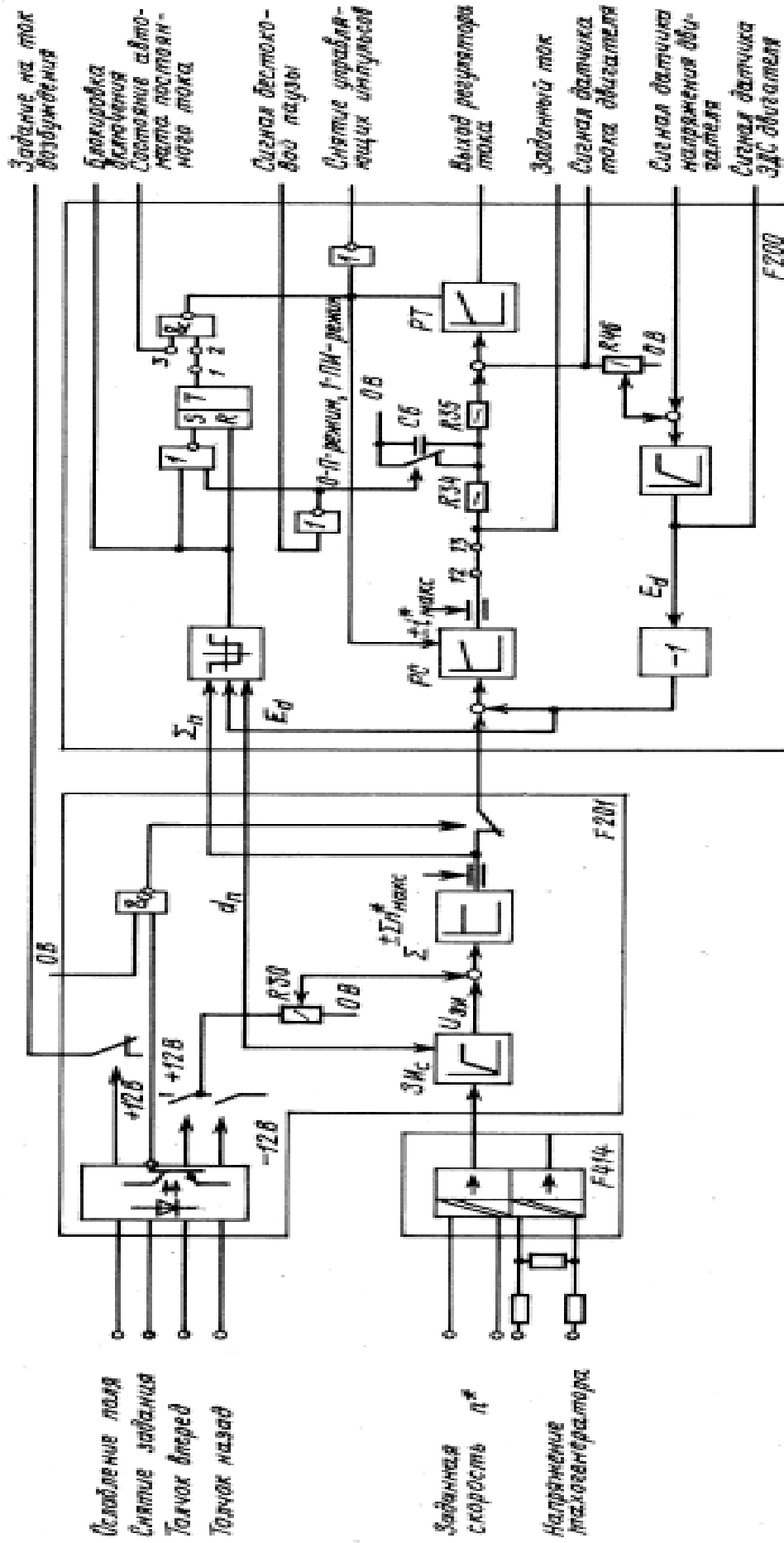


Рисунок 3.3 – Функциональная схема САР электропривода серии КТЕ

- РТ – регулятор струму;
- F200 – ятка регулювання;
- F201 – ятка завдання швидкості;
- F414 – ятка гальванічної розв'язки.

3.2 Вибір струмообмежувального реактора

Струмообмежувальним реактор – пристрій, для захисту тиристорів від надструмів в аварійних режимах роботи перетворювачів, включаються в кожен фазу мережі живлення. Індуктивність реактора вибирається з умови обмеження діючого значення усталеного струму короткого замикання.

Вибираємо струмообмежувальним реактор РТСТ-165-0,145УЗ на 165А.

Параметри струмообмежувального реактора РТСТ-165-0,145УЗ:

- лінійна напруга мережі живлення $U_L = 410 \text{ В}$;
- струм навантаження тиристорного перетворювача $I_{\text{НД}} = 165 \text{ А}$;
- номінальна індуктивність $L_{\text{НД}} = 0.145 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$;
- активний опір $r_{\text{НД}} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

3.3 Вибір згладжувального реактора

Згладжувальний реактор включається в ланцюг випрямленого струму з метою зменшення його змінної складової. Пульсації випрямленого струму повинні бути обмежені на рівні допустимого значення для обраного двигуна. При тиристорному живленні надійна робота двигунів серії забезпечується без необхідності застосування згладжувального реактора якщо коефіцієнт пульсацій струму $k_{I(\text{доп})}$ не перевищує 15%. При $k_{I(\text{доп})} = 15\%$ номінальна потужність знижується не більше ніж на 3%.

ЕРС перетворювача при куті управління $\alpha = 0$:

$$E_{\text{д0}} = 1.35 \cdot U_{2\text{л}} = 1.35 \cdot 380 = 513 \text{ (В)}. \quad (3.1)$$

Мінімальна сумарна (еквівалентна) індуктивність якірного ланцюга за умовою обмеження пульсацій випрямленого струму:

$$L_{\varepsilon(\min)} = \frac{k_U}{k_{I(\text{доп})}} \cdot \frac{E_{d0}}{m \cdot \omega_c \cdot I_H}, \quad (3.2)$$

де k_U – коефіцієнт пульсацій напруги (для трифазної мостової схеми приймаємо $k_U = 0,13$),

m – пульсність перетворювача (для мостовий трифазної схеми $m = 6$)

$$L_{\varepsilon(\min)} = \frac{0.13}{0.15} \cdot \frac{513}{6 \cdot 314 \cdot 84} = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (3.3)$$

Індуктивність якоря двигуна визначимо використовуючи формулу Уманського-Лінвілл:

$$L_{\text{яд}} = \frac{0.25 \cdot U_H}{I_H \cdot \omega_H \cdot p} = \frac{0.25 \cdot 220}{84 \cdot 74.3 \cdot 4} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.4)$$

Розрахункова індуктивність згладжувального реактора (два двигуна послідовно):

$$\begin{aligned} L_{\text{ср}} &= L_{\varepsilon(\min)} - 2 \cdot L_{\text{тор}} - 2 \cdot L_{\text{яд}} = 2.8 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.145 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = \\ &= -1.89 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Так як розрахункова індуктивність виявилася негативною, згладжує реактор не потрібно. Власної індуктивності якірного ланцюга досить для обмеження пульсацій струму.

3.4 Розрахунок параметрів об'єкта керування

Проведемо розрахунок параметрів об'єкта управління, необхідних для синтезу системи керування електроприводом.

Опір якоря двигуна з урахуванням температури навколишнього середовища:

$$R_{\text{я}} = k_t \cdot r_{\text{я}} = 1.38 \cdot 0.047 = 0.065 \text{ Ом}. \quad (3.6)$$

де $k_t = 1.38$ - температурний коефіцієнт.

Еквівалентний опір якорного ланцюга:

$$R_{\text{э}} = 2 \cdot R_{\text{я}} + 2 \cdot r_{\text{тор}} + \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{н}}} = 2 \cdot 0.065 + 2 \cdot 0.029 + \frac{2}{84} = 0.211 \text{ (Ом)}. \quad (3.7)$$

де $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$ - падіння напруги на щітковому контакті.

Еквівалентна індуктивність якорного ланцюга:

$$L_{\text{э}} = 2 \cdot L_{\text{яд}} + 2 \cdot L_{\text{тор}} = (2 \cdot 2.2 + 2 \cdot 0.145) \cdot 10^{-3} = 4.69 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (3.8)$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = \frac{4.69 \cdot 10^{-3}}{0.211} = 0.022 \text{ (с)}. \quad (3.9)$$

Потокозчеплення машини:

$$C\Phi_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_{я}}{\omega_n} = \frac{220 - 84 \cdot 0.065}{74.3} = 2.88 \text{ (В} \cdot \text{с)}. \quad (3.10)$$

Електромеханічна стала часу (при розрахунку враховуємо що два двигуни з'єднані послідовно по якорях і працюють на одне навантаження):

$$T_m = \frac{2 \cdot J_{\Sigma 1} \cdot R_{я}}{(2 \cdot C\Phi)^2} = \frac{2 \cdot 2.59 \cdot 0.211}{(2 \cdot 2.88)^2} = 0.033 \text{ (с)}. \quad (3.11)$$

Статичний коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача:

$$k_m = \frac{E_{d0}}{U_y} = \frac{513}{10} = 51.3. \quad (3.12)$$

де $U_y = 10 \text{ В}$ - максимальна напруга управління.

Приймаємо малу некомпенсовану сталу часу $T_{\mu} = 0,005 \text{ с}$.

4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Математичний опис об'єкта управління

При синтезі системи управління приймаються звичайні для систем електроприводу припущення, які лінеаризують силову частину об'єкта управління – двигун і регульоване джерело живлення ланцюга якоря. При математичному описі не враховується вплив пружних елементів, вплив гістерезису, вихрових струмів і реакції якоря. Коефіцієнти передач і сталі часу структурних елементів електроприводу приймаються незмінними.

Об'єктом управління в даній системі виступає тиристорний перетворювач, електродвигун і механічна частина.

Тиристорний перетворювач як елемент системи регулювання є нелінійним дискретним пристроєм. Його специфічні особливості полягають в наступному. Управління ТП здійснюється дискретно, так як після відмикання чергового тиристора зміна сигналу управління протягом деякого інтервалу часу не призводить до зміни напруги ТП.

Якщо швидкість зміни кута $d\alpha/dt > \omega_0$, то ЕРС визначається не кутом α , а зміною по кривій напруги живлення останнього тиристора, який проводив струм, у зв'язку з неможливістю закрити по ланцюгу управління відкритий тиристор. Останнє явище отримало назву неповної керованості ТП.

У зв'язку з цим повне дослідження динамічних характеристик ТП є складним завданням, і на практиці застосовують різного роду спрощення. Найбільшого поширення набули два види моделей ТП: безперервна, в якій ТП представляється апериодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{тп}}$ і сталою часу

$\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ і імпульсною. Надалі, при синтезі САУ буде використана

безперервна модель ТП.

Таким чином, два послідовно з'єднаних електродвигуна представимо у

вигляді трьох типових ланок (рис. 4.1): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина машин) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативним зворотним зв'язком по ЕРС двох двигунів. Момент опору в структурній схемі відповідає навантаженню припадає на одну вісь крана (навантаженні двох двигунів). Так як J_{Σ} розраховуються в розрахунку на один двигун, то в структурній схемі його значення подвоюється.

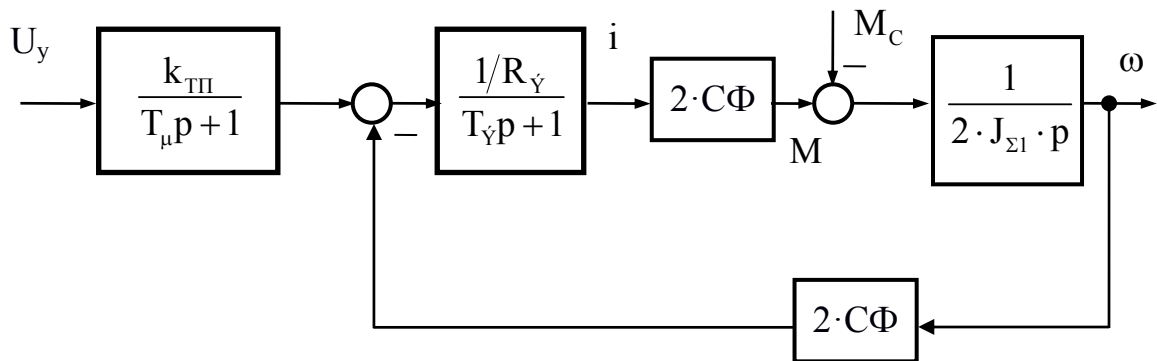


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електропривода

Одним із сучасних методів побудови уніфікованих систем автоматичного керування електроприводом є принцип підпорядкованого регулювання параметрів. При цьому об'єкт управління представляється в вигляді ланцюжка послідовно з'єднаних ланок, на виході кожного з яких формується той чи інший параметр. Важливою перевагою системи підпорядкованого управління є можливість обмеження величини підпорядкованого параметра шляхом обмеження вихідного сигналу регулятора зовнішнього контуру [3-4].

Найбільш поширеним в уніфікованих системах управління принципом побудови регулятора є компенсація основних інерційностей об'єкта управління. Принцип компенсації можна сформулювати наступним чином: кожній ланці об'єкта управління з великою сталою часу має відповідати ланка зі зворотним функцією передачі в складі регулятора. Тоді, якщо не враховувати впливу малих сталих часу, передавальна функція розімкненої системи є безінерційна ланка. Виходячи з вищесказаного, складемо структурну схему системи регулювання швидкості, яка приведена на рис. 4.2.

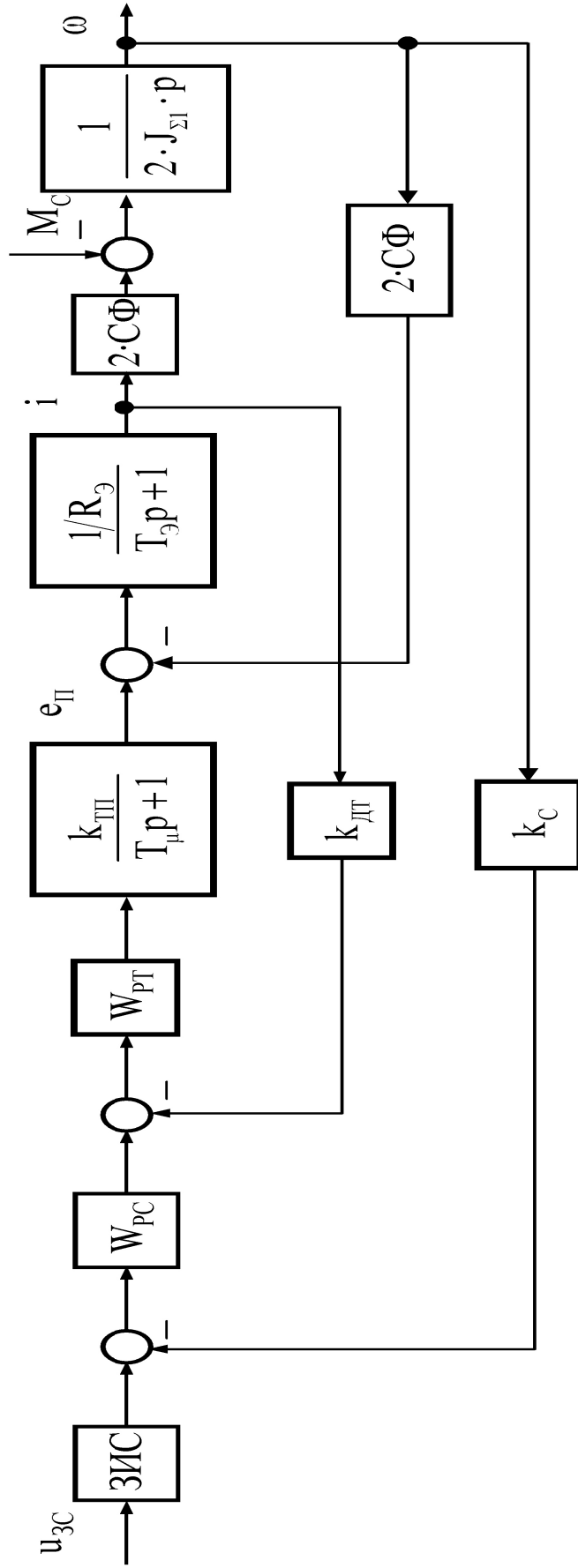


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи управління

4.2 Розрахунок регулятора струму

На рисунку 4.3 представлена структурна схема контуру струму.

Передавальна функція регулятора струму при оптимізації контура на модульний оптимум матиме вигляд:

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{T_{\Theta}p + 1}{T_{\Theta}p} \quad (4.1)$$

Як видно з формули (4.1) регулятор струму – ПІ регулятор. Статичний коефіцієнт підсилення регулятора струму:

$$K_{PT} = \frac{R_{\Theta} \cdot T_{\Theta}}{K_{ТП} \cdot K_{OT} \cdot T_{OT}} = \frac{0.23 \cdot 0.022}{51.3 \cdot 0.048 \cdot 0.01} = 0.205, \quad (4.2)$$

де $T_{OT} = 2T_{\mu} \cong 0.01$ с;

$$K_{OT} = \frac{U_{ЗТМАХ}}{I_{МАХ}} = \frac{10}{210} = 0.048 \text{ В/А} \quad - \quad \text{коефіцієнт передачі ланцюга}$$

зворотного зв'язку за струмом з урахуванням що:

- максимальний сигнал завдання на струм $U_{ЗТМАХ} = 10$ В ;

- максимально допустимий струм якоря двигуна

$$I_{МАХ} = \lambda_1 \cdot I_H = 2.5 \cdot 84 = 210 \text{ А} .$$

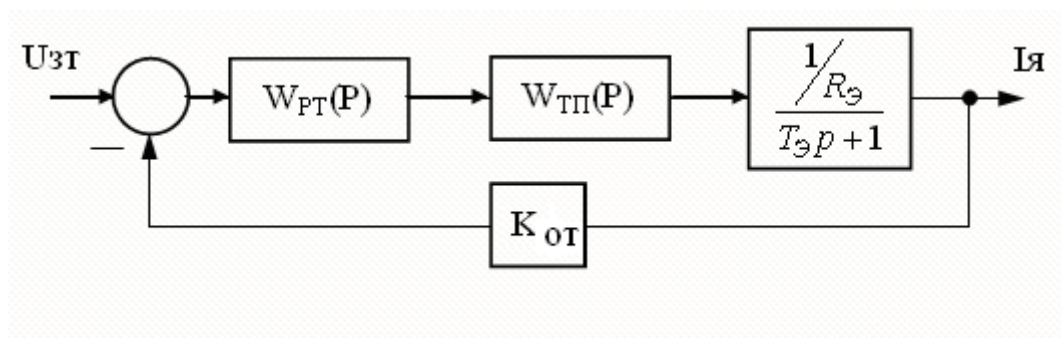


Рисунок 4.3 - Структурна схема контуру струму

На рисунку 4.4 представлена функціональна схема регулятора струму.

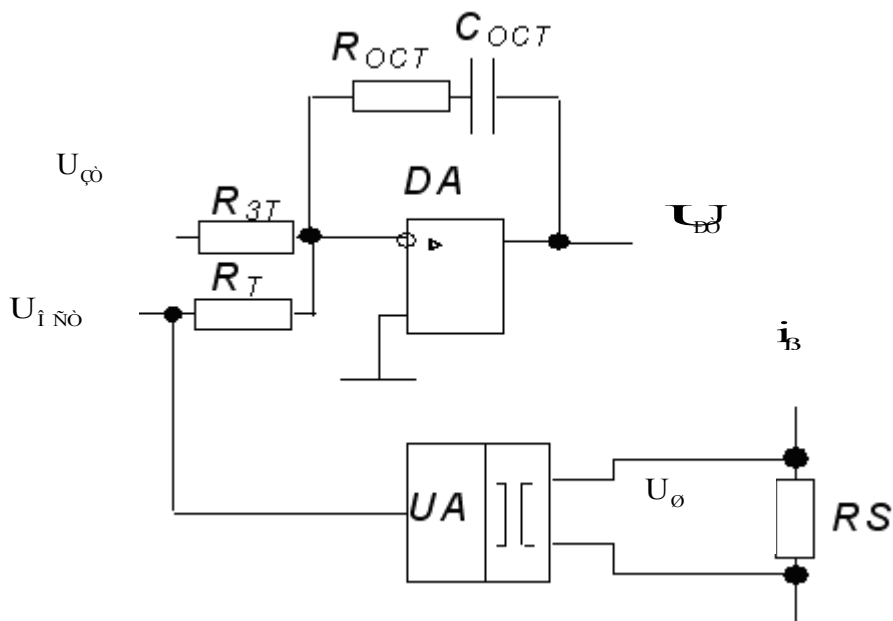


Рисунок 4.4 - Функціональна схема регулятора струму

На рисунку 4.5 представлена структурна схема регулятора струму.

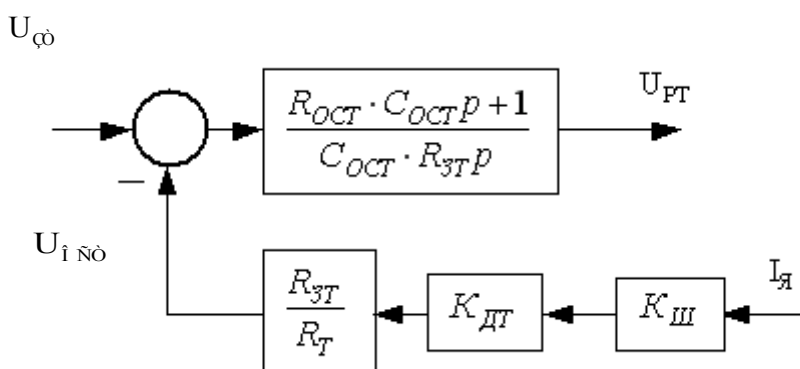


Рисунок 4.5 - Структурна схема регулятора струму

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора струму за наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} T_{\text{Э}} = R_{\text{ОСТ}} \cdot C_{\text{ОСТ}}; \\ \frac{K_{\text{ТШ}} \cdot K_{\text{Т}}}{R_{\text{Э}}} T_{\text{ОТ}} = R_{\text{ЗТ}} \cdot C_{\text{ОСТ}}; \\ K_{\text{ОТ}} = \frac{R_{\text{ЗТ}}}{R_{\text{Т}}} \cdot K_{\text{ДТ}} \cdot K_{\text{Ш}}, \end{cases} \quad (4.3)$$

Шунт RS вибираємо типу 75ШС, який має такі параметри: номінальна вихідна напруга на шунті $U_{\text{НШ}}=75$ мВ при струмі $I_{\text{НШ}}=250$ А. Отже коефіцієнт передачі шунта:

$$K_{\text{Ш}} = \frac{U_{\text{НШ}}}{I_{\text{НШ}}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{300} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ В/А}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{\text{ДТ}} = \frac{K_{\text{ОТ}}}{K_{\text{Ш}}} = \frac{0.048}{0.25 \cdot 10^{-3}} = 192. \quad (4.5)$$

В якості стандартного датчика струму UA вибираємо датчик струму з системи УБСР-АІ типу ДТ-3АІ. Цей датчик призначений для формування і введення в систему регулювання аналогового сигналу, пропорційного струму в ланцюзі якоря. Датчик підключається до шунт в ланцюзі якоря двигуна і забезпечує гальванічну розв'язку між вхідними та вихідними ланцюгами з різницею потенціалів між ними до 1000 В.

Параметри давача ДТ-3АІ, позначеного на схемі як UA:

- вихідна напруга ± 10 В;
- коефіцієнт підсилення $53 \div 200$;
- похибка $\leq 1\%$;
- смуга пропускання 1.5 кГц;
- напруга живлення постійним струмом 12.6 В.

Приймаємо конденсатор $C_{\text{ост}}$ ємністю 2 мкФ.

$$R_{\text{ост}} = \frac{T_{\text{э}}}{C_{\text{ост}}} = \frac{0.014}{2 \cdot 10^{-6}} = 7000 \text{ Ом} = 7 \text{ кОм}. \quad (4.6)$$

$$R_{\text{зт}} = \frac{K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{от}} \cdot T_{\text{от}}}{R_{\text{э}} \cdot C_{\text{ост}}} = \frac{51.3 \cdot 0.135 \cdot 0.01}{1.23 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 28 \text{ кОм} . \quad (6.15)$$

$$R_{\text{т}} = \frac{R_{\text{зт}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{дт}}}{K_{\text{от}}} = \frac{28000 \cdot 7.5 \cdot 10^{-4} \cdot 180}{0.135} = 28 \text{ кОм} \quad (4.8)$$

Вибираємо резистор $R_{\text{ост}}$ марки МЛТ - 0.125, опором 11 кОм.

Вибираємо резистор $R_{\text{зт}}$ марки МЛТ-0.125, опором 120 кОм.

Вибираємо резистор $R_{\text{т}}$ марки МЛТ-0.125, опором 180 кОм.

Вибираємо конденсатор $C_{\text{ост}}$ марки К50-6, ємністю 2 мкФ.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б:

- напруга стабілізації – 10 В;
- розкид напруги стабілізації - $\pm 0,7$ В;
- мінімальний струм стабілізації - 3мА;
- максимальний струм стабілізації – 14 мА;
- диференційний опір – 22 Ом.

4.3 Розрахунок регулятора швидкості

До контуру регулювання швидкості входять: об'єкт управління, що складається з оптимізованого контура струму і механічної частини електроприводу; датчик швидкості; регулятор швидкості. Визначимо передавальну функцію замкнутого контуру струму:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{\frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{ОТ}}p} \cdot \frac{1}{K_{\text{ОТ}}}}{1 + \frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{ОТ}}p}} = \frac{\frac{1}{K_{\text{ОТ}}}}{T_{\text{ОТ}}T_{\mu}p^2 + T_{\text{ОТ}} + 1} \quad (4.9)$$

оскільки T_{μ} – мала стала часу, то $T_{\text{ОТ}}T_{\mu}p^2 = 2T_{\mu}^2p$ можна прирівняти нулю, тоді передавальна функція контуру струму набуде вигляду:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1/K_{\text{ОТ}}}{T_{\text{ОТ}}p + 1}. \quad (4.10)$$

Таким чином, на рисунку 4.6 представлена структурна схема регулятора швидкості.

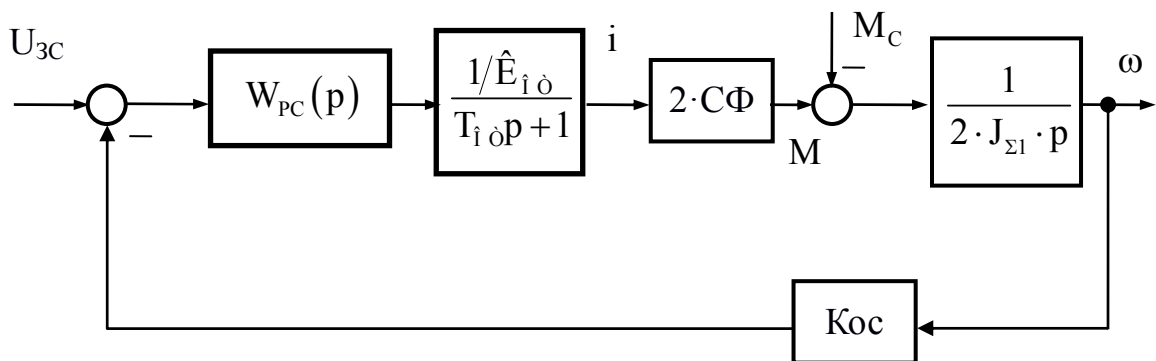


Рисунок 4.6 – Структурна схема контуру швидкості

Залежно від вимог, що висуваються технологією до електроприводу механізму, контур швидкості виконують одноразово інтегруючим (з П-регулятором) або дворазово інтегруючим (ІІІ-регулятором).

Для систем підпорядкованого регулювання швидкості пересування крана застосовується ІІІ-регулятор.

Передавальна функція регулятора швидкості при оптимізації контура на симетричний оптимум матиме вигляд:

$$W_{\text{РТ}}(P) = K_{\text{РС}} \cdot \frac{4 \cdot T_{\text{ОТ}}p + 1}{4 \cdot T_{\text{ОТ}}p} \quad (4.11)$$

Статичний коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot J_{\Sigma 1}}{2T_{OT} \cdot C\Phi_H \cdot K_{OC}} = \frac{0.048 \cdot 2.59}{2 \cdot 0.01 \cdot 2.88 \cdot 0.136} = 15.87$$

де K_{OC} - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$$K_{OC} = \frac{U_{зсМАХ}}{\omega_{МАХ}} = \frac{10}{74.3} = 0.136 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад} - \text{коефіцієнт передачі ланки}$$

зворотнього зв'язку за швидкістю з урахуванням того, що:

- максимальний сигнал завдання на швидкість $U_{зтМАХ} = 10\text{В}$.

На рисунку 6.15 представлена функціональна схема регулятора швидкості.

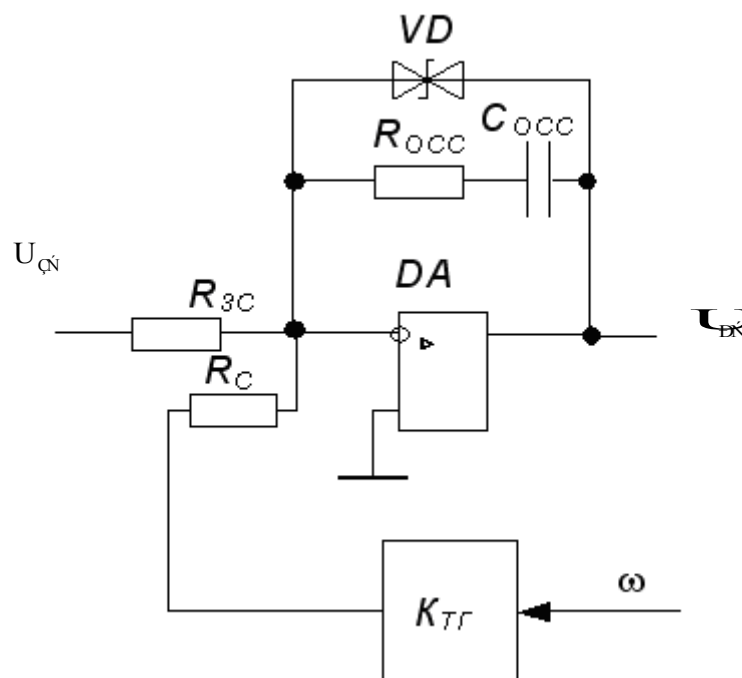


Рисунок 4.15 - Функціональна схема регулятора швидкості

На рисунку 4.8 представлена структурна схема регулятора швидкості.

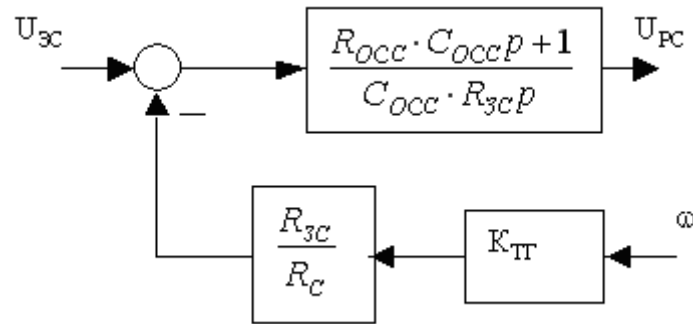


Рисунок 4.8 - Структурна схема регулятора швидкості

В якості датчика швидкості вибираємо тахогенератор типу ТП 214:

$$n_H = 1000 \text{ об/хв}; U_H = 100 \text{ В};$$

$$K_{ТГ} = \frac{U_{H,ТГ}}{\omega_{H,ТГ}} = \frac{100}{3.14 \cdot 1000 / 30} = 0.96 \text{ В} \cdot \text{с}. \quad (4.12)$$

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора швидкості по наступних співвідношеннях:

$$\begin{cases} K_{PC} = \frac{R_{OCC}}{R_{3C}}; \\ K_C = K_{ТГ} \cdot \frac{R_{3C}}{R_C}; \\ U_{3C \text{ MAX}} = K_C \cdot \omega_H. \end{cases} \quad (4.13)$$

прийmemo $C_{OCC} = 2 \text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Завдання на швидкість подаємо з задатчика інтенсивності швидкості.

Тому задаємося $R_{3C} = 51 \text{ кОм}$. В якості R_{3C} вибираємо резистор типу МЛТ-0.125 опором 51 кОм.

Розрахуємо R_{OCC} :

$$R_{OCC} = K_{PC} \cdot R_{3C} = 15.87 \cdot 51 = 809 \text{ кОм}. \quad (4.14)$$

вибираємо резистор R_{OCC} типу МЛТ-0.125 810 кОм.

Розрахуємо R_C :

$$R_C = \frac{K_{ТГ} \cdot R_{ЗС}}{K_{ОС}} = \frac{0.96 \cdot 51 \cdot 10^3}{0.136} = 360 \text{ кОм.} \quad (4.15)$$

вибираємо резистор R_C типу МЛТ-0.125 360 кОм.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б: напруга стабілізації - 10 В;

4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону і гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки струмообмеження застосовуємо задатчик інтенсивності, що перетворює ступінчастий сигнал завдання швидкості в лінійно змінюється в часі.

Стале значення напруги виходу задатчика інтенсивності, яке подається на вхід регулятора швидкості, так само вхідного сигналу. Тобто задатчик інтенсивності швидкості необхідний для обмеження струму двигуна в перехідних процесах.

Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості наведена на рисунку 4.9.

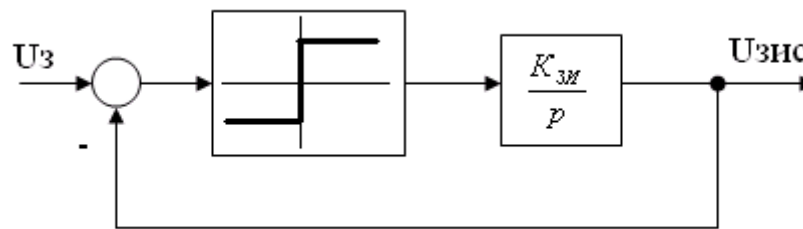


Рисунок 4.9 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Відповідно до розрахунків наведеними в розділі 2 за умовами зчеплення електропривод повинен забезпечувати прискорення $a_p < 0.65 \text{ (м / с}^2\text{)}$. приймемо $a_p = 0.25 \text{ (м / с}^2\text{)}$. Час розгону при цьому складе:

$$t_p = \frac{V_H}{a_p} = \frac{0.43}{0.25} = 1.72 \text{ с} \quad (4.16)$$

Коефіцієнт передачі ЗІС:

$$K_{\text{и}} = \frac{U_{3\text{MAX}}}{t_p} = \frac{10}{1.72} = 5.81 \frac{\text{В}}{\text{с}}. \quad (4.17)$$

На рисунку 4.10 представлена функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості.

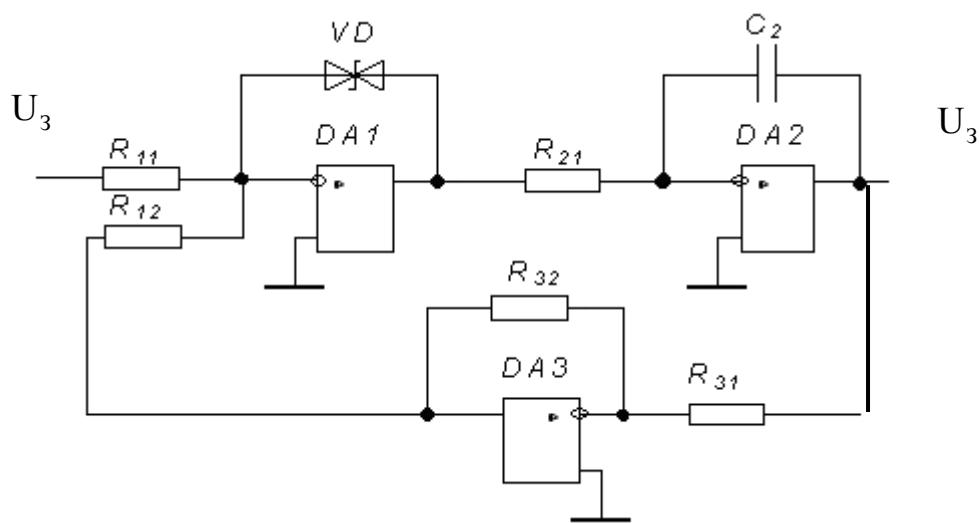


Рисунок 4.10 – Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості

Приймаємо конденсатор C_2 ємністю 2 мкФ.

Приймаємо: $R_{11} = R_{12} = 20 \text{ кОм}$; $R_{31} = R_{32} = 10 \text{ кОм}$.

$$R_{21} = \frac{1}{K_{\text{и}} \cdot C_2} = \frac{1}{5.81 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 86 \text{ кОм}. \quad (4.19)$$

Вибираємо резистори R_{11} і R_{12} марки МЛТ-0.125, опором 20 кОм.

Вибираємо резистори R_{31} і R_{32} марки МЛТ-0.125, опором 10 кОм.

Вибираємо резистор R_{21} марки МЛТ-0.125, опором 86 кОм.

Вибираємо конденсатор $C_{\text{оос}}$ марки К50-6, ємністю 2 мкФ.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС210Б:

- напруга стабілізації - 10 В.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB / SIMULINK

На рис. 5.1-5.4 представлена модель електроприводу пересування козлового крана, розроблена в середовищі моделювання динамічних систем Matlab / Simulink.

На рисунках 5.5 і 5.7 приведені результати моделювання роботи ЕП при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході. На рисунку 5.8 представлені графіки пуску, реверса і гальмування електроприводу під навантаженням.

На рис. 5.9 - 5.11 наведені результати моделювання роботи ЕП при зміні параметрів об'єкта управління в межах $\pm 50\%$, що може бути викликано, наприклад, недообліком опору силових кабелів, сезонними коливаннями температури зовнішнього середовища, загущенням мастила і т.п.

Отримані перехідні процеси свідчать про правильність на будівництва системи. Досліджуваний електропривод з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним вимогам, що висуваються до електроприводу при вихідних параметрах ОУ. При варіації (зменшенні і збільшенні) сталої часу T_3 , моменту інерції в широких межах система залишається працездатною. Ряд проведених варіацій призводять до незначної коливальності якірного струму електродвигуна, яка викликає його додатковий нагрів і вібрацію механічної частини технологічного обладнання.

Найбільш небезпечним режимом є обриви зворотних зв'язків за струмом та швидкістю (рис. 5.12 - 5.13). Для виключення подібних аварійних режимів проєктований електропривод повинен бути оснащений системою захистів і сигналізації, яка відключає силовий перетворювач від мережі в цих випадках. У крайніх положеннях переміщення крана має контролюватися кінцевими вимикачами.

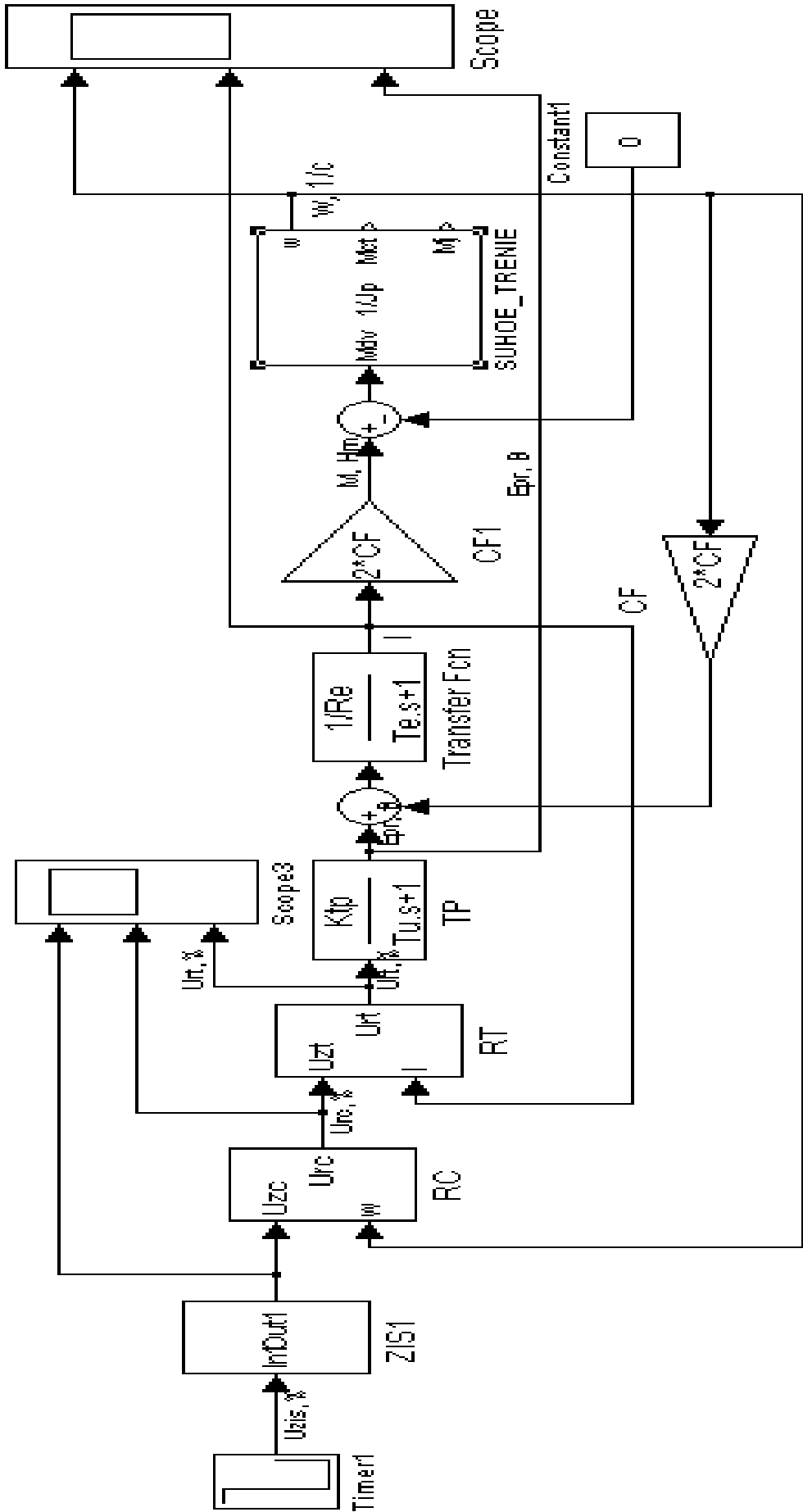


Рисунок 5.1 - Математична модель системи електропривода

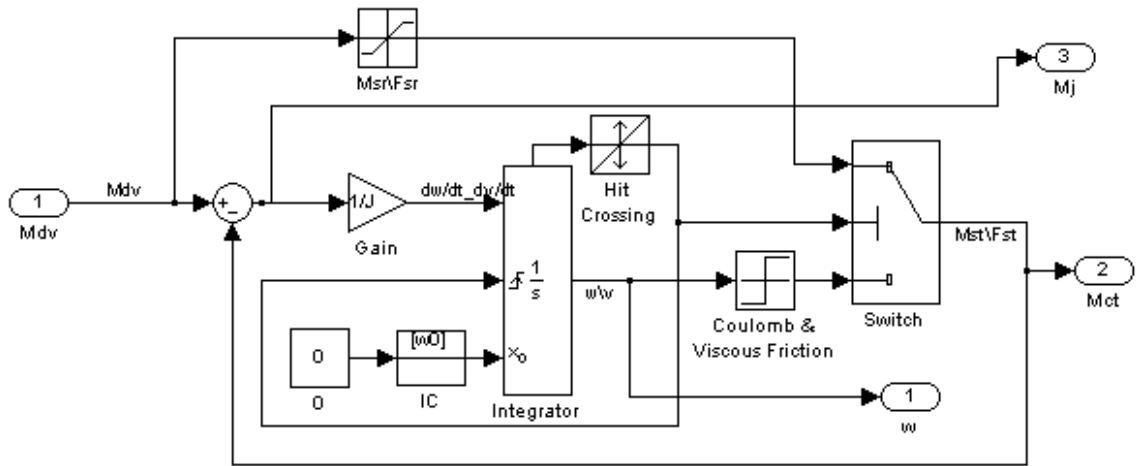


Рисунок 5.2 - Модель механічної частини приводу для уточненого моделювання сил сухого тертя

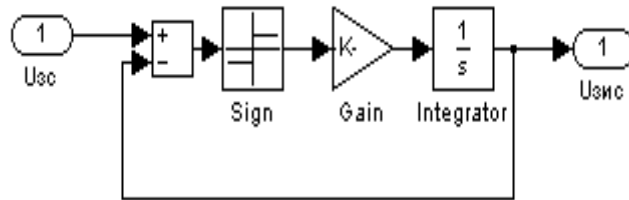


Рисунок 5.3 - Задатчик інтенсивності швидкості

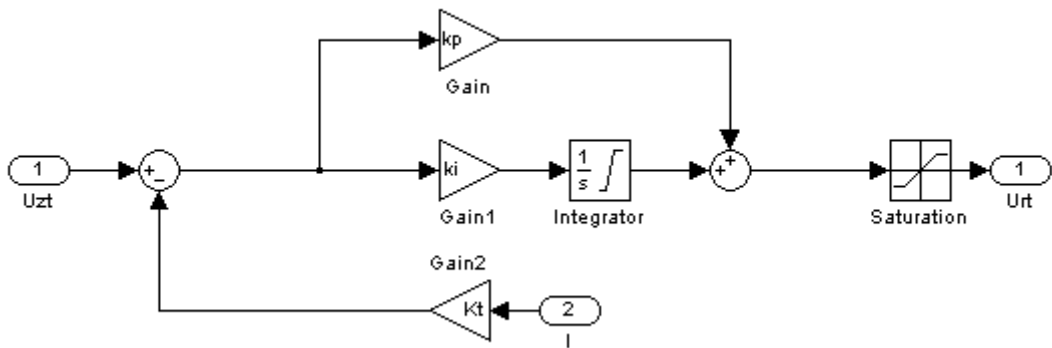


Рисунок 5.4 - Регулятор струму

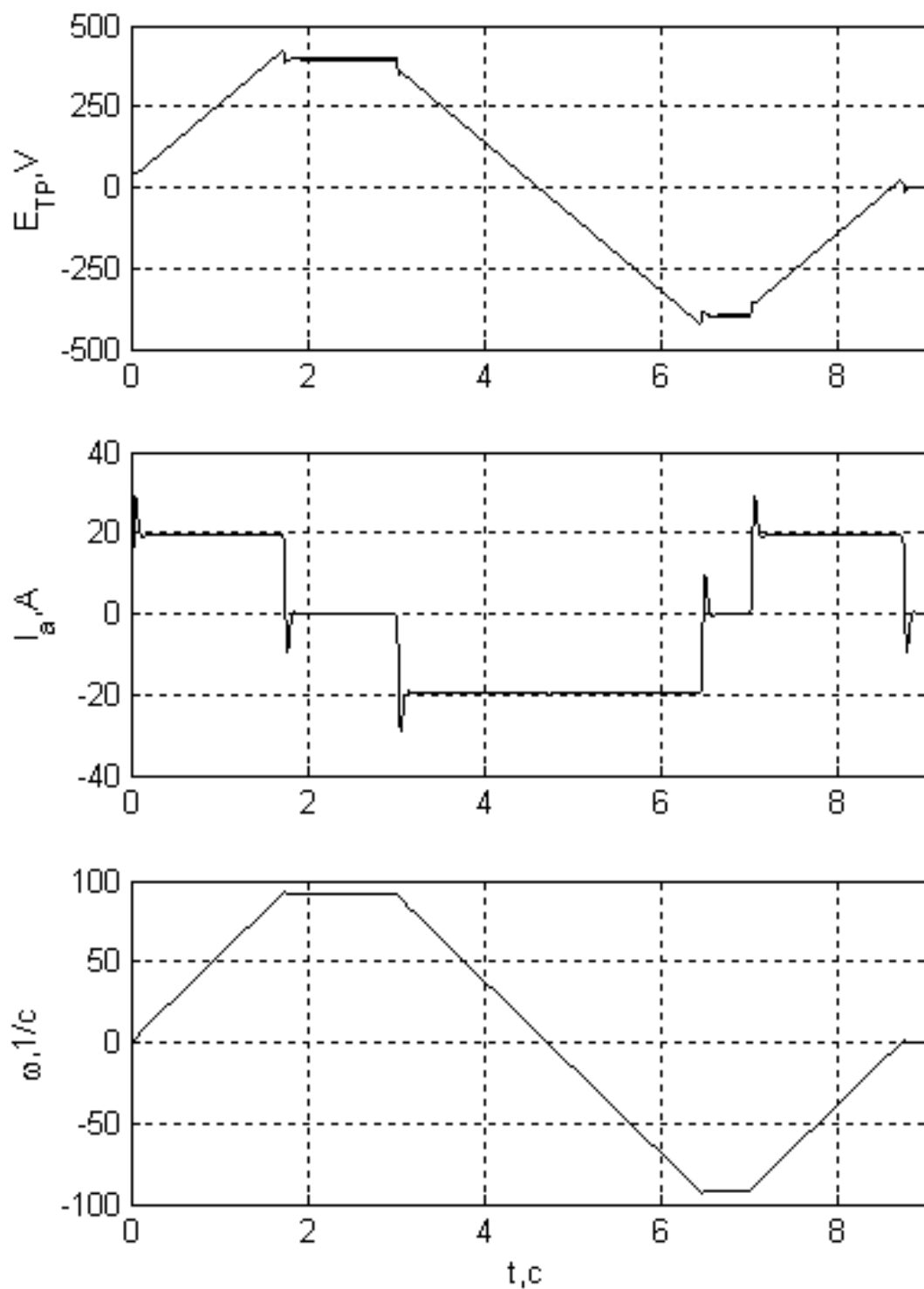


Рисунок 5.5 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

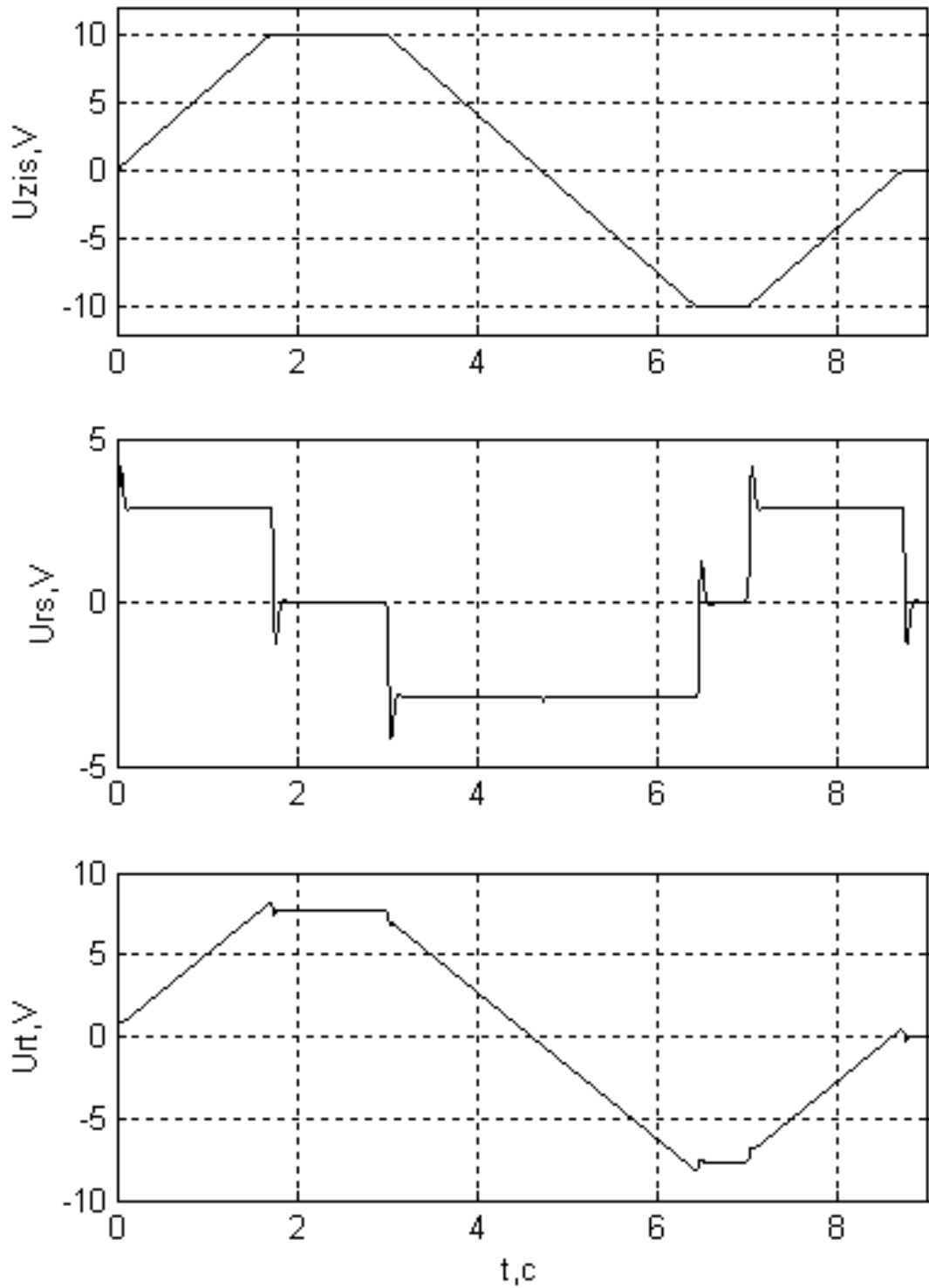


Рисунок 5.6 - Перехідні процеси на виході регуляторів і ЗІС при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

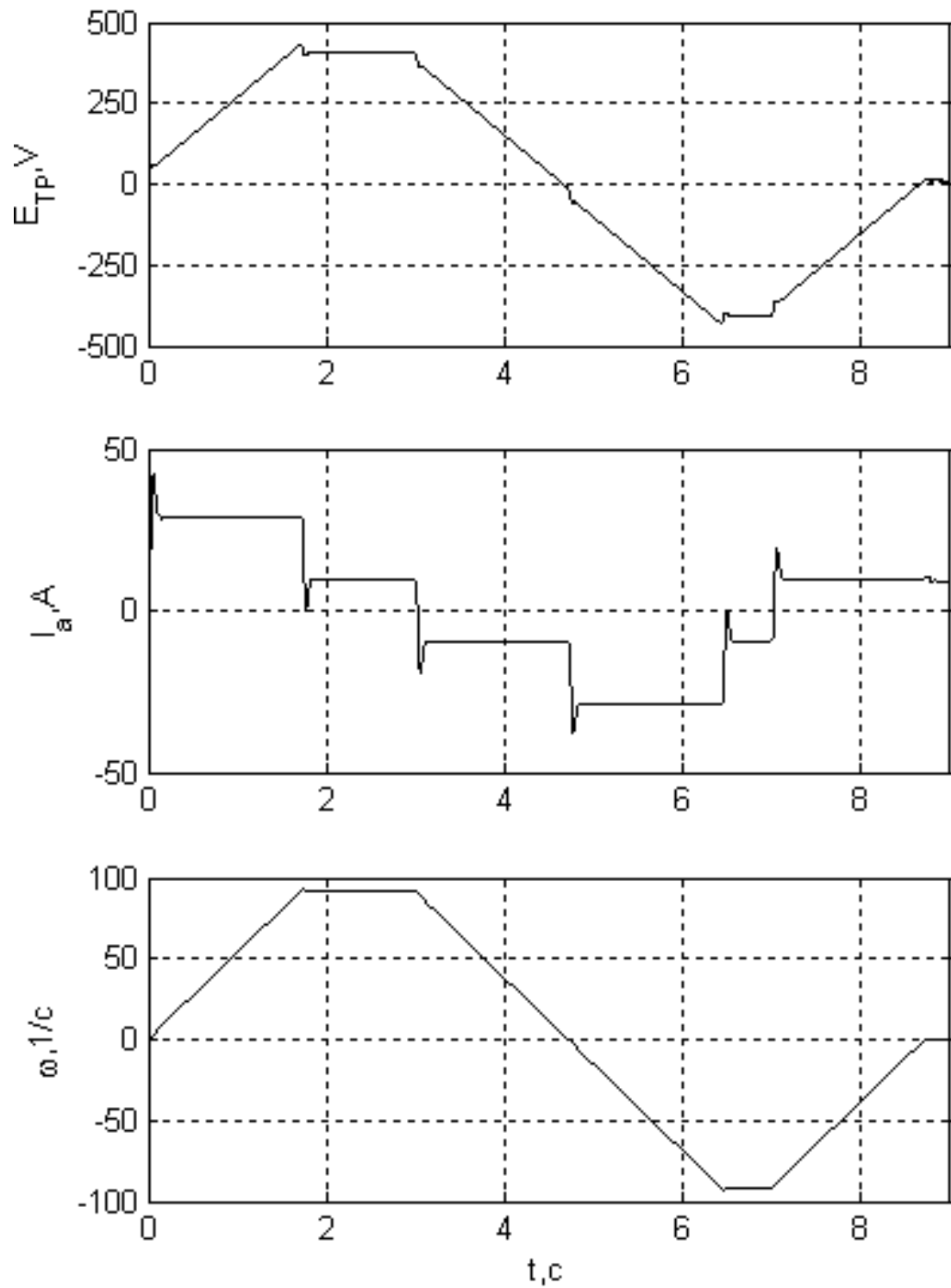


Рисунок 5.7 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні під навантаженням

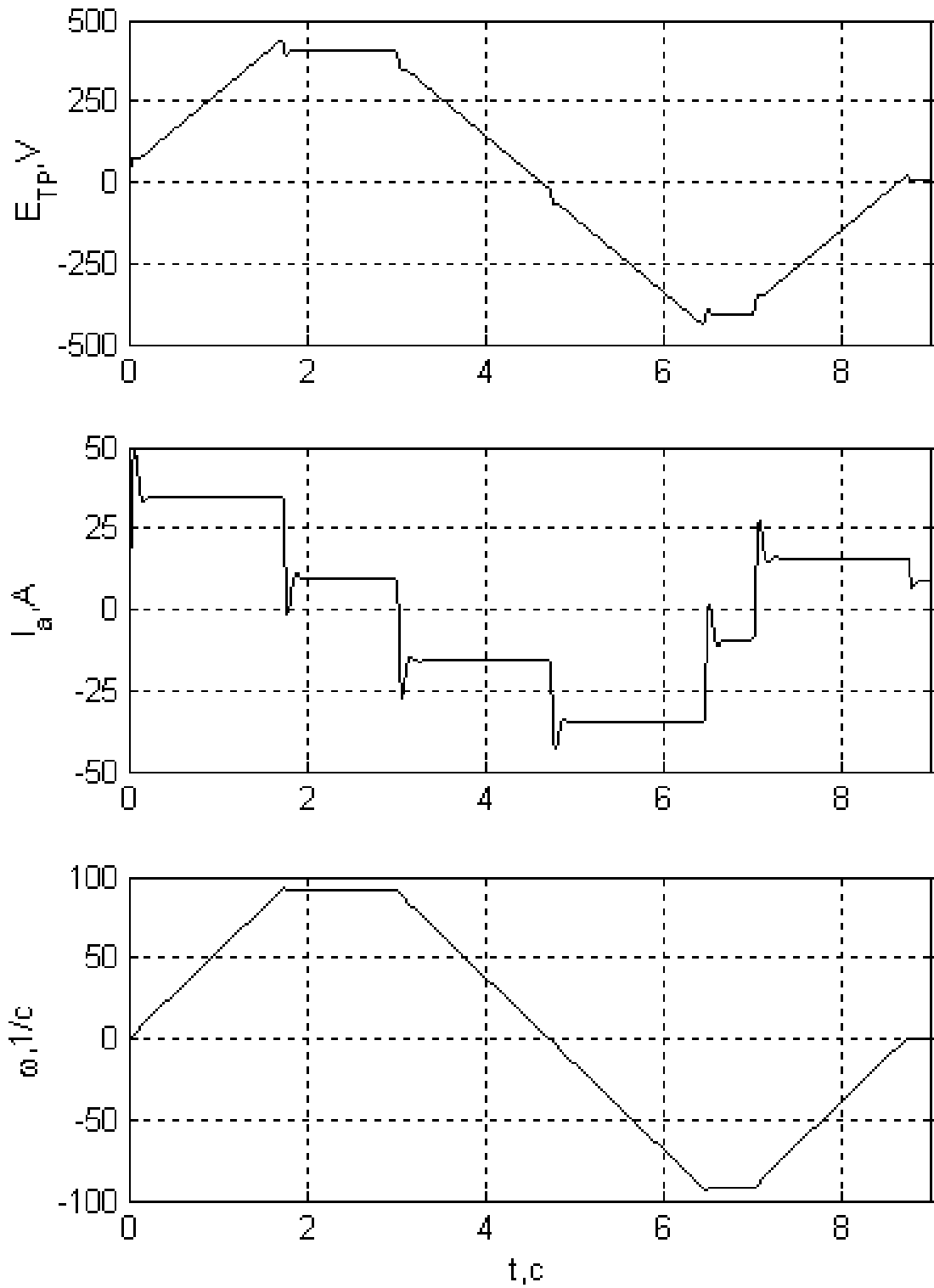


Рисунок 5.8 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

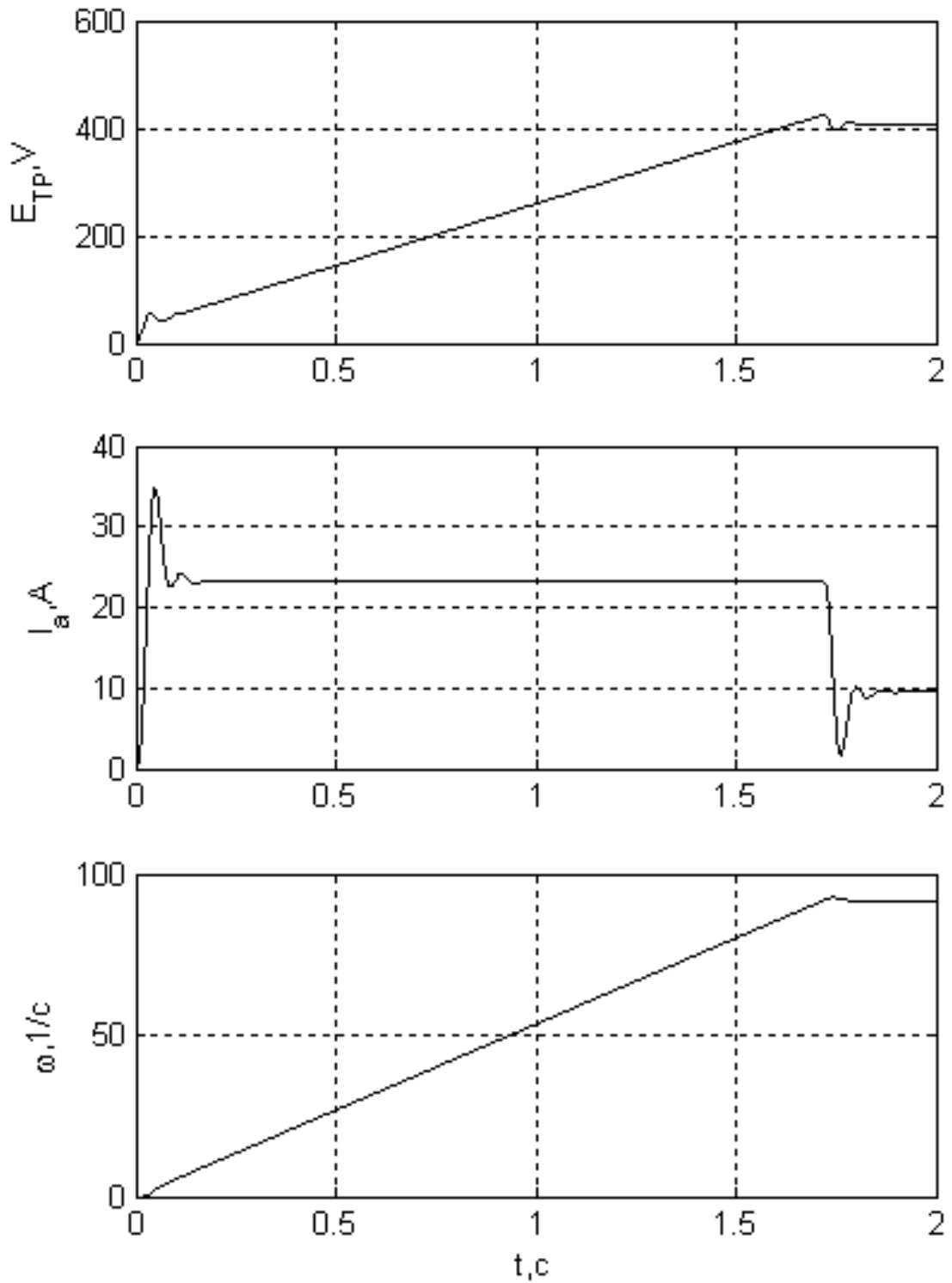


Рисунок 5.9 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot J_z$

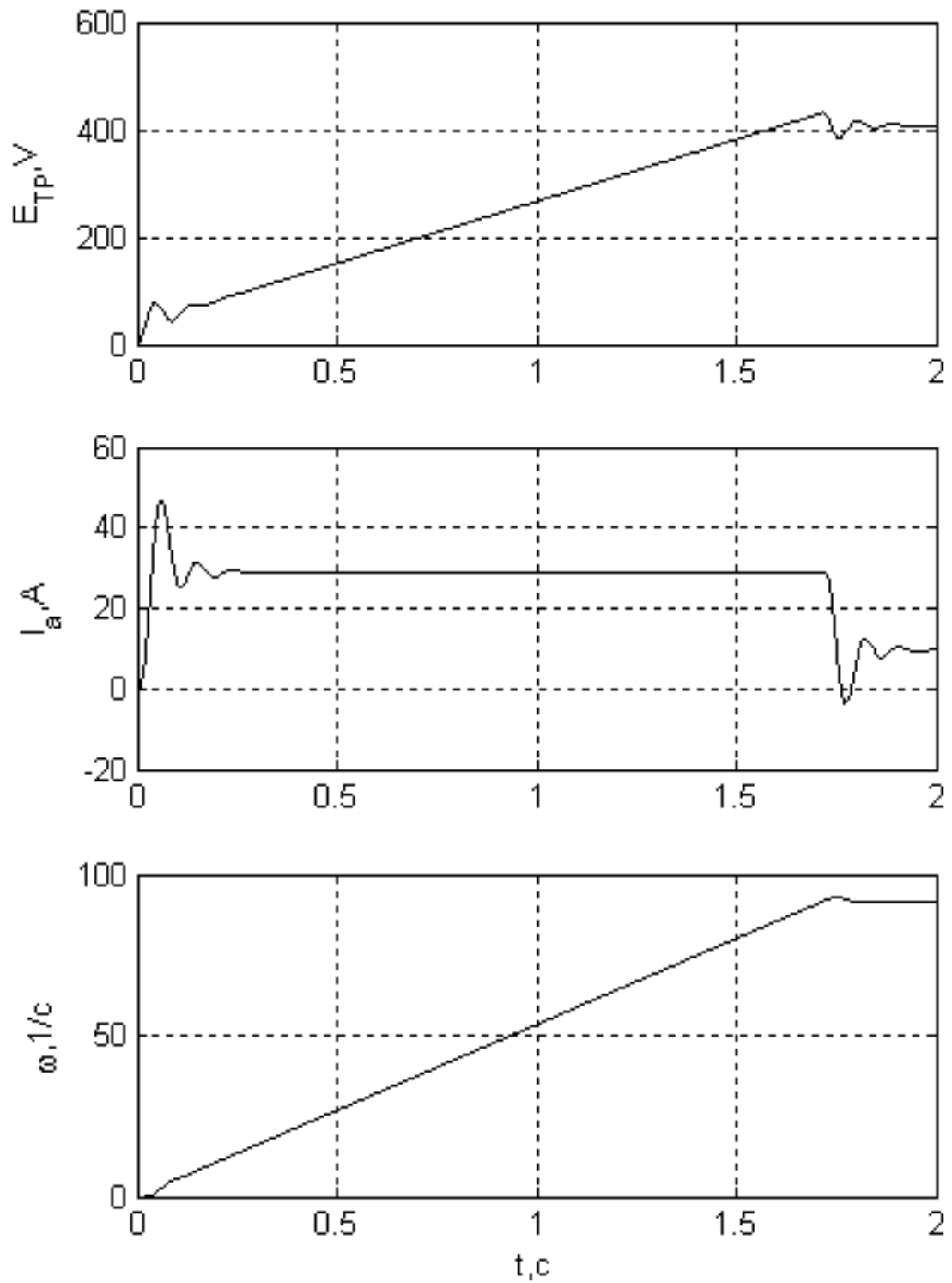


Рисунок 5.10 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,5 \cdot T_d$

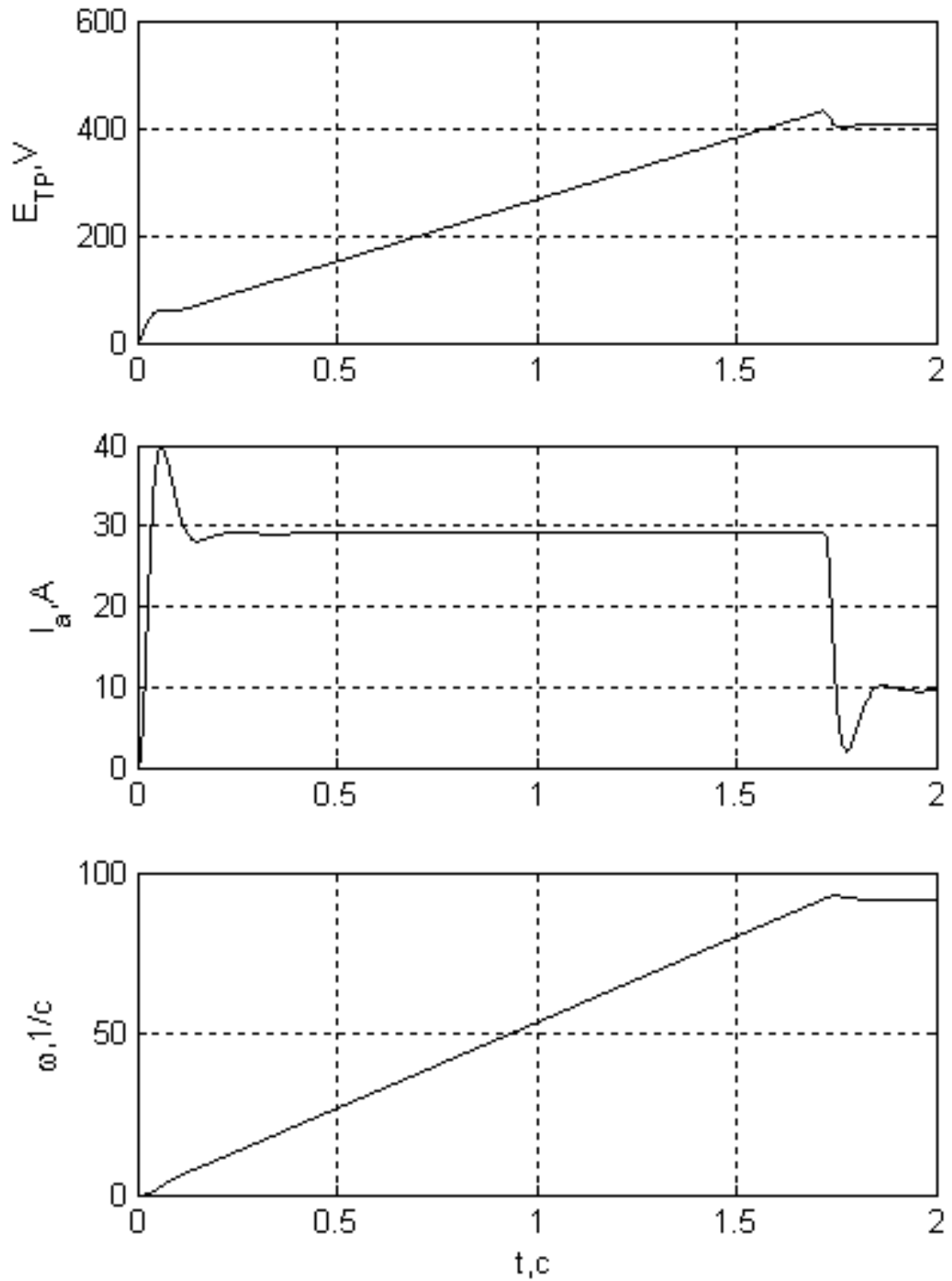


Рисунок 5.11 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot T_d$

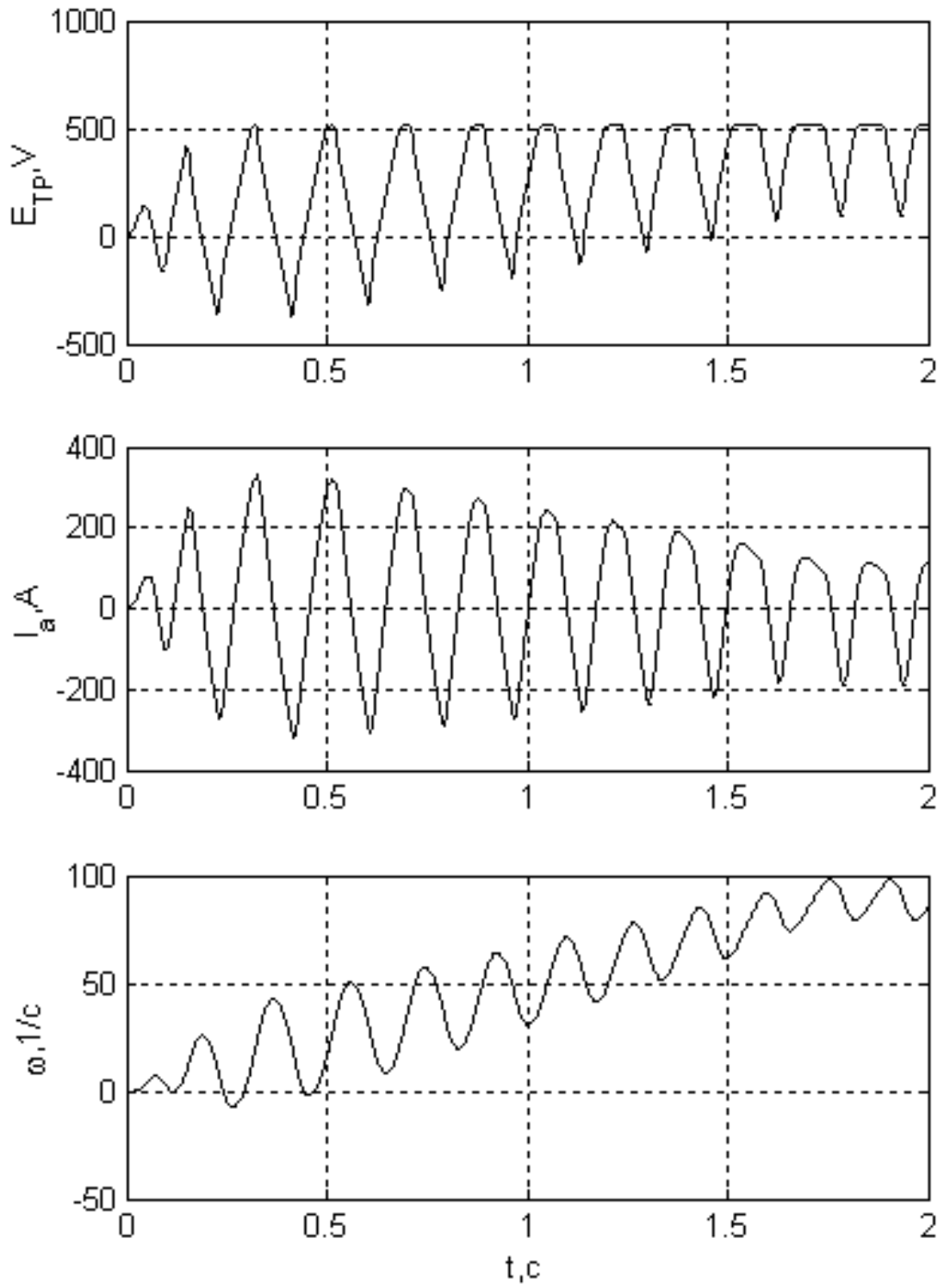


Рисунок 5.12 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку за струмом

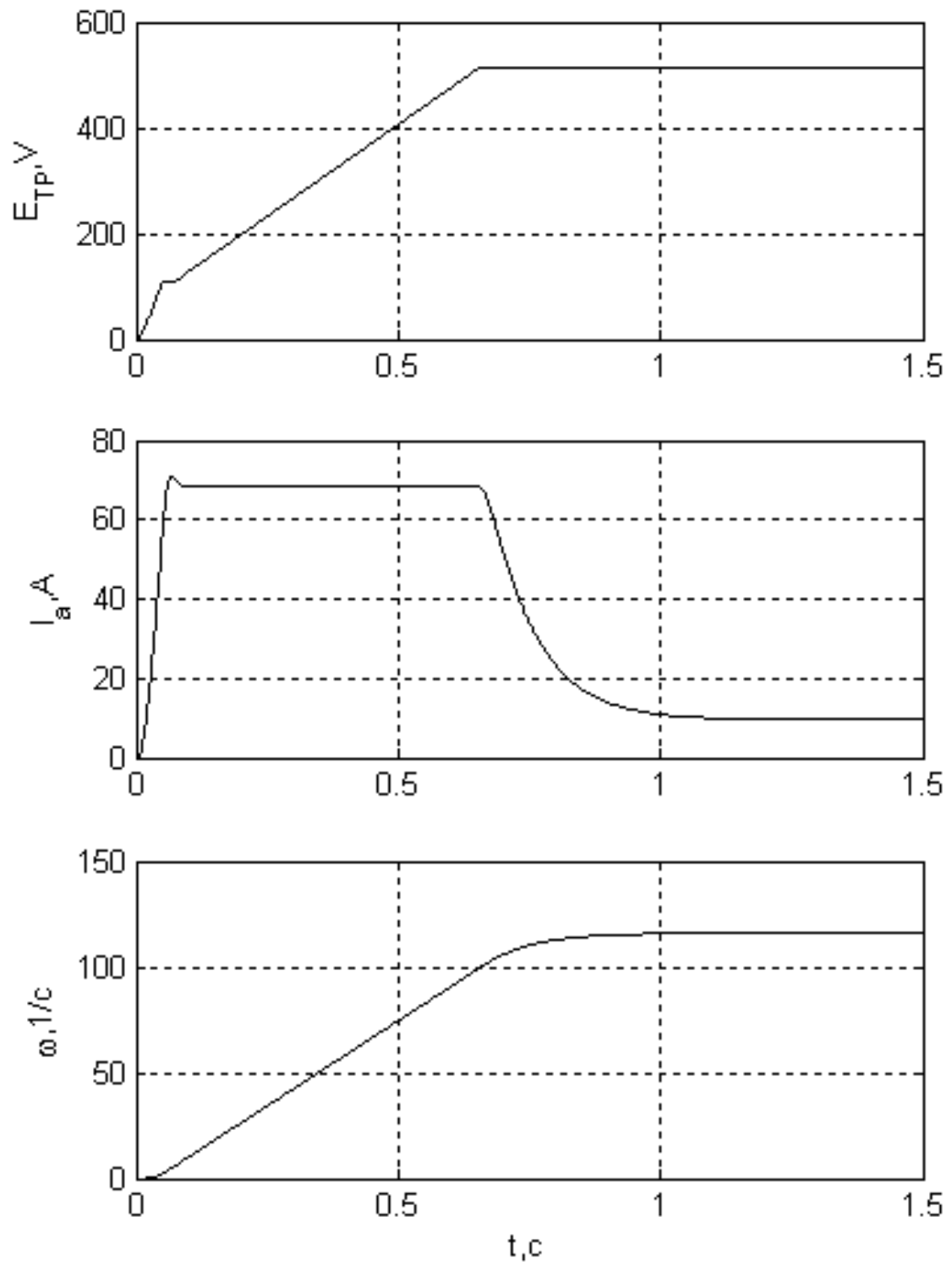


Рисунок 5.13 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку за швидкістю

6 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ В ПРОСТОРИ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ

При розробці системи керування електроприводом певного класу механізмів можливе успішне застосування аналітичного конструювання регуляторів, за допомогою якого синтезуються структурні схеми управління, що забезпечують рух електроприводу з виконанням заданого критерію якості.

Найбільш перспективним для вирішення завдань синтезу систем оптимального управління є метод динамічного програмування Р. Белмана. Застосування цього методу з використанням в якості критерію оптимальності мінімуму інтегральної помилки дозволяє отримати алгоритм оптимального управління регулятора, не тільки оптимізуючи прийнятий функціонал якості, а й забезпечує стійкість руху фазових координат об'єкта управління.

Якщо силові частини об'єкта управління описуються лінійними диференціальними рівняннями і в якості критерію оптимальності приймається мінімум інтегральної квадратичної помилки, за допомогою зазначеної методики можна отримати алгоритми оптимальних управлінь в функції фазових координат. Це забезпечує легку реалізацію такої системи управління, так як всі зворотні зв'язки виявляються жорсткими. Однак статична помилка в такій системі, що виникає при наявності статичного моменту на валу, не дорівнює нулю і по своїй величині близька до помилки одноразово інтегрує лінійної системи. У зв'язку з цим актуальним є створення системи з гнучкою зворотним зв'язком по одній лише вихідній координаті. Статизм такої системи дорівнює нулю, що відповідає вимогам.

Застосування в якості регуляторів фазових координат релейних елементів, що працюють в ковзному режимі, дозволяє без втрат стійкості отримати дуже великі коефіцієнти підсилення. Тим самим забезпечується не тільки оптимізація управління, а інваріантність системи до параметричних збурень.

6.1 Синтез регулятора струму в просторі природних координат

Синтез контура струму проведемо в просторі ЕРС перетворювача, струму і швидкості. Для цього запишемо систему рівнянь, що описує контур струму:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_g \\ (T_g p + 1) \cdot I = (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) / R_g \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{mn} \cdot U_y \end{cases} \quad (6.1)$$

Запишемо систему (6.1) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_g}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_g} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_g \cdot T_g} \cdot \omega + \frac{1}{R_g \cdot T_g} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (6.2)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{i}{I_m}; x_2 = \frac{\omega}{\omega_m}; x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (6.3)$$

де $I_m = 2.5 \cdot I_H$ – максимально припустимий струм якоря;

$\omega_m = \omega_0$ – швидкість ідеального холостого ходу;

E_{nm} – максимальна ЕРС перетворювача;

$U_{ym} = 10 \text{ В}$ – максимальне значення керуючого впливу.

З урахуванням (6.3) система (6.2) набуде вигляду

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_3 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\text{де } b_{11} = -\frac{1}{T_{\text{э}}}, \quad b_{12} = -\frac{C\Phi_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{м}}}{R_{\text{э}} \cdot T_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}}, \quad b_{13} = \frac{E_{\text{пм}}}{R_{\text{э}} \cdot T_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}},$$

$$b_{21} = \frac{R_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}}{T_{\text{м}} \cdot C\Phi_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{м}}}, \quad b_{33} = -\frac{1}{T_{\mu}}, \quad n_3 = \frac{k_{\text{тп}} \cdot U_{\text{ум}}}{T_{\mu} \cdot E_{\text{пм}}}.$$

Для зменшення трудомісткості виконання курсового проекту розрахунок коефіцієнтів системи (6.4) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою прикладної програми MATLAB.

Перейдемо до відносних одиниць, тобто

$$\eta_i = x_i^* - x_i, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

де x_i^* - деяка стабілізуюча траєкторія.

В цьому випадку ми переходимо в фазовий простір обуреного руху:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{11} \cdot \eta_1 + b_{12} \cdot \eta_2 + b_{13} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (6.5)$$

Перед нами стоїть завдання знайти управління, обмежене умовою $|u| \leq 1$ і таке, яке оптимізує функціонал виду:

$$J = \int_0^{\infty} \left(k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2 \right) dt,$$

де k_{11} , k_{22} и k_{33} - коригувальні коефіцієнти, що обмежують координати η_1 , η_2 и η_3 відповідно.

Для вирішення поставленого завдання необхідно знайти функцію Ляпунова V , яка є рішенням функціонального рівняння Беллмана:

$$\min \left[k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \left(\sum_{j=1}^4 b_{ij} \cdot \eta_j + n_4 \cdot u \right) \right] = 0.$$

У цьому випадку управління шукається у вигляді:

$$u = -\text{sign} \left(\sum_{i=1}^4 n_i \cdot \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \right),$$

$$\text{де } V = \sum_{i=1}^4 A_{ij} \cdot \eta_i \cdot \eta_j \quad (A_{ij} = A_{ji}).$$

Для визначення коефіцієнтів функції Ляпунова скористаємося векторним рівнянням Барбашина:

$$C \cdot A = -K \quad (6.6)$$

де C – матриця Барбашина

$$C = \begin{bmatrix} C_{11,11} & C_{12,11} & \dots & C_{ij,11} & \dots & C_{mm,11} \\ C_{11,12} & C_{12,12} & \dots & C_{ij,12} & \dots & C_{mm,12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{11,kl} & C_{12,kl} & \dots & C_{ij,kl} & \dots & C_{mm,kl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{11,mm} & C_{12,mm} & \dots & C_{ij,mm} & \dots & C_{mm,mm} \end{bmatrix}$$

$$C_{ij,kl} = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq k \text{ у } j \neq l; \\ b_{jl}, & \text{при } i = k \text{ у } j \neq l; \\ b_{ii} + b_{jj}, & \text{при } i = k \text{ у } j = l; \\ b_{ii}, & \text{при } i = j = k = l \end{cases} \quad (6.7)$$

A – вектор-стовпець коефіцієнтів Ляпунова;

K – вектор-стовпець обмежуючих коефіцієнтів.

Для нашого випадку рівняння (6.7) набуде вигляду:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{11} & 0 & b_{21} & 0 & 0 \\ b_{13} & 0 & b_{11} + b_{33} & 0 & b_{21} & 0 \\ 0 & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{13} & b_{12} & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & b_{13} & 0 & 0 & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{33} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Для даної системи:

$$V = A_{11} \cdot \eta_1^2 + 2 \cdot A_{12} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 + 2 \cdot A_{13} \cdot \eta_1 \cdot \eta_3 + A_{22} \cdot \eta_2^2 + 2 \cdot A_{23} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 + A_{33} \cdot \eta_3$$

Таким чином, управління має вигляд:

$$u = -\text{sign}(A_{31} \cdot \eta_1 + A_{32} \cdot \eta_2 + A_{33} \cdot \eta_3) \quad (6.8)$$

В соответствии с (6.8) структурная схема контура тока примет вид, приведенный на рисунке 6.1.

Відповідно до (6.8) структурна схема контуру струму набуде вигляду, наведений на малюнку 6.1.

Обчислення коефіцієнтів A_{13} , A_{23} і A_{33} вироблено за допомогою прикладної програми MCAD і знаходиться в додатку А.

Структурна схема контуру струму набуде вигляду рис. 6.1

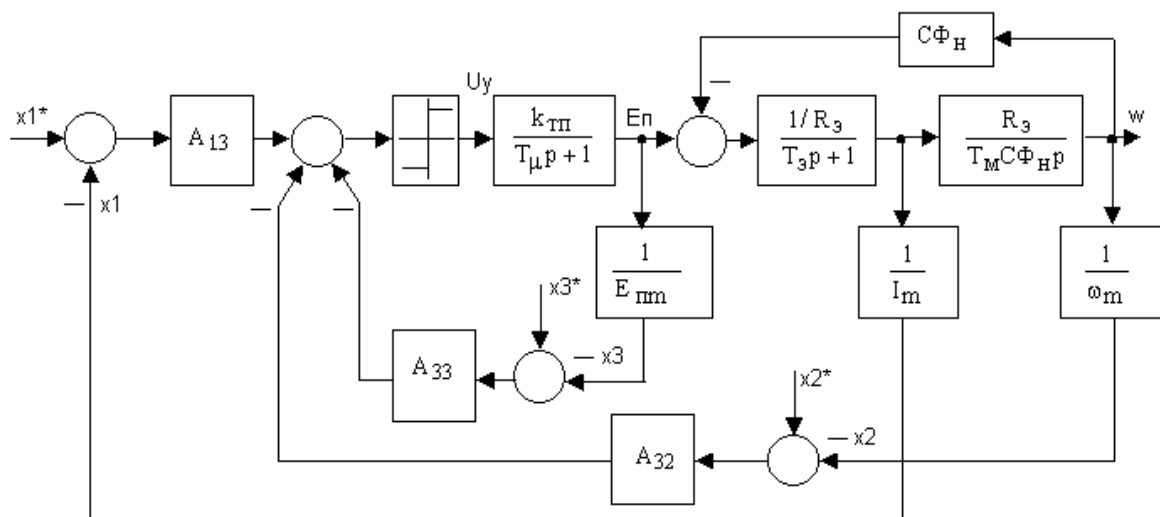


Рисунок 6.1 – Структурна схема блоку регулятора струму

Функціональна схема релейного регулятора струму зображена на рисунку 6.2. Підсилювач DA2 формує сигнал пропорційний першій похідній струму.

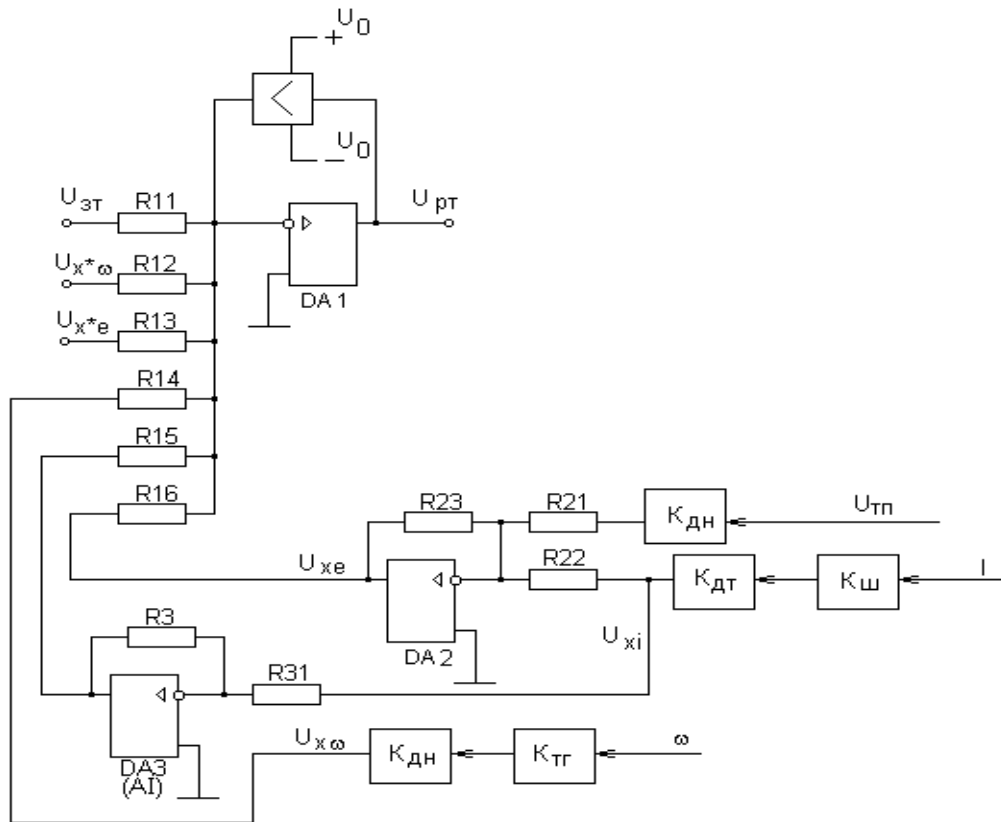


Рисунок 6.2 – Функціональна схема релейного регулятора струму

Для отримання інформації про ЕРС ТП в схемі застосований підсумовує підсилювач DA2, на виході якого складаються сигнали датчиків струму і напруги. Якщо максимальна вихідна напруга датчика напруги ТП одно 10В, то його коефіцієнт передачі:

$$K_{ДН} = \frac{U_{ДНмакс}}{U_{ТПмакс}} = \frac{U_{ДНмакс}}{E_{ТПмакс}} \quad (6.9)$$

Вихідна напруга DA2 визначається виразом:

$$U_{ОЭ} = \frac{R_2}{R_{21}} \cdot k_{ДН} \cdot U_{ТП} + \frac{R_2}{R_{21}} \cdot k_{ДТ} \cdot k_{Ш} \cdot I \quad (6.10)$$

Нехай $R_2=33$ кОм

$$R_{22} = \frac{R_2 k_{\text{ом}} k_{\text{ш}} I_n}{U_{\text{оз}} - \frac{R_2}{R_{21}} k_{\text{он}} E_{\text{mn}}} = \frac{33000 \cdot 320 \cdot 0,000075 \cdot 795}{10 - \frac{33000}{33000} 0,0322 \cdot 230} = 242729 \text{ Ом} \quad (6.11)$$

Опір інвертора, виконаного на операційному підсилювачі DA3, дорівнює $R_3=R_{31}=100$ кОм.

$$R_{11} = \frac{U_{\text{зм.макс}}}{k \cdot A_{13}} = \frac{10}{1,5 \cdot 0,025} = 266,66 \text{ Ом}$$

$$R_{12} = \frac{k_{\text{мг}} \omega_{\text{макс}}}{k |A_{23}|} = \frac{1,91 \cdot 52,36}{1,5 \cdot 0,003091} = 17051,5 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = \frac{k_{\text{ом}} k_{\text{ш}} I_{\text{макс}}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,000075 \cdot 1988}{1,5 \cdot 0,025} = 1272 \text{ Ом}$$

$$R_{14} = \frac{k_{\text{он}} \cdot E_{\text{мп.макс}}}{k \cdot A_{33}} = \frac{0,0322 \cdot 310,5}{1,5 \cdot 0,004883} = 1365,28 \text{ Ом}$$

де $k=1.5$ – коефіцієнт пропорційності.

Приймаємо резистори типу МЛТ-0,125 опором 270 Ом, 17 кОм 1300 Ом і 130 Ом відповідно.

6.2 Синтез регулятора швидкості в просторі природних координат

Запишемо систему рівнянь, що описує контур швидкості:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_s \\ (T_s p + 1) \cdot I = \frac{1}{R_s} (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{\text{mn}} \cdot U_y \end{cases} \quad (6.17)$$

Запишемо систему (6.17) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_3}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_3} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_3 \cdot T_3} \cdot \omega + \frac{1}{R_3 \cdot T_3} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (6.18)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{\omega}{\omega_m}; \quad x_2 = \frac{I}{I_m}; \quad x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; \quad u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (6.19)$$

де $I_m = 2,5 \cdot I_n$ – максимально припустимий струм якоря;

$\omega_m = \omega_0$ – швидкість ідеального холостого ходу;

E_{nm} – максимальна ЕРС перетворювача;

$U_{ym} = 10 \text{ В}$ – максимальне значення керуючого впливу.

З урахуванням (6.19) система (6.18) набуде вигляду:

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{12} \cdot x_2 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 + b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (6.20)$$

$$\text{де } b_{12} = \frac{R_3 \cdot I_m}{T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega_m}, \quad b_{22} = -\frac{1}{T_3}, \quad b_{21} = -\frac{C\Phi_n \cdot \omega_m}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m}, \quad b_{23} = \frac{E_{nm}}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m},$$

$$b_{33} = -\frac{1}{T_\mu}, \quad n_3 = \frac{k_{mn} \cdot U_{ym}}{T_\mu \cdot E_{nm}}.$$

Розрахунок коефіцієнтів системи (6.20) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою прикладної програми MATLAB.

Перейдемо до відносних одиниць, тобто

$$\eta_i = x_i^* - x_i, \quad i=1, 2, 3, 4,$$

де x_i^* – деяка стабілізуюча траєкторія.

В цьому випадку ми переходимо в фазовий простір збуреного руху:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{12} \cdot \eta_2 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 + b_{22} \cdot \eta_2 + b_{23} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (6.21)$$

Перед нами стоїть завдання знайти управління, обмежене умовою $|u| \leq 1$ і яке оптимізує функціонал виду:

$$J = \int_0^{\infty} (k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2) dt,$$

де k_{11} , k_{22} и k_{33} - коригувальні коефіцієнти, що обмежують координати η_1 , η_2 и η_3 відповідно.

Для вирішення поставленого завдання необхідно знайти функцію Ляпунова V , яка є рішенням функціонального рівняння Беллмана:

$$\min \left[k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \left(\sum_{j=1}^4 b_{ij} \cdot \eta_j + n_i \cdot u \right) \right] = 0.$$

У цьому випадку управління шукаємо у вигляді:

$$u = -\text{sign} \left(\sum_{i=1}^4 n_i \cdot \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \right),$$

$$\text{де } V = \sum_{i=1}^4 A_{ij} \cdot \eta_i \cdot \eta_j \quad (A_{ij} = A_{ji}).$$

Для визначення коефіцієнтів функції Ляпунова скористаємося векторним рівнянням Барбашина

Для нашого випадку рівняння набуде вигляду:

$$\begin{pmatrix} 0 & b_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{22} & 0 & b_{21} & 0 & 0 \\ 0 & b_{23} & b_{33} & 0 & b_{21} & 0 \\ 0 & b_{12} & 0 & b_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{12} & b_{23} & b_{33} + b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{33} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Для даної системи:

$$V = A_{11} \cdot \eta_1^2 + 2 \cdot A_{12} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 + 2 \cdot A_{13} \cdot \eta_1 \cdot \eta_3 + \\ + A_{22} \cdot \eta_2^2 + 2 \cdot A_{23} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 + A_{33} \cdot \eta_3^2$$

Таким чином, управління має вигляд:

$$u = -\text{sign}(A_{31} \cdot \eta_1 + A_{32} \cdot \eta_2 + A_{33} \cdot \eta_3) \quad (6.22)$$

Відповідно до (6.22) структурна схема контуру швидкості набуде вигляду представлений на рис. 6.3.

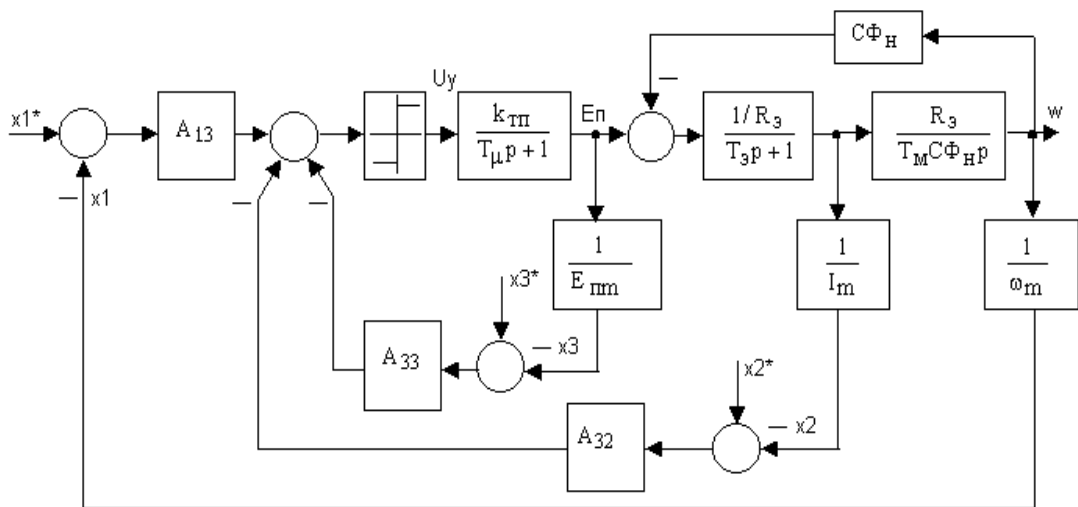


Рисунок 6.3 – Структурна схема контуру швидкості

Функціональна схема регулятора швидкості така ж, як і у регулятора струму, з тією різницею, що регулятор швидкості виробляє завдання на регулятор струму.

В результаті змінюються лише опору, причому приймаємо, що вхідний опір $R_{11} = 10 \text{ кОм}$, тоді

$$R_{12} = \frac{k_{mz} \omega_{\max}}{k |A_{23}|} = \frac{1,91 \cdot 52,36}{1,5 \cdot 0,006076} = 10972 \text{ Ом} \quad (6.23)$$

$$R_{13} = \frac{k_{om} k_{u} I_{\max}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,000075 \cdot 1988}{1,5 \cdot 0,007161} = 4442 \text{ Ом} \quad (6.24)$$

$$R_{14} = \frac{k_{on} \cdot E_{тн.макс}}{k \cdot A_{33}} = \frac{0,0322 \cdot 310,5}{1,5 \cdot 0,001164} = 5726 \text{ Ом} \quad (6.25)$$

Приймаємо $R_{12} = 41 \text{ кОм}$, $R_{13} = 4,3 \text{ кОм}$, $R_{14} = 5,6 \text{ кОм}$.

Повна структурна і функціональна схеми релейного системи електроприводу представлені на рисунках 6.4 і 6.5 відповідно.

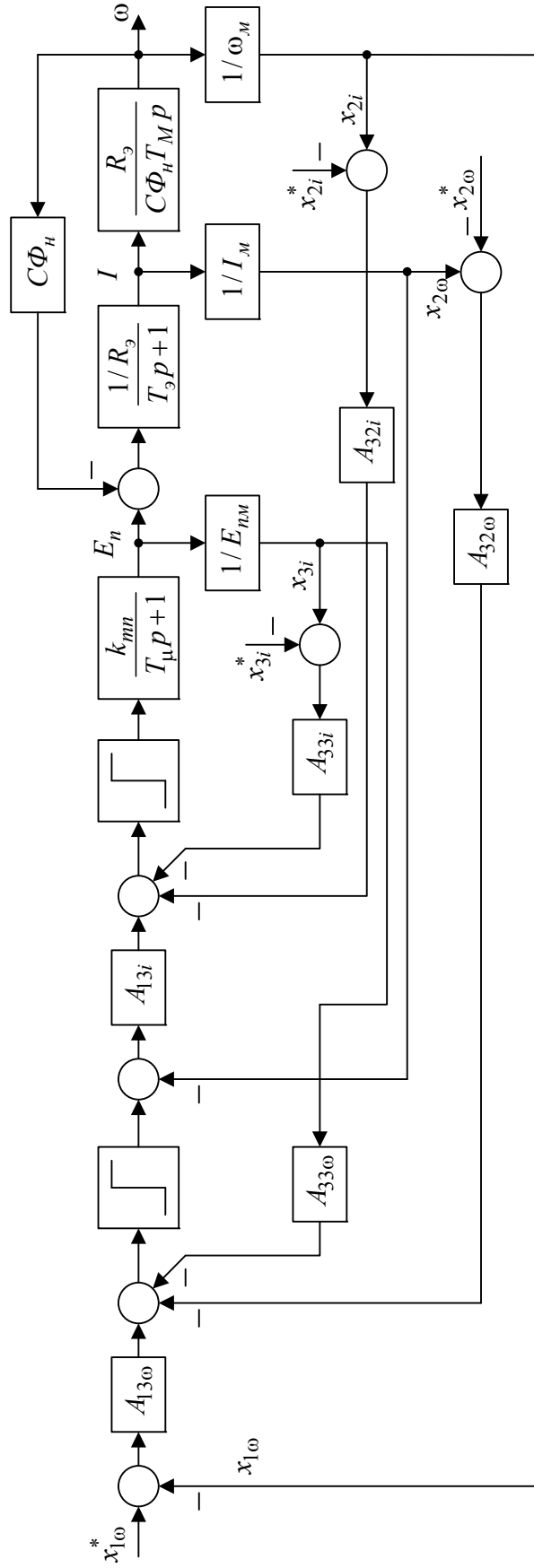


Рисунок 6.4 – Повна структурна схема релейної системи електроприводу

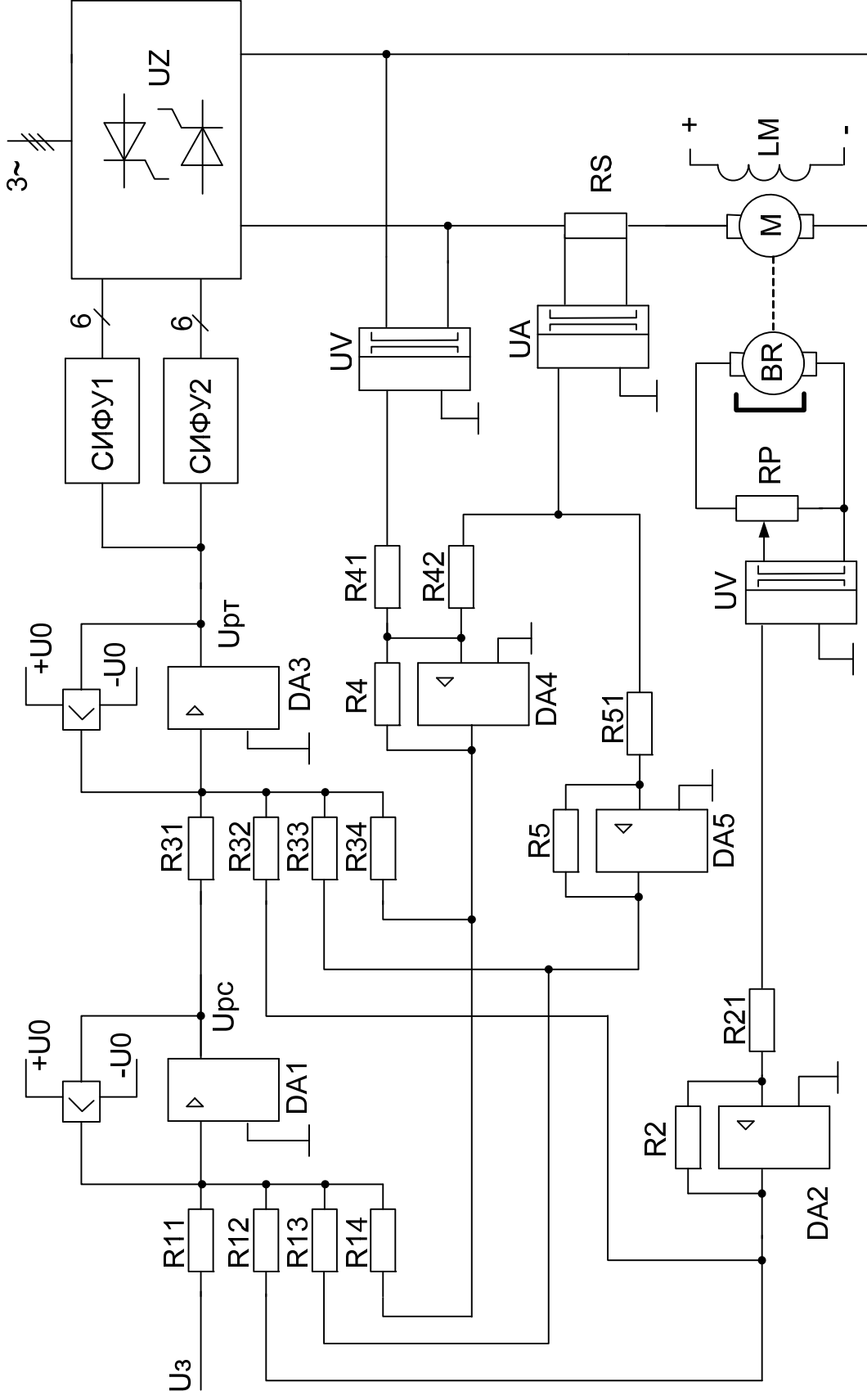


Рисунок 6.5 – Повна функціональна схема релейної системи електроприводу

6.3 Математичне моделювання електроприводу з релейною системою управління

Дослідження перехідних процесів в релейній системі керування електроприводом, синтезованої в просторі похідних, проводиться за допомогою пакета прикладних програм MATLAB /Simulink. Математична модель системи приведена на рисунку 6.6. Робота релейної системи досліджувалася за такою самою програмою як і класична система підпорядкованого регулювання. З графіків перехідних процесів (рис. 6.7 – 6.10) видно, що в релейній системі процеси мають кращу якість, а система має більшу точність. Крім того, в релейній системі при зміні сталих часу практично не змінюється якість перехідних процесів.

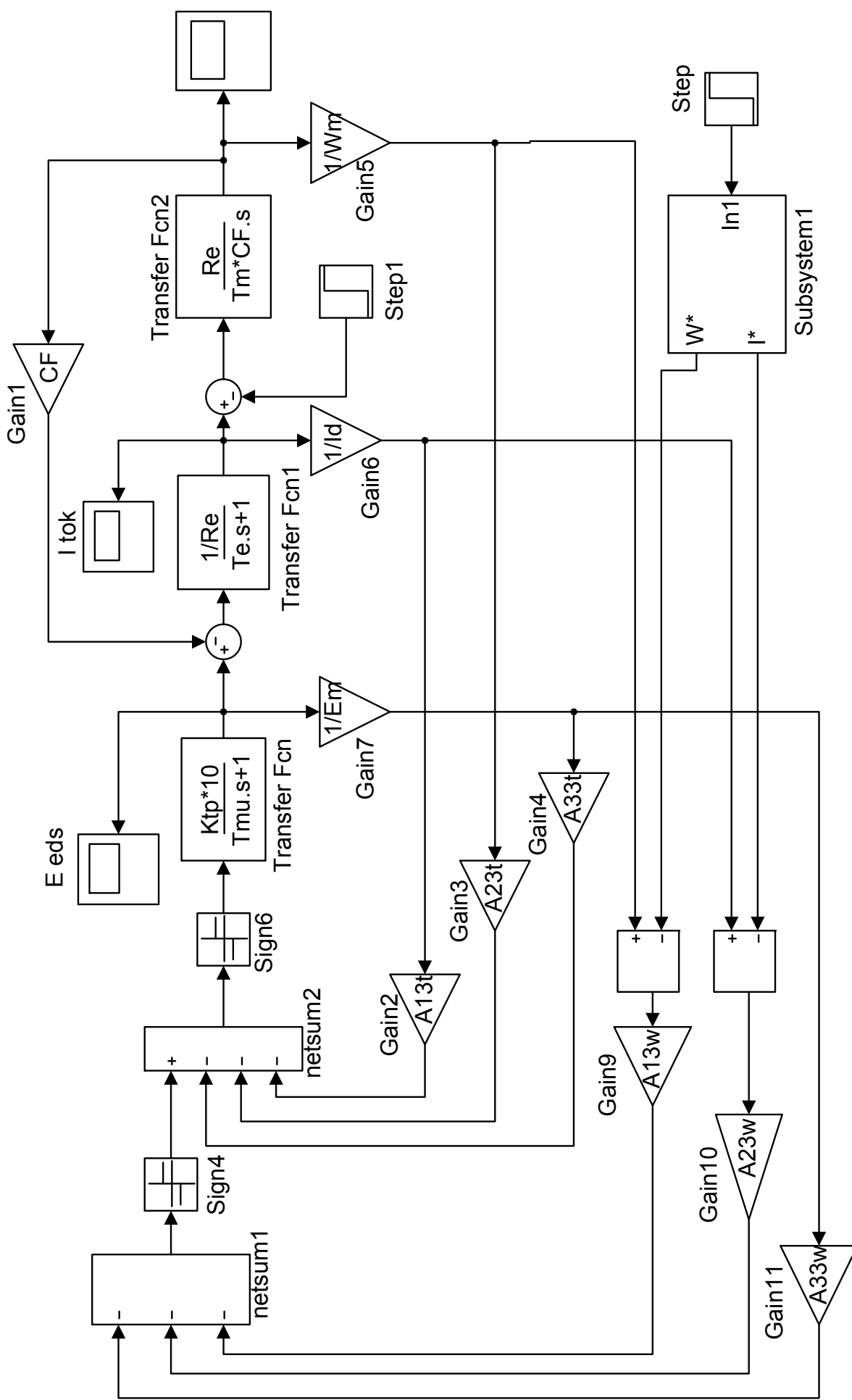


Рисунок 6.6 – Структура моделі релейної системи електроприводу

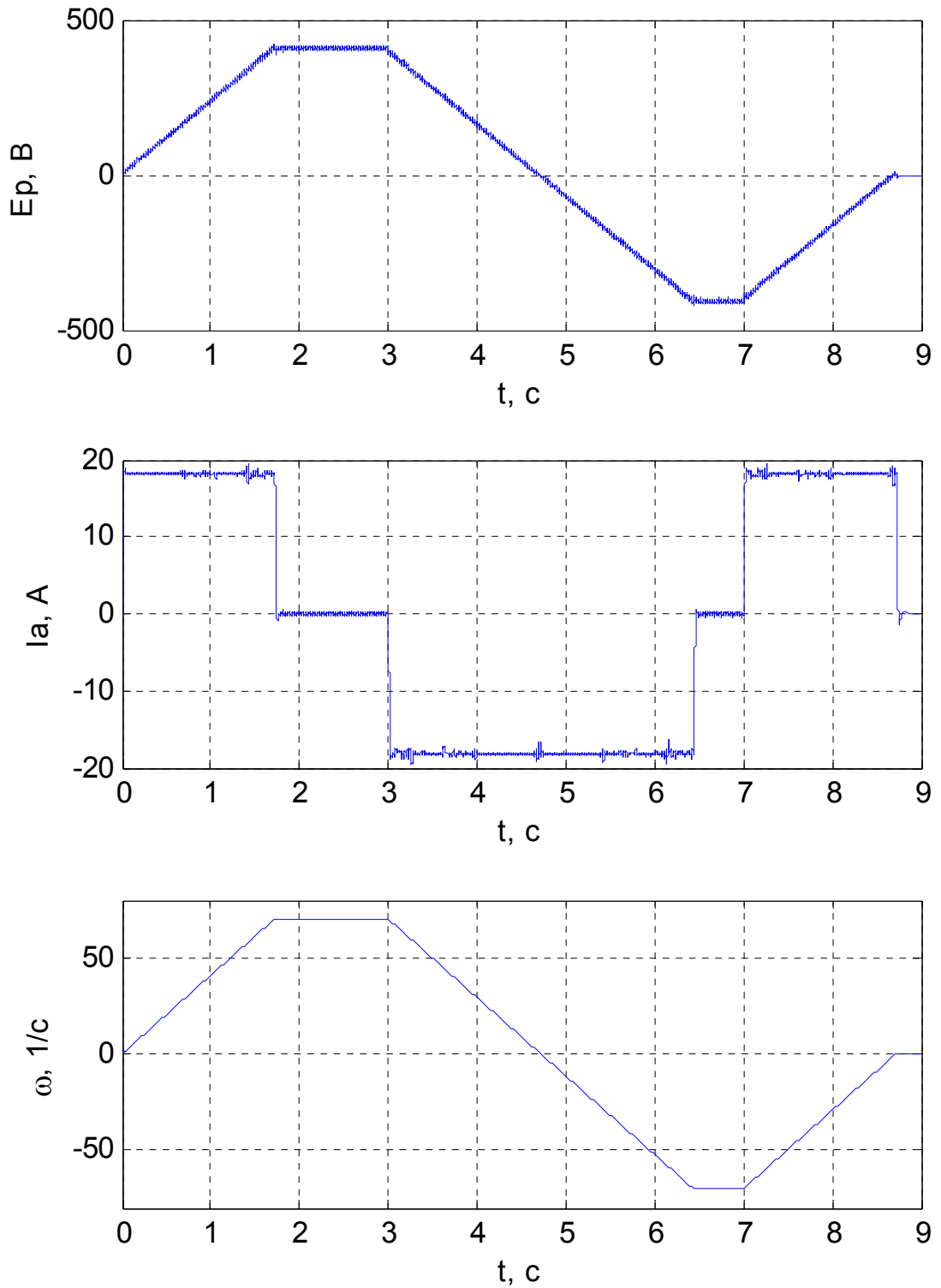


Рисунок 6.7 – Перехідні процеси пуску, реверсу та гальмування без навантаження

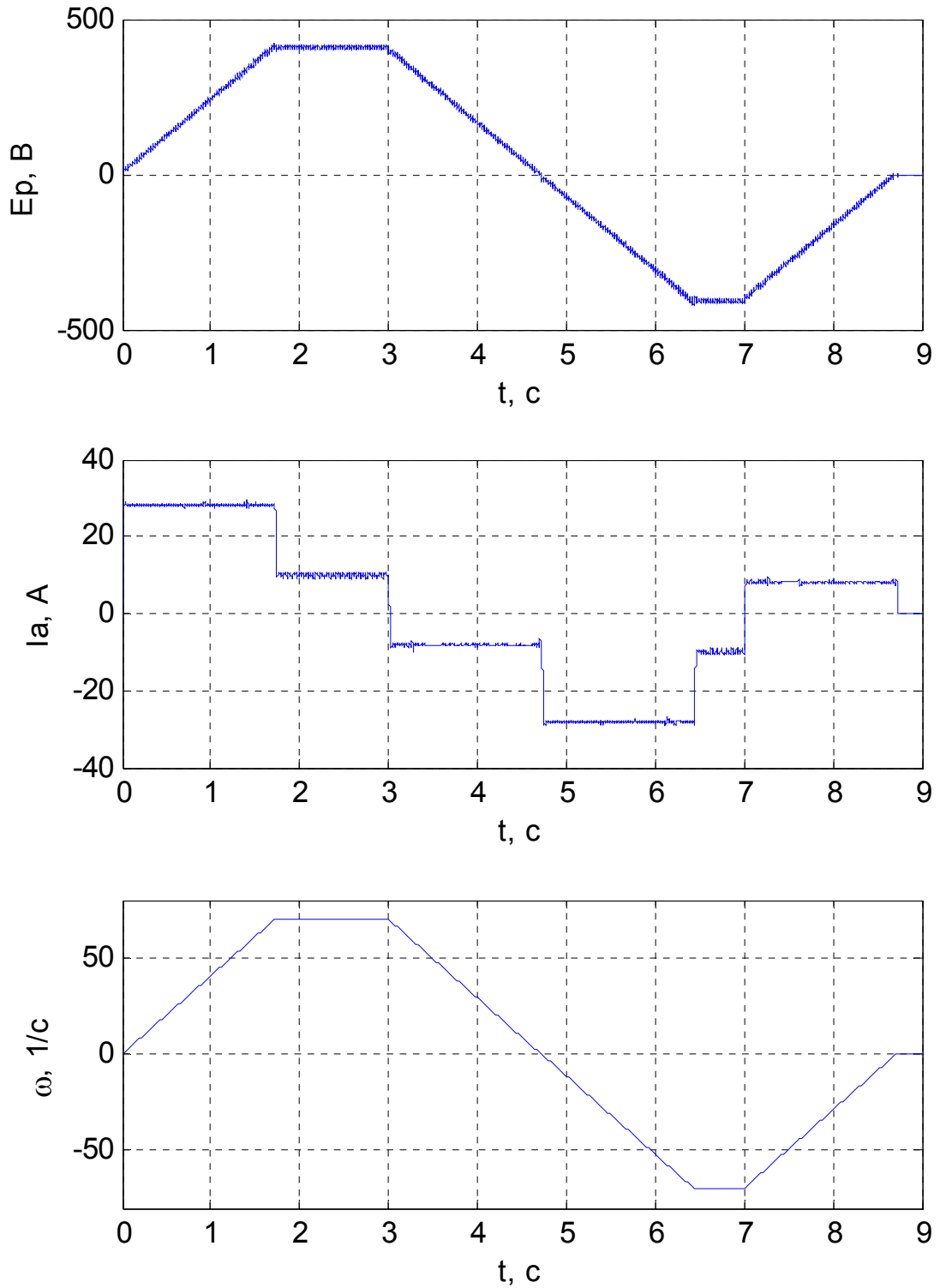


Рисунок 6.8 – Перехідні процеси пуску, реверсу та гальмування з навантаженням (реактивного характеру)

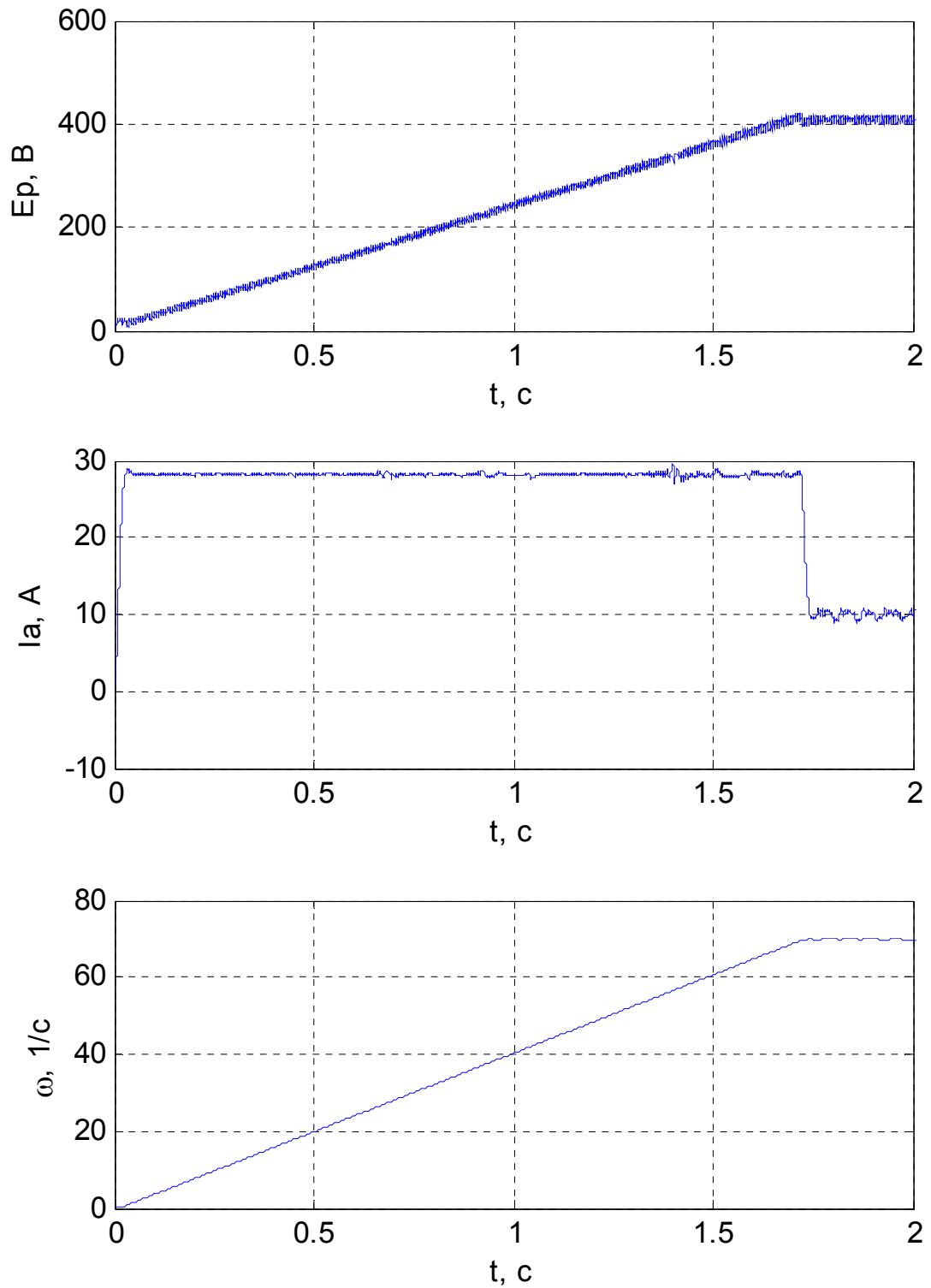


Рисунок 6.9 – Перехідні процеси пуску з навантаженням

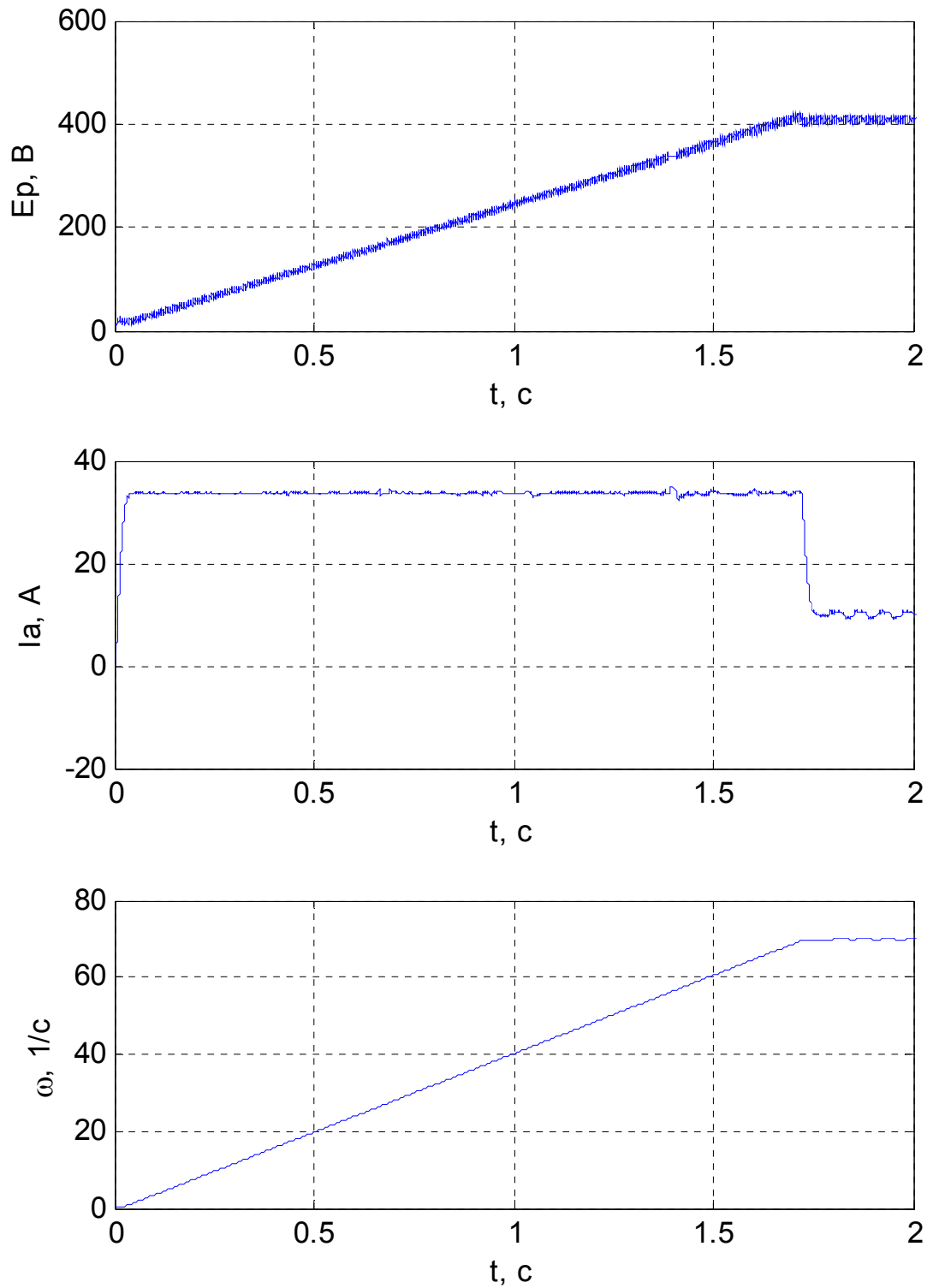


Рисунок 6.10 – Перехідні процеси пуску з навантаженням при $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

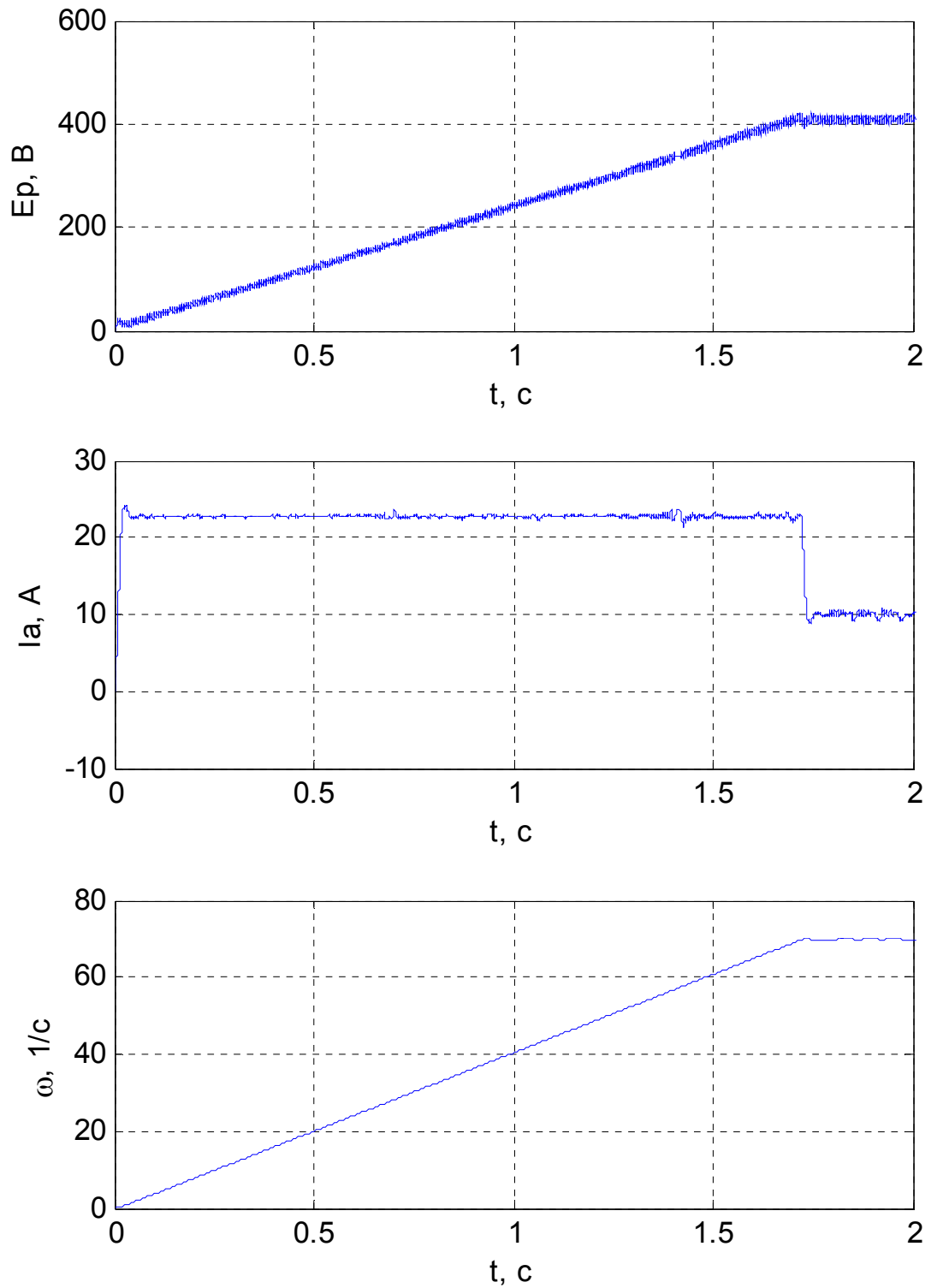


Рисунок 6.11 – Перехідні процеси пуску з навантаженням при $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

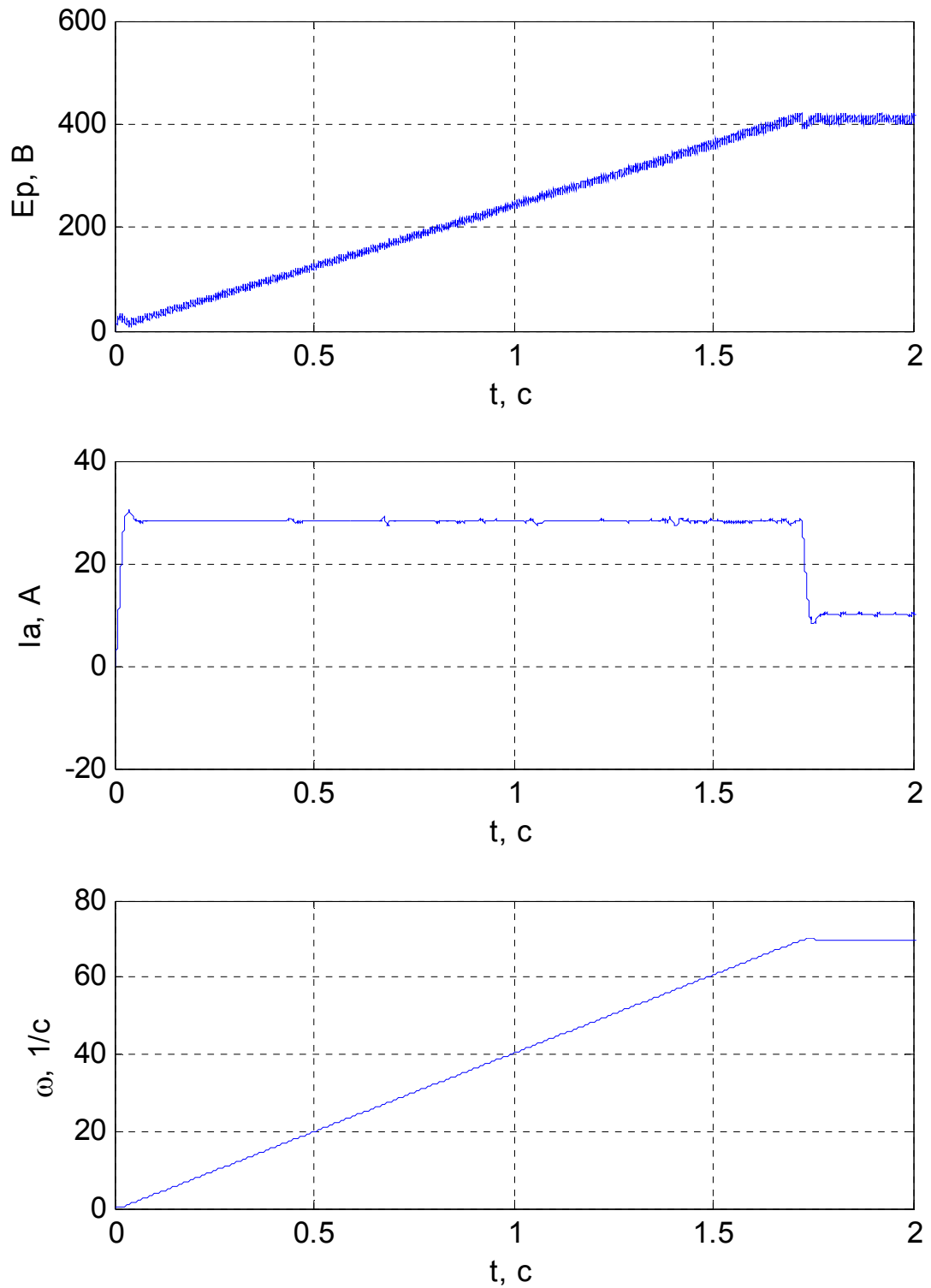


Рисунок 6.12 – Перехідні процеси пуску з навантаженням при $1,5 \cdot T_e$

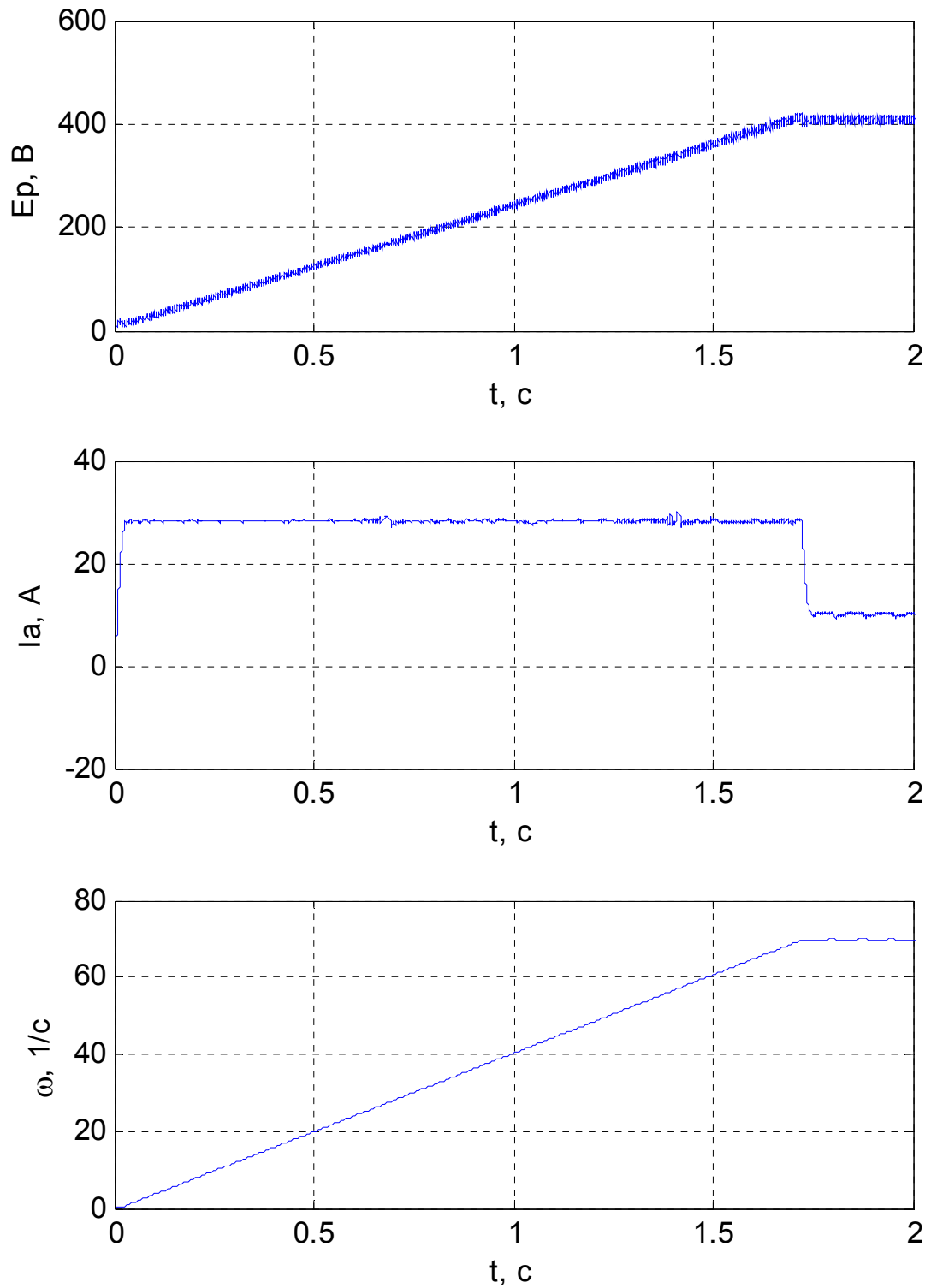


Рисунок 6.13 – Перехідні процеси пуску з навантаженням при $0,7 \cdot T_c$

ВИСНОВОК

В процесі проектування була ретельно розглянута технологія функціонування, призначення та особливості електроприводу для переміщення козлового крана ККД-15. Здійснено розрахунок потужності двигуна та виконана його перевірка з точки зору перевантажувальної здатності. У наслідок аналізу було вибрано двигун із краново-металургійної серії Д806.

Для живлення цього двигуна був обраний комплектний тиристорний електропривод КТЕ, спроектований для живлення постійних струмів. У межах проекту були розраховані параметри двоконтурної системи підпорядкованого управління з зовнішнім контуром швидкості та внутрішнім контуром струму.

За допомогою структурної схеми електропривода була розроблена математична модель в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Проведене моделювання функціонування електропривода при вихідних параметрах об'єкта управління та при їх зміні в межах $\pm 50\%$. Зазначено, що такі зміни можуть виникнути внаслідок різноманітних факторів, таких як недооцінка опору силових кабелів, сезонні зміни температури навколишнього середовища, загушення мастила і інших.

Отримані результати перехідних процесів свідчать про правильність побудови системи. Досліджуваний електропривод із синтезованою системою керування повністю відповідає технологічним вимогам, які ставляться до електропривода при вихідних параметрах об'єкта управління та навіть при їх відхиленнях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1(42). Емельянов С.В. Пути развития типов обратных связей и их применение при построении замкнутых динамических систем / Емельянов С.В., Коровин С.К. - Проблемы управления и теории информации, т. 10 № 3, 1984.1. - С. 161 - 174.
- 2(44). Емельянов С.В. Новые типы обратной связи / Емельянов С.В., Коровин С.К. – М.: Наука. Физматлит, 1997. - 352 с.
- 3(68). Петров Б.Л. Исследования по теории много связных систем / Сб. под ред. Петрова Б.Л.-М.: Наука, 1982. - 152 с.
- 4(72). Колмановский В.Б. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием / Колмановский В.Б., Носов В. Р. - М: Наука, 1984.1. - 448 с.
- 5(80). Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / Куржанский А.Б. - М.: Наука, 1977. -392 с.
- 6(104). Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Поляк Б.Т., Щербаков П.С. - М.: Наука, 2002. - 303с.
- 7(43). Емельянов С.В. Применение координатно-параметрической обратной связи при синтезе систем автоматического управления / Емельянов С.В., Коровин С.К., Сизиков В.И. - Проблемы управления и теория информации, т. 10 № 4, 1984.1.- С. 237 - 254.1.
- 8(65). Ильинский Н.Ф. Основы электропривода / Ильинский Н.Ф. – М.: Издательство МЭИ, 2004. - 221 с.
- 9(66). Ильинский Н.Ф. Общий курс электропривода / Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 544 с.
- 10(83). Леонхард В. Регулируемые электроприводы переменного тока / Леонхард В. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 196 - 239.
- 11(154). Цыпкин Я.4. Информационная теория идентификации / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1995. - 336 с.

- 12(157). Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов / Щипанов Г.В. - Автоматика и телемеханика, № 1, 1939.- С. 49 - 66.
- 13(9). Баховцев И.А. О синтезе алгоритмов управления для АИН с ШИМ / Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. - В кн.: Тиристорные преобразователи, Новосибирск: НЭТИ, 1985. - С. 23 - 34.
- 14(45). Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю.С. – М.: Энас, 2005. - 280 с.
- 15(46). Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Забродин Ю.С. - М.: Высшая школа, 1982. - 496 с.
- 16(48). Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники / Зиновьев Г.С. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос, тех ун-та, 2005. - 664 с.
- 17(60). Изосимов Д.Б. Улучшение качества энергопотребления полупроводниковыми преобразователями с ШИМ / Изосимов Д.Б., Рывкин С.Е. - Электричество, №4, 1996. - С. 48 - 55.
- 18(205). Holtz J. Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion / Holtz J. - Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, 1994. - pp. 1194-1214.
- 19(15). Борцов Ю.А. Автоматические системы с разрывным управлением / Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. - Л.: Онсргоиздат, 1986. - 168 с.
- 20(88). Макмарри У. Топология схем энергетической электроники / Макмарри У. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 137-150.
- 21(149). Филиппов А.Ф. Система дифференциальных уравнений с несколькими разрывными функциями / Филиппов А.Ф. - Математические заметки, т. 27, №2, 1980. - С. 255 -266.
- 22(168). Backnays I. Investigation on High Speed SRD Incorporating Amorphous Iron / Backnays I. - Proceedings of EPE'95,1995. pp. 382 - 395.
- 23(2). Айзерман М. А. Краткий очерк становления и развития классической теории регулирования и управления / Айзерман М.А. - Автоматика и телемеханика№7, 1994. - С. 1-18.

- 24(151). Метод фазовой плоскости в теории релейных систем / Флюгге-Лотн И. – М.: Физматгиз, 1959. - 176 с.
- 25(1). Андропов А.А. Теория колебаний / Андропов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. - М.: Физматгиз, 1959. - 916 с.
- 26(152). Цыпкин Я.4. Релейные автоматические системы / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1974. - 575 с.
- 27(150). Флоренцев С.Н. Современная элементная база электроники / Флоренцев С.Н., Ковалев Ф.И. - Электротехника, № 4, 1996. - С. 5-12.
- 28(191). Fitzgerald A.E. Electric Machinery / Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D. - McGraw Hill Professional, 2002. - 704 p.
- 29(13). Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / Бесекерский В.А., Попов Е.П. – М.: Наука, 1972. - 768 с.
- 30(28). Воронов А.Л. Теория автоматического управления. В 2-х ч / Воронов А.Л. и др. - М: Высшая школа, 1986.ч.1 - 367 с., ч.2 - 504 с.
- 31(30). Гелиг А.Х. Динамика импульсных систем и нейронных сетей / Гелиг А.Х. - Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1982. - 192 с.
- 32(77). Кунцевич В.М. Нелинейные системы управления с частотно-широотно-импульсной модуляцией / Кунцевич В.М., Чеховой Ю.Н. - Киев: Техніка, 1970. - 340с.
- 33(39). Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / Емельянов С.В. – М.: Наука, 1967. - 336 с.
- 34(40). Теория систем с переменной структурой / [Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А. и другие].– М.: Наука, 1970. - 592 с.
- 35(138). Старикова М.В. Автоколебания и скользящий режим в системах автоматического регулирования / Старикова М.В. - М.: Машгиз, 1962. - 195 с.
- 36(3). Айзерман М.А. Основы теории разрывных систем Ч.1 / Айзерман М.А. Пятницкий Е.С. - Автоматика и телемеханика №7, 1974. - с. 33 - 47.
- 37(37). Принцип блочного управления. Ч.1 / [Дракунов С.В.,

Изосимов Д.Е, Лукьянов А.Г. и другие]. -Автоматика и телемеханика №5, 1990. - С. 38 -47.

38(54). Изосимов Д.Б. Векторный подход к синтезу скользящих режимов. Симплексные алгоритмы / Изосимов Д.Б., Байда С.В. - Автоматики и телемеханика, №7, 1985. - С. 56-64.

39(143). Уткин В.И. Задачи управления асинхронным электроприводом / Уткин В.И. - Автоматика и телемеханика, №12, 1994. - С. 53 - 65.

40(144). Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / Уткин В.И. – М.: Наука, 1974. - 274 с.

41(195). Fridman L.M. Singular perturbation analyses of chattering in relay control systems / Fridman L.M. - IEEE Transactions on Automatic Control, vol 47, no. 12, 2002. - pp. 2079 - 2084.

42(103). Электропривод летательных аппаратов / [Полковников В.А., Петров Б.И., Попов Б.Н. и другие] - М.: Машиностроение, 1990. - 360 с.

43(109). Рабинович Л.В. Методы фазовой плоскости в теории и практике релейных следящих систем / Рабинович Л.В. – М.: Энергия, 1965. - 115 с.

44(110). Динамика следящих приводов / [Рабинович Л. В., Петров Б.И., Полковников В.А. и другие]. - М.: Машиностроение, 1982. - 348 с.

45(147). Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / Уткин В.И. – М.: Наука, 1984.1. - 368 с.

46. Горелов П.В. Релейно-модальное управление двухмассовыми электромеханическими системами / Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» // Горелов П.В., Мотченко А.И., Морозов Д.И.. - Харків: НТУ «ХПИ», 2008, № 30. – С.120-124.

47. Мотченко А.И., Марченко В.И. Квазиоптимальный по быстродействию релейный электропривод с заданными динамическими свойствами // Труды науч.-техн. конф. "Следящие электроприводы промышленных установок, роботов и манипуляторов". – Челябинск, 1986. –

48. Яблонь В.П. Синтез релейных систем следящего электропривода повышенной точности с низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям: Дис ... канд. техн. наук: 05.09.04. – Донецк, 1999. – 207 с.

49. Зеленов А.Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з електромашинними, електромагнітними та імпульсними перетворювачами: Навч. посібн. // Зеленов А.Б., Шевченко І.С., Яблонь В.П., Нікітін М.Г. – Алчевськ: ДонДТУ, 2007. – 373 с.

50(89). Марчук Г.И. Методы вычислительной математики / Марчук Г.И. – М.: Наука, 1980. - 535 с.

54.1. Гарнов Б. К., Рабинович В. В., Вишневецкий Л. М. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. – М.: Металлургия, 1974.1. – 215 с.

52. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424 с.

54. Летов А. М. Математическая теория процессов управления. – М.: Наука, 1984.1. – 256 с.

54. Красовский Н. Н. К теории аналитического конструирования регуляторов / Н. Н. Красовский, А. М. Летов. – Автоматика и телемеханика, 1962. – № 6. – С. 713-719.

55. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 200 с.

56. Чистов В. П. Оптимальное управление электрическими приводами постоянного тока / В. П. Чистов, В. М. Бондаренко, В. А. Святославский. – М.: Энергия, 1968. – 232 с.

57. Красовский А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.

58. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 4. – С. 436-444.1.

59. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. II. –

Автоматика и телемеханика, 1960. – № 5. – С. 561-568.

60. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. III. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 6. – С. 661-665.

61. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Коцюбинский. – Алчесвк: ДонГТУ, 2007. – 205 с.

62. Зеленев А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов: Учебное пособие / А.Б. Зеленев. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.

63. Перельмутр В.И. Системы управления тиристорными электроприводами / В.И. Перельмутр, В.А. Сидоренко. – К.: Техника, 1985. – 320 с.

64. Двигатели постоянного тока ряда Д: Паспорт 04.1.10.09-94.1.

65. Переходченко В.А. Расчет мощности электродвигателей широкополосных станов горячей прокатки / В.А. Переходченко. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 384 с.

66. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутра. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

67. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.4. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребник и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

68. Пілецький В.Т. Вибір елементів реверсивних тиристорних перетворювачів електроприводів постійного струму / В.Т. Пілецький. – К.: ІСДО, 1994. – 148 с.

69. Инструкция по эксплуатации КТЭ5-А для приводов постоянного тока с регулируемой скоростью.

70. Башарин А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман. – Л.: Энергия,

1974.1. – 440 с.

71. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с, ил.

72. Справочник по кранам: В 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. Под общ. ред. М. М. Гохберга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1988. – 536с.

73. А.Б. Царницкий, А.П. Шабатов. Мостовые краны общего назначения. М., 1968.

74. Электрооборудование и системы управления подъемно-транспортными машинами: Учебное пособие / П.А. Сорокин, Д.М. Крапивин М.Н. Хальфин, А.В. Редькин, В.П. Папирняк. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. – 380 с.

75. Иванченко Ф.К. и др. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин.— Киев, издательское объединение «Вища школа», Головное издательство, 1978, 576 с.

76. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2004, – 150 с.

77. Справочник по электрическим машинам. Под общей редакцией И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 465 с.: ил.

78. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Евзеров И.Х., Горобец А.С. Под ред. Прельмутера В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988

70. мКапунцов Ю.Д., Ильяшенко Л.А., Елисеев В.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979

70. Система автоматизованого електропривода виробничих установок: Навч. посібник / І. С. Шевченко. – К.: ІСДО, 1994 – 256 с.

70. Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов Е.С. и др. Курсовое проектирование грузоподъемных машин: Учеб. пособие для студентов машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 319с.

70. Т.Н. Краузе. Редукторы. Справочное пособие. 1965.

70. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. Изд. 4-е. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1972 .

70. Путевые машины и механизмы, отраслевой каталог. Часть 1. Москва 1982. – 87 с.