

**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 Синтез та дослідження оптимальної системи керування
електроприводом робочого рольгангу прокатного стану

Виконав: студент групи ЕЕ-21дм

Заяць А. О.

(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник

доц. Брошко Р. М.

(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Завідувач кафедри

доц. Руднєв Є. С.

(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Київ 2022 р.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

(повне найменування вищого навчального закладу)

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.

“ ” 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Заяцю Артему Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез та дослідження оптимальної системи керування електроприводом робочого рольгангу прокатного стану

керівник проекту Брожко Р. М. канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 12 ” 10 2022 р. № 27/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 18 листопада 2022 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 керування 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). Принципова схема силової частини електропривода (лист 2-3). Функціональна схема та конструкція ЕП (лист 4). Структурна схема та математична модель релейної системи керування ЕП (лист 5). Графіки перехідних процесів (листи 6-7).

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	проф. Брожек Р. М.		

7. Дата видачі завдання 05 вересня 2022 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)Заяць А. О. _____
(прізвище та ініціали)Керівник проекту _____
(підпис)Брожек Р. М. _____
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	8
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ.....	16
2.1 Опис конструкції та роботи механізму робочого рольгангу перед чорною кліттю.....	16
2.2 Перевірка потужності електродвигуна рольгангу.....	19
2.3 Розрахунок статичних моментів.....	21
2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень.....	24
2.5 Час керування електродвигуном.....	28
2.6 Перевірка потужності електродвигуна по нагріву.....	34
3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ.....	36
3.1 Вибір силової та перетворювальної техніки рольгангу.....	36
3.2 Вибір комплектного електродвигуна.....	40
3.3 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя.....	44
3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електродвигуна робочого рольгангу.....	45
3.5 Вимоги до системи автоматизації.....	47
3.6 Математичний опис об'єкта керування.....	48
3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електродвигуна.....	50
3.8 Синтез лінійного регулятора струму.....	53
3.9 Синтез лінійного регулятора швидкості.....	58
3.10 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості.....	62
3.11 Моделювання електродвигуна рольгангу з лінійною системою керування в Matlab/Simulink.....	66
4 СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КУРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ.....	77
4.1 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат.....	78

4.2 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат.....	83
4.3 Математичне моделювання електроприводу рольгангу з оптимальною системою керування в Matlab/Simulink.....	89
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ДІЇ ПАРАМЕТРИЧНИХ ЗБУРЕНЬ.....	95
5.1 Дослідження залежності показників якості системи від параметрів системи методом найменших квадратів.....	95
5.2 Енергозберігаючий електропривод.....	97
Висновок.....	109
Перелік посилань.....	110
Додаток А.....	114
Додаток Б.....	123
Додаток В.....	125

ВСТУП

Актуальність теми. Інтенсифікація виробництва та підвищення якості готової продукції на основі впровадження передових технологій, сучасних машин, механізмів і приладів вимагають забезпечення граничної точності, швидкодії і узгодженості обертання електроприводів (ЕП) постійного і змінного струму, що є силовими елементами замкнутих електромеханічних систем (ЕМС). Однак по мірі зростання вимог до динамічних і статичних показників ЕМС, що забезпечують протікання технологічних процесів, все більш істотним виявляється дія різного роду дестабілізуючих факторів, обумовлених нелінійними характеристиками та іншими неідеальними керованими перетворювачами потужності і електричних машин, обмеженою точністю виготовлення і кінцевої жорсткістю елементів кінематичних ланцюгів, впливом навколишнього середовища і складної природою технологічних процесів на структуру і параметри електромеханічних об'єктів управління (ОУ). Зазначені фактори призводять до значного ускладнення, а найчастіше до неоднозначності і навіть практичної неможливості повного математичного опису ОУ.

Неповна апріорна інформація про параметри і властивості ОУ, умови його функціонування не дозволяє використовувати для побудови керуючої частини таких ЕМС класичні методи синтезу і вимагає спеціального підходу, що дозволяє уникнути детального аналізу цілого спектра діючих на ОУ дестабілізуючих факторів, все різноманіття яких можна умовно розділити на параметричні (внутрішні) і координатні (зовнішні) збурення. До параметричних відносяться будь-які обурення, результатом дії яких є зміна параметрів або структури об'єкта управління, причому темп зміни цих параметрів залежить від природи збурюючих факторів. Зокрема для ряду промислових ЕМС характерним є повільне зміна постійних часу в 4...6 рази під дією змінної геометрії виконавчого органу і швидка зміна тих же постійних часу в 5...10 разів в результаті переміщення або перемикання механізмів. Координатними збуреннями в першу чергу є сили опору, подолані ЕП, а також шуми і

перешкоди, що містяться в сигналах завдання і зворотних зв'язків.

Теоретично вичерпне рішення задачі управління нестационарними об'єктами в умовах дії координатних збурень дає ідея побудови систем, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта посилення [1]. Такий підхід в області лінійних законів управління дозволяє значно знизити чутливість системи до зовнішніх збурень і забезпечує досить високі можливості компенсації параметричних збурень [2]. Реалізація нескінченно великих коефіцієнтів підсилення за рахунок використання ковзних режимів нелінійних елементів /20-38,125-128/ дозволяє при певних умовах забезпечити нульову чутливість систем управління до параметричних і координатних збурень. У відомих літературних джерелах синтез розривних управлінь здійснюється, як правило, виходячи лише з умови існування стійкого змінного режиму [3-5,6-9], що не гарантує оптимальності синтезованих систем.

Математичні основи алгоритмічного синтезу оптимальних за точністю систем управління, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта посилення викладені в роботах [10-25], присвячених визначенню методами математичного аналізу вихідних алгоритмів управління, що забезпечують мінімізацію інтегральних квадратичних критеріїв якості. Однак отримані в цих роботах результати вимагають подальшого розвитку і дослідження стосовно ЕМС з урахуванням характерних особливостей ОУ і умов його функціонування.

Рольганги призначені для транспортування металу до прокатного стану, для подання металу у валки і прийому його з валків, для пересування металу до ножиць, пил, правильним і іншим машинам. Загальна довжина рольгангів досить значна, а вага їх сягає 20-30% від загальної маси механічного обладнання прокатного стану. За призначенням рольганги діляться на робочі і транспортні. Робочі рольганги розташовані безпосередньо у робочій клітці стану і служать для подання прокатуваного металу у валки і прийому його з валків. Транспортні рольганги (підводять і відводять) призначені для зв'язку між собою окремих допоміжних машин і пристроїв стану.

Об'єктом дослідження є математична модель електропривода рольгангу та підвищення показників якості його роботи (мінімізація статичної й динамічної помилок відпрацювання швидкості).

Предметом дослідження є електропривод постійного струму рольгангу стана гарячої прокатки металу з оптимальною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Метою роботи є синтез оптимальної системи керування електроприводом рольгангу, яка має необхідні (високі) показники якості в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- синтезувати оптимальні регулятори, структура яких реалізована на доступних технічних засобах та забезпечують необхідні динамічні і статичні показники електропривода рольгангу прокатного стану;

- провести аналіз роботи синтезованої оптимальної системи за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях у середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink;

- визначити залежності показників якості системи від параметрів системи методом найменших квадратів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У процесі розвитку електропривода були розроблені системи управління з паралельним, послідовно - паралельним і послідовним коригуванням.

Найбільше поширення одержали неперервні системи з підпорядкованим регулюванням і послідовним коригуванням завдяки простій методиці їхнього розрахунку і налагодження. Ці системи в багатьох випадках задовольняють вимогам, що висуваються до електроприводу. Однак такі системи мають і істотний недолік - високу чутливість до параметричних і зовнішніх збурювань. Відомо, що в процесі експлуатації відбувається старіння елементів системи, збільшуються температурні похибки, змінюються характеристики окремих вузлів (сталі часу, коефіцієнти підсилення). Змінювання параметрів об'єкту управління і контурів регулювання відразу ж позначається на якості динамічних режимів роботи електропривода, на якості формування діаграм струму і швидкості електродвигуна.

Коливання параметрів мають місце й у системах автоматичного регулювання технологічних процесів. Наприклад, загальний коефіцієнт підсилення системи регулювання товщини на реверсивному стані холодної прокатки алюмінію змінюється приблизно в 4 рази в каналі регулювання товщини натискним пристроєм і приблизно в 15 разів в каналі регулювання товщини натягом [26]. У багатьох об'єктах управління, що мають механізми з кривошипно-шатунною передачею, може істотно змінюватися приведений до вала двигуна момент інерції й обумовлена ним електромеханічна стала часу.

Недоліком лінійних систем підпорядкованого регулювання, як показано в [27], є також статизм по збуренню однократно інтегруючих систем і велике динамічне падіння швидкості в дворазово інтегруючих системах. А умови стійкості не дозволяють використовувати в лінійних системах великий коефіцієнт підсилення.

Таким чином, при синтезі системи управління електроприводом одночасно необхідно забезпечити високу точність відпрацювання завдання,

тобто оптимізацію за мінімумом інтегральної квадратичної похибки, а також низьку чутливість до змінень різних параметрів об'єкту управління та до зовнішніх збурювань. При такій постановці задачі найбільш перспективним є створення систем оптимального управління, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення. У таких системах не повинне бути протиріччя між точністю і стійкістю.

М.В. Меєровим показано, що стійкі лінійні системи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення мають властивості інваріантності до параметричних збурювань [3]. Проілюструємо це положення, розглядаючи об'єкт управління з передатною функцією $W_0(p)$. Управляючий пристрій (рис. 1.1) складається з двох підсилювачів з великими коефіцієнтами підсилення (K_1 і K_2). Один з підсилювачів охоплений стабілізуючим пристроєм з передатною функцією $W_c(p)$, а об'єкт управління піддається впливу збурювань, що на рис 3.1 приведені до його входу і представлені величиною f_{Π} .

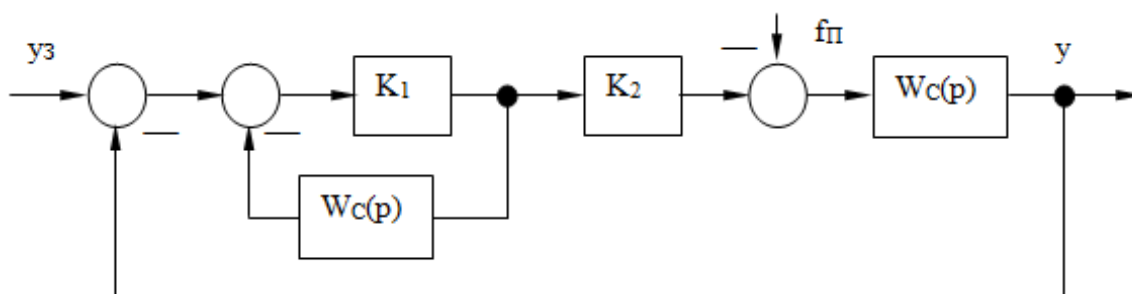


Рисунок 1.1 – Структурна схема замкненої лінійної системи регулювання

Передатні функції цієї замкненої системи за завданням та збуренням відповідно такі:

$$W_{y_z}(p) = \frac{y_1(p)}{y_z(p)} = \frac{K_1 K_2 W_0(p)}{1 + K_1 W_c(p) + K_1 K_2 W_0(p)}, \quad (1.1)$$

$$W_{f_{\Pi}}(p) = \frac{y_2(p)}{f_{\Pi}(p)} = -\frac{W_0(p)[1 + K_1 W_c(p)]}{1 + K_1 W_c(p) + K_1 K_2 W_0(p)}. \quad (1.2)$$

Зображення вихідної величини $y(p)$ визначається в такий спосіб:

$$y(p) = y_1(p) + y_2(p) = W_{y_3}(p) \cdot y_3(p) + W_{f_{\Pi}}(p) \cdot f_{\Pi}(p)$$

Після підстановки в цей вираз значень W_{y_3} , $W_{f_{\Pi}}(p)$ і виконання необхідних перетворень виходить наступне рівняння для визначення $y(p)$:

$$\begin{aligned} y(p) \left[\frac{1}{K_1 K_2} + \frac{W_C(p)}{K_2} + W_0(p) \right] = \\ = y_3(p) W_0(p) - f_{\Pi}(p) W_0(p) \left[\frac{1}{K_1 K_2} + \frac{W_C(p)}{K_2} \right] \end{aligned} \quad (1.3)$$

З (1.3) випливає, що при $K_2 \rightarrow \infty$, $y(p) \rightarrow y_3(p)$. Таким чином, система зі структурою на рис. 1.1 має властивості інваріантності до збурювань, якщо $K_2 \rightarrow \infty$.

Властивість замкнених САУ забезпечувати інваріантність до зовнішніх збурювань при нескінченно великому коефіцієнті підсилення покладено в основу методу структурного синтезу, що викладається далі в розділі 3.

У лінійній САУ неможливо забезпечити нескінченно великий коефіцієнт підсилення. Створення САУ з теоретичним значенням $K = \infty$ стає здійсненним, якщо скористатися результатами робіт Я. З. Ципкіна [5], у яких доведена еквівалентність релейної системи, що працює в ковзному режимі, лінійній системі з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

Ковзний режим роботи релейної системи - це специфічний режим, який полягає в тому, що при середньому значенні сигналу на вході релейного елемента, рівному нулю, під дією внутрішніх зворотних зв'язків, що охоплюють цей елемент, він перемикається з високою частотою (теоретично з безкінечно високою), а середнє значення вихідного сигналу в цей час по абсолютній величині менше максимального, відповідного одному зі стійких положень релейного елемента.

На рис. 1.2 показана структурна схема САУ, що містить релейний елемент (РЕ), охоплений негативним зворотним зв'язком з передатною функцією $W_C(p)$. Рівняння релейної системи за рис. 1.2 можна записати так:

$$\begin{aligned} x(p) &= Z(p) - x_1(p) = Z(p) - U(p) \cdot W_C(p) \\ Z(p) &= y_3(p) - U(p) \cdot W_0(p) \end{aligned} \quad (1.4)$$

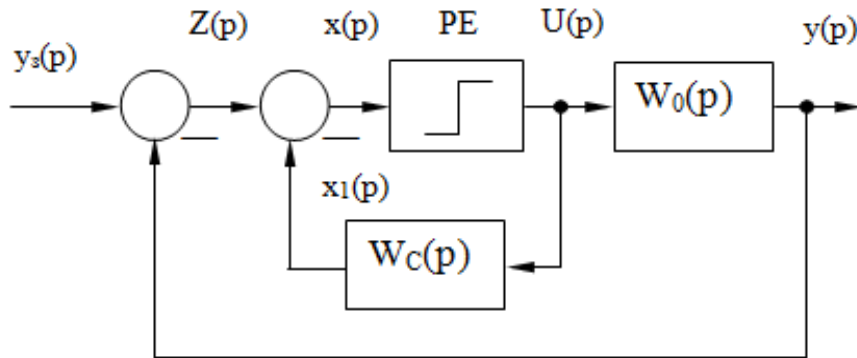


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи, що має релейний елемент

У ковзному режимі сигнал $x(p)$ на вході РЕ, як показано в [5], дорівнює нулю, тобто

$$x(p) = Z(p) - U(p) \cdot W_C(p) \equiv 0,$$

Звідси можна одержати сигнал на виході релейного елемента

$$U(p) = U_E(p) = \frac{Z(p)}{W_C(p)} \quad (1.5)$$

Тут $U_E(p)$ являє собою зображення деякого еквівалентного керуючого впливу. Підставляючи це значення $U_E(p)$ за (1.5) у записане вище рівняння (1.4) релейної системи для $Z(p)$, одержимо вираз, що описує поведінку релейної системи в ковзному режимі:

$$Z(p) = y_3(p) - \frac{Z(p) \cdot W_0(p)}{W_C(p)},$$

звідки

$$Z(p) = -\frac{W_C(p)}{W_C(p) + W_0(p)} \cdot y_3(p) \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) відповідає лінійній системі, структурна схема якої приведена на рис. 1.3.

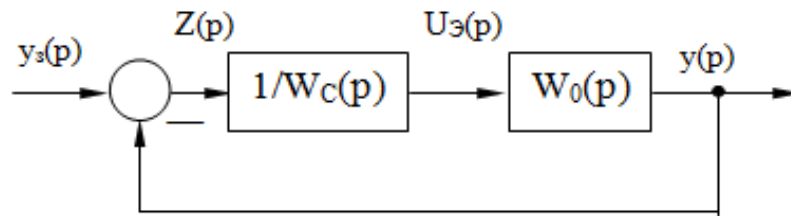


Рисунок 1.3 – Структурна схема лінійної системи, що еквівалентна релейній

З порівняння рис. 1.2 та рис. 1.3 видно, що лінійна САУ за структурною схемою рис. 1.3 може бути отримана з релейної САУ рис. 1.2 шляхом заміни РЕ підсилювачем з коефіцієнтом підсилення $K \rightarrow \infty$. У такий спосіб релейна система лінеаризується завдяки ковзному режиму роботи РЕ.

Наведений вище доказ еквівалентності релейної системи управління з ковзним режимом і лінійної системи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення, зроблене Я. З. Ципкіним в [5], також покладено в основу методу структурного синтезу, що викладається далі.

Отримане вище рівняння (1.6) для $Z(p)$ справедливо також і для системи управління, структурна схема якої наведена на рис. 1.4.

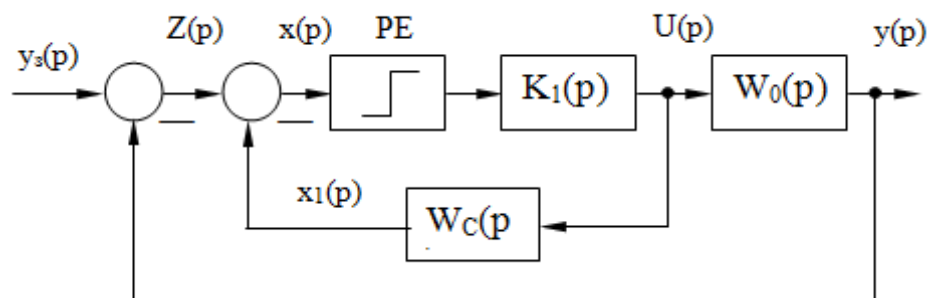


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління

З цього випливає, що релейна САУ, що працює в ковзному режимі, нечутлива до змін параметрів ланки $K_1(p)$, охопленою спільно з РЕ негативним зворотним зв'язком.

Це робить можливим створення автоматичних систем управління електроприводами, які мають дворазову інваріантність - по відношенню до зовнішніх збурень і до зміни параметрів об'єкта управління.

Введення в систему автоматичного управління декількох РЕ і створення для кожного з них змінного режиму шляхом охоплення зворотними зв'язками спільно з кожною ланкою лінійної частини дозволить усунути вплив більшості параметрів на динамічні властивості об'єкта управління і отримати бажаний перехідний процес. Інакше кажучи, також САУ є ніби «адаптивними», так як вони зберігають свої властивості незалежно від внутрішніх (параметричних) змін і зовнішніх збурень. Релейні САУ, як показано в [3], забезпечують також малу статичну похибку. Порівняно з безперервними релейними САУ не вимагають високої стабільності елементів для дотримання певної залежності між вхідними і вихідними величинами.

Основним напрямком удосконалення систем управління електроприводами є їх оптимізація. За визначенням А.М. Лєтова математичні задачі синтезу оптимальних систем діляться на два класи [10, 13-14]. Завдання першого класу - це завдання, пов'язані з розрахунком бажаного виду перехідного процесу. При цьому шукається програма автоматичного управління, що забезпечує перехідному процесу необхідне екстремальну властивість, шукається вид оптимального перехідного процесу в часі. Системи, що задовольняють вирішення цього завдання, називаються оптимальними по режиму управління. До цього класу систем відносяться системи, оптимальні за швидкодією. Теорія їх досить добре розроблена і описана в літературі [28, 29].

Завдання другого класу - це завдання, в яких є регулятор, що забезпечує задану якість перехідного процесу. Системи управління, синтезовані таким чином, називаються оптимальними по перехідному процесу. Завдання другого класу, звані також завданнями аналітичного конструювання регуляторів (АКР), полягають у визначенні варіаційними методами такого управління, яке мінімізує функціонал, що характеризує відхилення траєкторії руху системи від бажаної.

Далі розглядається задача оптимізації другого класу, тобто оптимізації по перехідному процесу, яке вирішується методом динамічного програмування в поєднанні з прямим методом Ляпунова. Розробка цього методу оптимізації з використанням в якості критерію оптимальності мінімуму інтегральної

квадратичної помилки привела до доказу можливості заміни функції Беллмана функцією Ляпунова [11, 15], що дозволило значно спростити процедуру відшукування оптимального управління. Поєднання методу динамічного програмування і теорії стійкості Ляпунова дає вельми ефективний апарат для вирішення завдань оптимізації систем управління електроприводами. При цьому результат АКР є одночасно і рішенням задачі структурної оптимізації, як це буде показано далі.

Таким чином, з огляду на викладені міркування, можна прийти до висновку про те, що оптимальну динаміку електромеханічного об'єкта (ЕМО) слід формувати за допомогою багатоконтурною САУ, в якій для кожної стабілізуючої фазової координати повинен бути передбачений окремий релейний регулятор, який здійснює оптимізацію цієї фазової координати по заданому критерієм якості. Такий релейний регулятор при стабілізації фазової координати повинен здійснювати ковзний режим в будь-якій точці оптимальної гіперплощини перемикання і забезпечувати стійкість цього режиму. Включення регуляторів кожної фазової координати може бути реалізовано за схемами і паралельного або підлеглого регулювання. При останньому (більш доцільний) способі спрощується настройка системи, а також реалізується відносно легкий перехід від вживаних в даний час лінійних систем з підлеглим регулюванням до релейних систем.

Відповідно до викладеного, оптимальна САУ ЕМО повинна мати функціональну схему наведену на рис. 1.5, що включає релейні регулятори струму (РС), швидкості (РШ), а для позиційних або слідкуючих механізмів також і регулятор положення (РП).

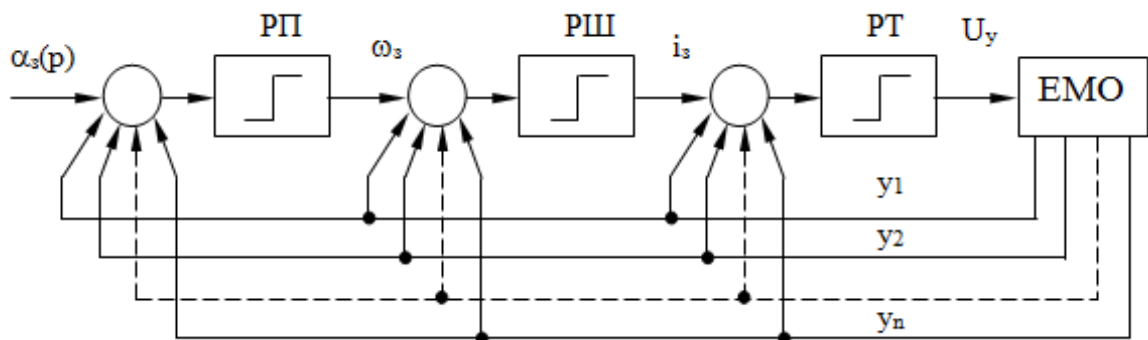


Рисунок 1.5 – Структурна схема оптимальної САУ

На кожен регулятор надходить повна інформація про стан фазових координат $y_1 \div y_n$ силової частини ЕМО, що контролює весь простір стабілізуючих координат.

Остаточна структурна схема із зазначенням числа та знаків зворотних зв'язків з тієї чи іншої фазової координати на кожному релейному регуляторі повинна бути отримана в результаті аналітичного рішення задачі структурного синтезу оптимальних управлінь цих регуляторів по заданому критерію якості, в якості якого, як вказувалося вище, слід прийняти мінімум інтегральної квадратичної похибки. Якщо, крім того, форсувати процес виведення регульованих координат на їх рівні стабілізації, то таким чином можна забезпечити квазіоптимальність релейній САУ по швидкодії.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ

2.1 Опис конструкції та роботи механізму робочого рольгангу перед чорною кліттю

Опис технологічного процесу товстолистового стану гарячої прокатки наведено у додатку А.

Кінематична схема рольгангів представлена на рисунку 2.1.

Рольганги перед чорною кліттю містять 12 роликів (секція 44). Ролики – конічні зі зменшенням діаметра бочки ролика від приводного боку до неприводного, цільноковані. Порядкова нумерація роликів в кожному з рольгангів – в напрямку прокатки металу в непарних пропусках. Опори роликів – дворядні сферичні підшипники. Підшипники розташовані в герметичних корпусах, розміщених в литих рамах, і закриті кришками. Рами між собою стягнуті траверсами.

Кожен ролик рольганга перед кліттю індивідуально приводиться в обертання спеціальним двигуном постійного струму зі зниженою частотою обертання (до них підводиться охолоджуюче повітря). При цьому у рольганга перед чорною кліттю двигуни парних роликів розташовані з боку обслуговування, а двигуни непарних роликів – з боку головних приводів чорної кліті. У рольганга за чорною кліттю двигуни парних роликів розташовані на стороні головних приводів, а двигуни непарних роликів – на стороні обслуговування.

Рольганг перед чорною кліттю обладнаний маніпуляторними лінійками, призначеними для центрування сляба (розкату) по поздовжній вісі прокатки.

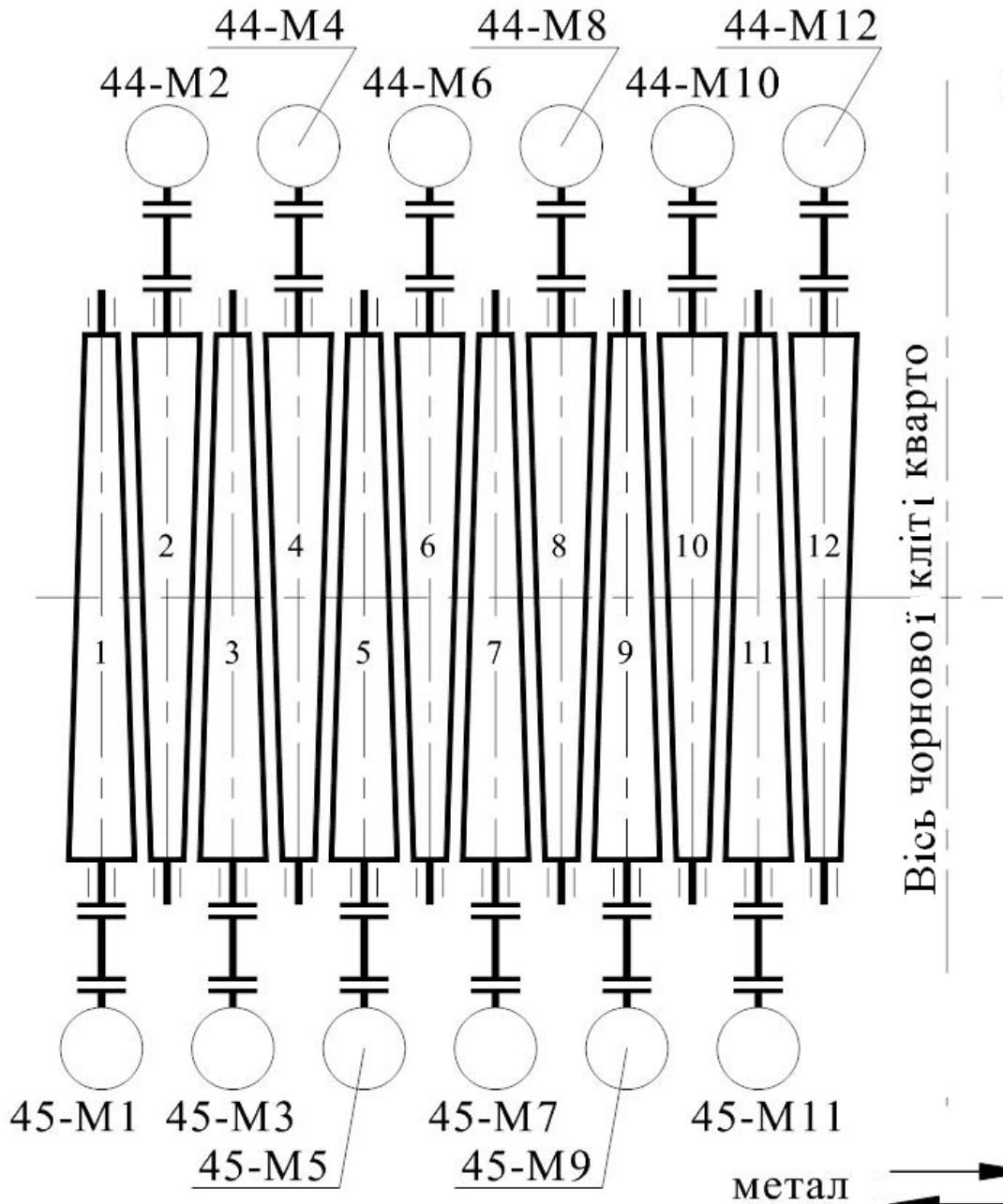


Рисунок 2.1 – Кінематична схема робочого рольганга перед чорною кліттю

На робочий рольганг перед чорною кліттю надходить черговий сляб, що пройшов очищення від пічної окалини в установці гідрозбиву. Після повної зупинки перед чорною кліттю сляб центрується маніпуляторними лінійками і може бути заданий в прокатку при розведених маніпуляторних лінійках перед і за кліттю, при зупинених натискних гвинтах в кліті і при відсутності розкату з попереднього сляба на робочому рольгангу за кліттю.

Режим прокатки в чорній кліті – реверсивний. При цьому в кожному

конкретному пропуску підтримується рівень швидкості, необхідний за технологією. У загальному випадку: кількість пропусків в чорновій клітці – непарне, а швидкість від пропуску до пропуску збільшується відповідно до зменшення товщини розкату.

У процесі прокатки швидкість подачі металу рольгангом перед кліттю узгоджується зі швидкістю станини роликів і з головним приводом клітці. Завдання швидкостей рольгангу робітником перед і за кліттю здійснюється системою автоматизації з урахуванням випередження і відставання металу в осередку деформації клітці.

Повернення металу в прокатку в парному пропуску можливе після установки нового отвору валків натискаючими гвинтами, а також після центрування розкату по поздовжній вісі прокатки (маніпуляторними лінійками за кліттю). Обидві згадані операції можуть виконуватися одночасно.

При досягненні довжини розкату, що відповідає ширині майбутнього підкату і готового листа, розкат кантується в плані на 90° і (згодом) центрується по поздовжній вісі прокатки. Поворот розкату в горизонтальній площині здійснюється за рахунок одночасного включення приводів парних і непарних роликів рольганга в протилежних напрямках (короткочасно). Момент закінчення процесу повороту розкату визначається візуально оператором. Можливість повороту розкату в горизонтальній площині передбачається як перед, так і за чорною кліттю.

Після завершення прокатки в чорновій клітці розкат транспортується в напрямку до проміжного рольгангу, звільняючи рольганг робочий за чорною кліттю.

Приводи рольгангів працюють в повторно-короткочасному, реверсивному режимі. Швидкість регулюється зміною величини напруги, що живить якірні ланцюги двигунів.

У таблиці 2.1 приведені технологічні та технічні дані рольгангу

Таблиця 2.1 – Вихідні технологічні і технічні дані робочого рольганга перед чорнової кліттю

Найменування і розмірність технічного параметра	Значення параметра
1. Сляби	
1.1. Товщина, <i>мм</i>	200...250...300
1.2. Ширина, <i>мм</i>	1500...2800
1.3. Довжина, <i>мм</i>	1600...2300
1.4. Маса максимальна, <i>кг</i>	до 7500
2. Рольганг	
2.1. Діаметр бочки ролика, <i>мм</i>	410/250
2.2. Довжина бочки ролика, <i>мм</i>	4200
2.3. Крок роликів, <i>мм</i>	350
2.4. Кількість роликів, <i>шт.</i>	12
2.5. Маса ролика, <i>кг</i>	3216
2.6. Середній діаметр підшипника, <i>мм</i>	
привідна сторона	235
непривідна сторона	210
3. Технологічні дані	
3.1. Швидкість транспортування розкату, <i>м/с</i>	0,5...3

2.2 Перевірка потужності електродвигуна рольгангу

На даний момент в якості приводних електродвигунів електроприводу робочого рольганга перед чорновою кліттю товстолистого стану 3000 встановлено двигуни постійного струму без стабілізуючою обмотки типу Д810У2 зі зниженою частотою обертання з технічними даними, наведеними в таблиці 2.1. Двигуни оснащені датчиками швидкості. Рольганг перед кліттю містить 12 конічних роликів. Привід роликів індивідуальний, безредукторний. Перевіримо можливість роботи рольгангу з існуючими двигунами.

Вихідні дані, необхідні для подальших розрахунків, представлені в

таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні дані електродвигуна Д810У2

Найменування параметра	Чисельне значення
Номінальна потужність, кВт	$P_H = 17,5$
Номінальна напруга, В	$U_H = 220$
Номінальний струм, А	$I_H = 93$
Номінальна частота обертання, об/хв	$n_H = 165$
Каталожна тривалість включення, %	ПВ=100
Максимальний струм перенавантаження (дозволений), А	$I_{max} = 250$
Максимальний обертовий момент, Н·м	$M_{max} = 2900$
Момент інерції якоря, кг·м ²	$J_{дв} = 3,125$

Таблиця 2.3 – Режим прокатки листів 19×2685×13123 мм в чорновій кліті (сляб 250×1300×2060 мм, маса 5,25 т, сталь Х56, температура 850-830 °С)

Товщина листа h , мм	Ширина листа b , мм	Довжина листа L , мм	Швидкість прокатки $V_{пр}$, м/с
1	1	1	1
1 217.93	1 1321.3	1 2404.1	1 1.6
2 194.62	2 1324	2 2686.3	2 1.6
3 175	3 2688.6	3 1470.9	3 1.68
4 155.59	4 2691.1	4 1652.6	4 1.68
5 137.04	5 2693.6	5 1874	5 1.68
6 120.19	6 2693.5	6 2135.8	6 1.68
7 107.2	7 2695.2	7 2391.9	7 1.68
8 94.17	8 2695.1	8 2719.9	8 1.68
9 81.68	9 2718.4	9 3098.9	9 1.7
10 70.26	10 2720.2	10 3599.1	10 1.7
11 60	11 2721.9	11 4209.8	11 1.7

Вихідні технологічні і технічні дані механізму рольганга наведені в таблиці 2.1.

2.3 Розрахунок статичних моментів

За час циклу роботи рольганга його електродвигуни навантажені статичними моментами різної величини. При розрахунку виділяють наступні основні статичні моменти: момент холостого ходу, момент транспортування металу по роликам, момент буксування роликів по транспортованому металу [30-31]. Розрахунок ведеться для індивідуального, безредукторного електроприводу.

Момент холостого ходу на приводному валу ролика:

$$M_{x.p} = \frac{9,81m_p d_{ш} \mu_{ш}}{2} = \frac{9,81 \cdot 3216 \cdot 0,222 \cdot 0,007}{2} = 24,6 \text{ Нм}, \quad (2.1)$$

де $m_p = 3216 \text{ кг}$ – маса одного ролика;

$$d_{ш} = \frac{0,235 + 0,21}{2} = 0,222 \text{ м} \text{ – середній діаметр шийки ролика (діаметр}$$

цапфи підшипника);

$\mu_{ш} = 0,007$ – коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання ролика під дією високих температур металу що транспортується [1, табл. 5.3].

При визначенні холостого ходу необхідно також враховувати втрати в електродвигуні. Момент холостого ходу електродвигуна:

$$M_{x.d} = 0,07M_n = 0,07 \cdot 1012,8 = 70,9 \text{ Нм}, \quad (2.2)$$

где $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{17,5 \cdot 10^3}{17,3} = 1012,8 \text{ Нм}$ – номінальний момент електродвигуна;

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 16}{30} = 17,3 \text{ 1/с} \text{ – номінальна швидкість електродвигуна.}$$

Таким чином, повний момент холостого ходу рольганга:

$$M_x = M_{x.p} + M_{x.d} = 24,6 + 70,9 = 95,5 \text{ Нм}, \quad (2.3)$$

Момент транспортування металу по роликах:

$$M_{тр} = 9,81m_m \left(\frac{d_{ш}}{2} \mu_{ш} + f \cdot 10^{-2} \right), \quad (2.4)$$

де m_{M_i} – маса металу, що приходить на один ролик рольганга, кг;

$f = 0,15 \text{ см}$ – коефіцієнт тертя кочення металу по роликам [1, с. 88].

Для рольгангів з груповим електроприводом величина m_M зазвичай приймається рівній масі злитка $m_{\text{сл}}$. Однак для рольгангів з індивідуальним електроприводом або з груповим електроприводом, але при довгих смугах транспортованого металу, величина m_M має кілька невизначене значення, оскільки залежить від кількості точок дотику металу з роликами рольганга. При цьому істотним є ступінь викривлення металу, що прокочується, точність установки рольганга за рівнем і т.д.

Якщо розкат має ідеальну рівну форму, а утворюючі поверхні роликів один і той самий рівень щодо нульової позначки цеху, можна вважати, що розкат спирається рівномірно на всі ролики рольганга по своїй довжині. В цьому випадку маса (вага) металу, що припадає на один ролик дорівнює:

$$m_{\text{М.мин}_i} = m_{\text{сл}} \frac{l_{\text{ш}}}{L_i}, \quad (2.5)$$

де $m_{\text{сл}} = 5255,5 \text{ кг}$ – маса сляба розраховується з ширини, товщини і довжини сляба (щільність сталі 7850 кг/м^3);

$l_{\text{ш}} = 0,35 \text{ м}$ – крок роликів;

L_i – довжина листа у кожному проході, м (див. табл. 2.2).

Реально розкат не має рівної форми. У процесі прокатки і транспортування на розкаті мають місце вигини кінців, спучування. Крім того, через похибки у виготовленні роликів, похибки монтажу утворюючі поверхні роликів можуть відрізнятися рівнем щодо нульової позначки цеху. Отже, в реальних умови розкат по своїй довжині не спирається рівномірно на всі ролики рольганга. Тоді під масою металу, обчислену за формулою (2.5), потрібно розуміти мінімально можливу масу металу, що припадає на один ролик.

Для розрахунку маси металу, що припадає на один ролик, зручно користуватися відносною величиною, а саме, знати масу (вагу) металу щодо маси (ваги), відповідного кроку роликів рольганга:

$$\bar{m}_M = \frac{m_M}{m_{M.\text{МИН}}}, \quad (2.6)$$

За методикою викладеною в [30] визначаємо відносну масу (вагу) металу \bar{m}_M , що припадає на один ролик. Відносна маса розкату при наявності двох загнутих кінців $\bar{m}_M = 1,5$.

Остаточно, масу металу, що припадає на один ролик для кожного проходу m_{M_i} можна визначити з виразу (2.6) знаючи мінімально можливу масу $m_{M.\text{МИН}}$ і відносну масу металу \bar{m}_M .

Отримані значення мінімально можливої маси металу (2.5), відносної маси металу, а також масу металу, що припадає на один ролик для кожного проходу зведені в табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Маса металу, що припадає на один ролик рольганга і розрахунок статичних моментів електродвигунів рольганга

$m_{M.\text{МИН}_i}$, кг (2.5)		m_{M_i} , кг (2.6)		$M_{\text{тр}_i}$, Нм (2.4)		$M_{\text{с.т}_i}$, Нм (2.7)	
	1		1		1		1
1	765.131	1	1147.696	1	25.656	1	121.121
2	684.753	2	1027.129	2	22.961	2	118.426
3	1250.562	3	1875.843	3	41.934	3	137.399
4	1113.065	4	1669.598	4	37.323	4	132.788
5	981.564	5	1472.346	5	32.914	5	128.379
6	861.247	6	1291.87	6	28.879	6	124.344
7	769.034	7	1153.55	7	25.787	7	121.252
8	676.294	8	1014.441	8	22.677	8	118.142
9	593.582	9	890.373	9	19.904	9	115.369
10	511.086	10	766.63	10	17.138	10	112.603
11	436.945	11	655.418	11	14.652	11	110.117

Повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів (див. табл. 2.4):

$$M_{c.t_i} = M_x + M_{tr_i}. \quad (2.7)$$

Момент буксування, приведений до валу електродвигуна (см. табл. 2.4):

$$M_6 = \frac{9,81 m_{сл} d_p \mu_6}{2} = \frac{9,81 \cdot 5255,5 \cdot 0,33 \cdot 0,3}{2} = 2552,1 \text{ Нм} \quad (2.8)$$

де $d_p = \frac{0,41 + 0,25}{2} = 0,33 \text{ м}$ – діаметр конічного ролика;

$\mu_6 = 0,3$ – коефіцієнт тертя при буксуванні [1, табл. 4.2].

Повний момент статичного опору при буксуванні:

$$M_{сб} = M_x + M_6 = 95,5 + 2552,1 = 2647,6 \text{ Нм}. \quad (2.9)$$

Отримані значення моменту транспортування металу по роликам (2.4), а також повного статичного моменту при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів для кожного проходу зведені в таблицю 2.4.

2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень

Через буксування розкату по роликам неможна розігнати розкат з прискоренням, що перевищує максимально можливе прискорення. Покажемо це теоретично.

Для розгону розкату необхідно подолати силу інерції. Величина сили інерції, що припадає на один ролик, дорівнює

$$F_{ин} = m_M a, \quad (2.10)$$

де a – лінійне прискорення розкату.

Ця сила не може бути більше сили буксування $F_{ин} \leq F_6$. Тоді запишемо

$$m_M a \leq G_M \mu_6, \quad (2.11)$$

Оскільки $G_M = m_M g$, де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, то з (2.11) отримаємо вираз для визначення максимально можливого прискоренню розкату на рольгангу

$$a \leq g\mu_6, \quad (2.12)$$

З останнього виразу видно, що максимально можливе прискорення розкату на рольгангу визначається коефіцієнтом тертя при буксуванні μ_6 . Приймаючи $\mu_6 = 0,15 \div 0,3$ [30, 31], отримаємо $a \leq 1,47 \div 2,94 \text{ м/с}^2$. Більше значення прискорення відповідає гарячому металу, менше – холодного.

Момент електродвигуна, що відповідає максимально можливому прискоренню розкату, називають гранично-виправданим моментом. Якщо момент електродвигуна перевищує гранично-виправданий момент, то виникає буксування, в результаті чого погіршується якість поверхні розкату, підвищується знос роликів, але збільшення прискорення розкату не відбувається. Оскільки буксування можливе як при розгоні (прискоренні), так і при гальмуванні (уповільненні), то мають місце два гранично-підтверджуваних моменти – при розгоні і при гальмуванні.

Отримаємо вираз гранично-виправданого моменту електродвигуна при розгоні (прискоренні) ролика рольганга:

$$M_{\text{п.о.р}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{с.т.і}}, \quad (2.13)$$

де $M_{\text{дин}}$ – динамічний момент, необхідний для розгону механізму і розкату з гранично-виправданим прискоренням;

$M_{\text{с.т.і}}$ – повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування й додаткових опорів.

Динамічний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{\text{дин}} = J'_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}, \quad (2.14)$$

де J'_{Σ} – сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна;

$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}$ – кутове прискорення електродвигуна.

Виразимо кутове прискорення електродвигуна через лінійне прискорення розкату,

$$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} = \frac{d\omega_{\text{р}}}{dt} i = \frac{2i}{d_{\text{р}}} \frac{dV}{dt}, \quad (2.15)$$

де $\omega_{\text{р}}$ – кутова швидкість ролика, $1/c$;

i – передавальне число редуктора рольганга, далі опускається, тому що електропривод безредукторний;

$d_{\text{р}}$ – діаметр ролика, м;

$a = \frac{dV}{dt}$ – лінійне прискорення металу на рольгангу, m/c^2 .

Сумарний момент інерції представимо як суму моменту інерції механізму $J_{\text{мех}}$ і моменту інерції розкату $J_{\text{м}}$, отриманого шляхом еквівалентного приведення поступального руху до обертального руху:

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}. \quad (2.16)$$

Приведення поступального руху до обертального руху здійснюється на підставі закону збереження енергії, а саме – кінетична енергія в обох випадках повинна бути однаковою. У зв'язку з цим запишемо

$$\frac{m_{\text{м}} V_{\text{м}}^2}{2} = \frac{J_{\text{м}} \omega_{\text{дв}}^2}{2}, \quad (2.17)$$

звідки знаходимо

$$J_{\text{м}} = m_{\text{м}} \frac{V_{\text{м}}^2}{\omega_{\text{дв}}^2}. \quad (2.18)$$

Підставляючи замість лінійної швидкості металу її вираз через частоту обертання електродвигуна $V_{\text{м}} = \frac{\omega_{\text{дв}} d_{\text{р}}}{2}$, отримаємо момент інерції транспортованого злитка, приведений до валу електродвигуна у кожному пропуску

$$J_{M_i} = m_{M_i} \frac{d_p^2}{4}. \quad (2.19)$$

Приймаючи максимально можливе значення лінійного прискорення (2.12), з урахуванням (2.15), (2.16) і (2.19) з (2.14) отримуємо такий вираз для визначення динамічного моменту на валу електродвигуна:

$$M_{\text{дин}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} J'_\Sigma, \quad (2.20)$$

де J'_Σ – сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу двигуна в кожному пропуску.

Момент інерції механізму дорівнює:

$$J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} + J_p = 3,125 + 43,7 = 46,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

де $J_{\text{дв}} = 3,125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції двигуна (див. табл. 2.1);

$$J_p = m_p \frac{d_p^2}{8} = 3216 \frac{0,33^2}{8} = 43,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ – момент інерції ролика.}$$

Оскільки максимальне прискорення визначається виразом (2.12), то для гранично-виправданому моменту при розгоні (прискоренні) вираз (2.13) набирає вигляду (див. табл. 2.4):

$$M_{\text{п.о.р}} = (J_{\text{мех}} + J_{M_i}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} + M_{\text{с.т.і}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} J'_\Sigma + M_{\text{с.т.і}}, \quad (2.22)$$

Для гальмування (уповільнення) вираз гранично-виправданого моменту має вигляд (див. табл. 2.5):

$$M_{\text{п.о.т}} = M_{\text{дин}} - M_{\text{с.т.і}}, \quad (2.23)$$

або

$$M_{\text{п.о.т}} = (J_{\text{мех}} + J_{M_i}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} - M_{\text{с.т.і}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} J'_\Sigma + M_{\text{с.т.і}}. \quad (2.24)$$

Таблиця 2.5 – Розрахунок динамічних гранично-допустимих моментів електродвигунів робочого рольганга

$J_{M_i}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ (2.19)		$M_{\text{п.о.р}}, (2.22)$		$\frac{M_{\text{п.о.р}}}{M_{\text{н}}}$		$M_{\text{п.о.т}}, (2.24)$		$\frac{M_{\text{п.о.т}}}{M_{\text{н}}}$	
	1		1		1		1		1
1	31.246	1	1515.012	1	1.496	1	1272.77	1	1.257
2	27.964	2	1453.77	2	1.435	2	1216.918	2	1.202
3	51.07	3	1884.874	3	1.861	3	1610.077	3	1.59
4	45.455	4	1780.112	4	1.758	4	1514.535	4	1.495
5	40.085	5	1679.918	5	1.659	5	1423.161	5	1.405
6	35.171	6	1588.245	6	1.568	6	1339.557	6	1.323
7	31.405	7	1517.986	7	1.499	7	1275.482	7	1.259
8	27.618	8	1447.325	8	1.429	8	1211.04	8	1.196
9	24.24	9	1384.305	9	1.367	9	1153.567	9	1.139
10	20.871	10	1321.45	10	1.305	10	1096.244	10	1.082
11	17.844	11	1264.959	11	1.249	11	1044.726	11	1.032

Видно, що моменти $M_{\text{п.о.р}}$ і $M_{\text{п.о.т}}$ залежать від маси металу, що припадає на ролик. Для гарантованого розгону і гальмування без буксування слід обмежувати момент електродвигуна на рівні мінімального значення моменту, розрахованого за виразами (2.22) і (2.24). З виразів для гранично- допустимих моментів видно, що мінімальні значення $M_{\text{п.о.р}}$ і $M_{\text{п.о.т}}$ мають місце при мінімальній масі металу m_{M_i} , що припадає на ролик рольганга. Приймаємо кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів) $\lambda_{\text{пт}} = 1$.

Із таблиці 2.4 видно, що кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів) $\lambda_{\text{пт}}$ не перевищує кратності гранично-виправданих моментів, що гарантує рух розкату по роликах з прискоренням/уповільненням без прослизання (буксування) і забезпечує необхідну прискорення розгону/гальмування.

2.5 Час керування електроприводом

Розглянемо більш детально процес переміщення злитка при прокатці. У процесі прокатки робота робочого рольганга узгоджується за швидкістю і

напрямом обертання з роботою головного приводу чорнової кліті і станиною роликів чорнової кліті. На робочий рольганг перед чорною кліттю надходить черговий розкат. Після повної зупинки перед чорною кліттю розкат центрується маніпуляторними лінійками і може бути заданий в прокатку при розведених маніпуляторних лінійках перед і за кліттю, при зупинених натискних гвинтах в кліті.

Режим прокатки в чорновій кліті – реверсивний. При цьому в кожному конкретному пропуску підтримується рівень швидкості, необхідний за технологією. У загальному випадку: кількість пропусків в чорновій кліті – непарне, а швидкість від пропуску до пропуску збільшується відповідно до зменшення товщини розкату.

Цикл роботи електроприводу робочого рольганга складається з наступних ділянок:

- розгін рольганга з заготівлею;
- переміщення гуркоти по рольгангу;
- гальмування рольганга вхолосту до нуля;
- центрування гуркоти маніпуляторними лінійками (час паузи);
- розгін рольганга вхолосту до транспортної швидкості (реверс);
- переміщення гуркоти по рольгангу в зворотному напрямку;
- гальмування рольганга з заготовкою до нуля.

Робота робочого рольганга при прокатці розкату в третьому-одинадцятому пропусках аналогічна роботі його при прокатці в першому-другому пропусках зі збільшенням довжини листа, що прокочується.

Після завершення прокатки в чорновій кліті розкат транспортується до чистової кліті, звільняючи рольганг за чорною кліттю.

Час розгону і гальмування електроприводу рольганга:

$$t_{\text{п}} = \frac{\Sigma J \omega_{\text{пр}i}}{M_{\text{п}} - M_{\text{с}}}, \quad (2.25)$$

$$t_{\text{т}} = \frac{\Sigma J \omega_{\text{пр}i}}{M_{\text{т}} + M_{\text{с}}}, \quad (2.26)$$

де ΣJ – сумарний момент інерції на валу електродвигуна (при розгоні або гальмуванні рольганга вхолосту $\Sigma J = J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}$; при розгоні чи гальмуванні з заготівкою $\Sigma J = J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}_i}$), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$$\omega_{\text{пр}_i} = \frac{2V_{\text{пр}_i}}{d_{\text{р}}} - \text{швидкість на валу електродвигуна, що відповідає швидкості}$$

прокатки у кожному пропуску, $1/\text{с}$;

$V_{\text{пр}}$ – лінійна швидкість прокатки, $\text{м}/\text{с}$ (див. табл. 2.2);

$M_{\text{п}}$ – середній пусковий момент електродвигуна (для подальших розрахунків приймаємо $M_{\text{п}} = \lambda_{\text{пт}} M_{\text{н}} = 1M_{\text{н}} = 1012,8 \text{ Нм}$);

$M_{\text{т}}$ – середній гальмівний момент електродвигуна (для подальших розрахунків приймаємо $M_{\text{т}} = \lambda_{\text{тт}} M_{\text{н}} = 1M_{\text{н}} = 1012,8 \text{ Нм}$);

$M_{\text{с}}$ – статичний момент навантаження на валу електродвигуна (при розгоні або гальмуванні рольганга вхолосту $M_{\text{с}} = M_{\text{х}}$; при розгоні чи гальмуванні із заготівлею $M_{\text{с}} = M_{\text{с.т}_i} = M_{\text{х}} + M_{\text{тр}_i}$).

Час транспортування металу (усталеного руху):

$$t_{\text{у}} = \frac{L_i}{V_{\text{пр}_i}}. \quad (2.27)$$

Значення часу пуску $t_{\text{п}}$, часу гальмування $t_{\text{т}}$, часу усталеного руху та час пауз $t_{\text{пауз}}$ для кожного пропуску, розраховані за вищевказаними формулами, зведені в таблицю 2.6.

Кутова швидкість на валу електродвигуна, що відповідає швидкості прокатки (див. табл. 2.6):

$$n_{\text{пр}_i} = V_{\text{пр}_i} \frac{60}{\pi d_{\text{р}}}, \text{ об} / \text{ мин} \quad (2.28)$$

Таблиця 2.6 – Розрахунок часу роботи ЕП робочого рольганга

$t_{п}, c$ (2.25)		$t_{т}, c$ (2.26)		$t_{у}, c$ (2.27)		$t_{пауз}, c$		$n_{пр_i}, об / мин$	
	1		1		1		1		1
1	0.85	1	0.41	1	1.503	1	2	1	92.599
2	0.496	2	0.826	2	1.679	2	5	2	92.599
3	1.14	3	0.431	3	0.876	3	2	3	97.229
4	0.521	4	0.821	4	0.984	4	2	4	97.229
5	1.001	5	0.431	5	1.115	5	2	5	97.229
6	0.521	6	0.735	6	1.271	6	2	6	97.229
7	0.894	7	0.431	7	1.424	7	2	7	97.229
8	0.521	8	0.671	8	1.619	8	5	8	97.229
9	0.817	9	0.436	9	1.823	9	2	9	98.387
10	0.527	10	0.62	10	2.117	10	2	10	98.387
11	0.739	11	0.436	11	2.476	11	2	11	98.387

Як видно з табл. 2.6, обраний електродвигун забезпечує потрібну максимальну швидкість прокатки. При цьому немає необхідності знижувати поле збудження машин; необхідна швидкість забезпечується зміною напруги на якорі.

На рис. 2.2 – 2.3 наведені тахограми і навантажувальні діаграми роботи електроприводу робочого рольганга (див. табл. 2.5, 2.6) за цикл роботи прокатного стану (прокатка в чорновій кліті), а також для декількох з пропусків.

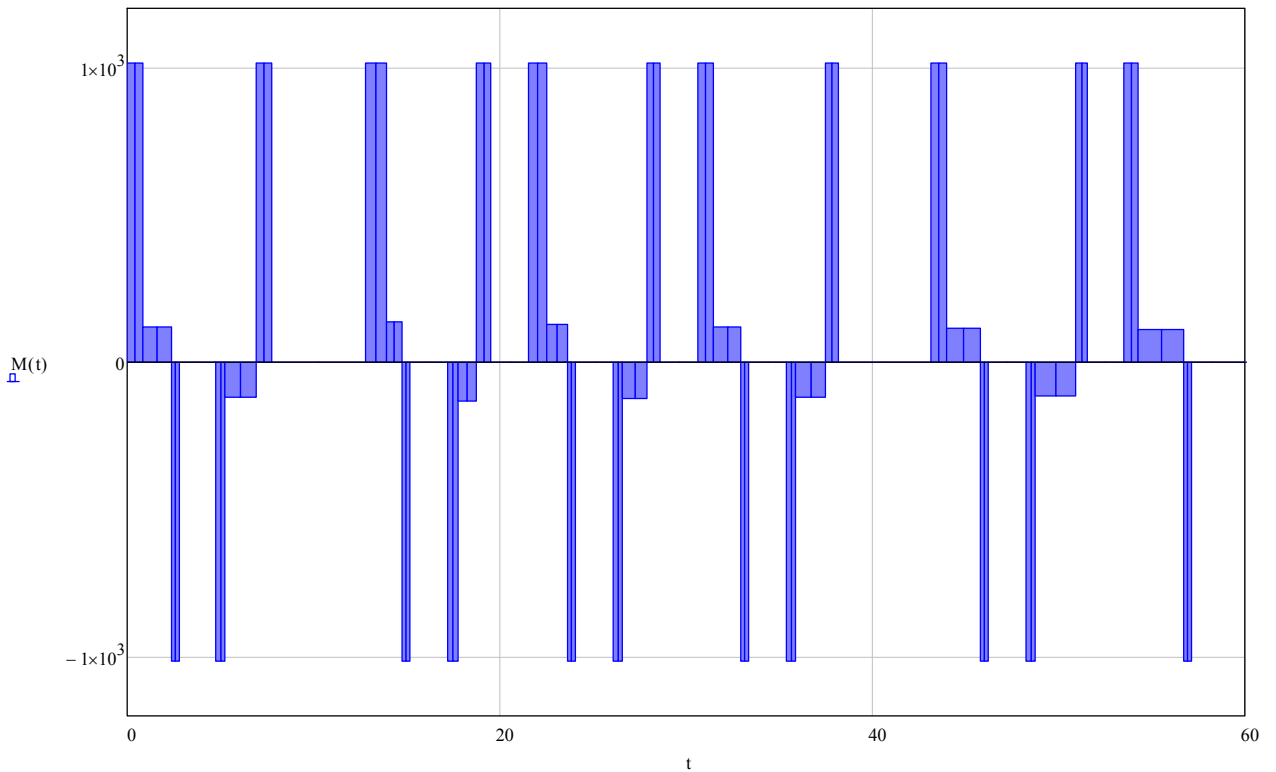
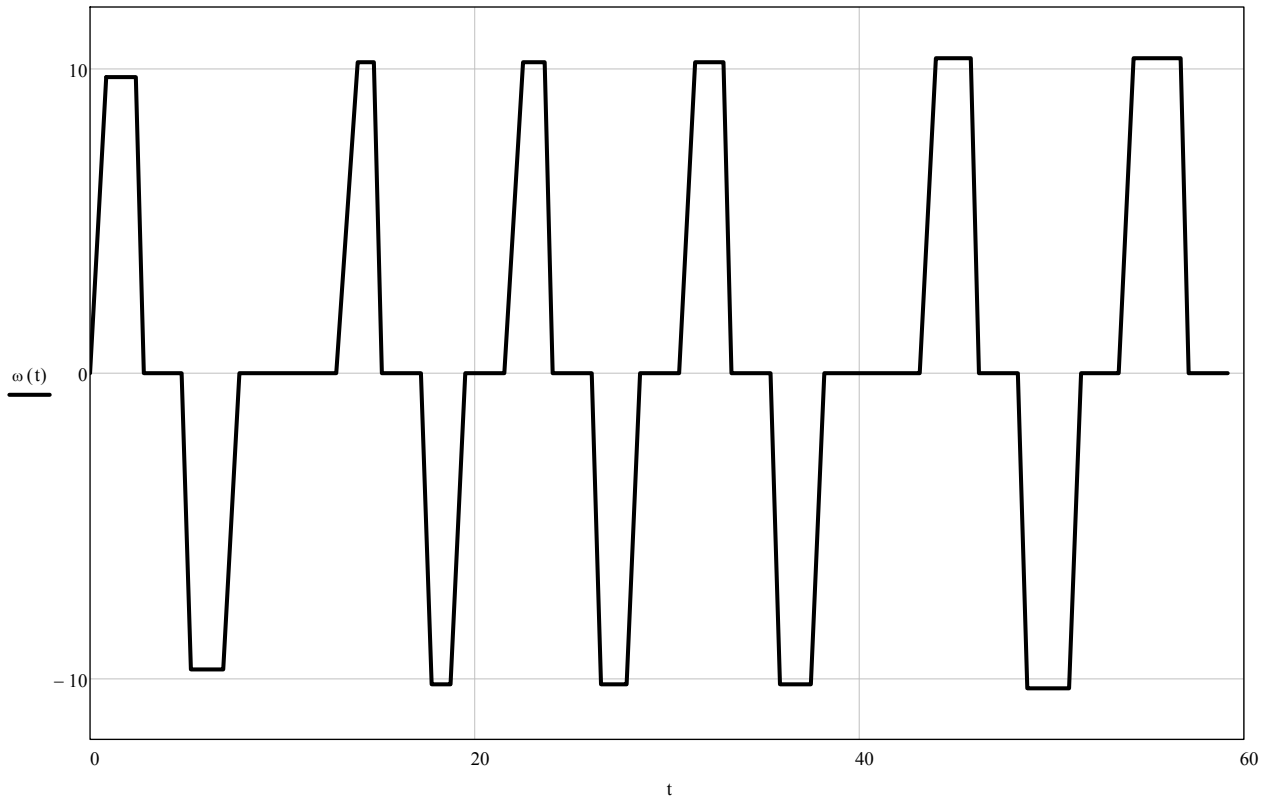
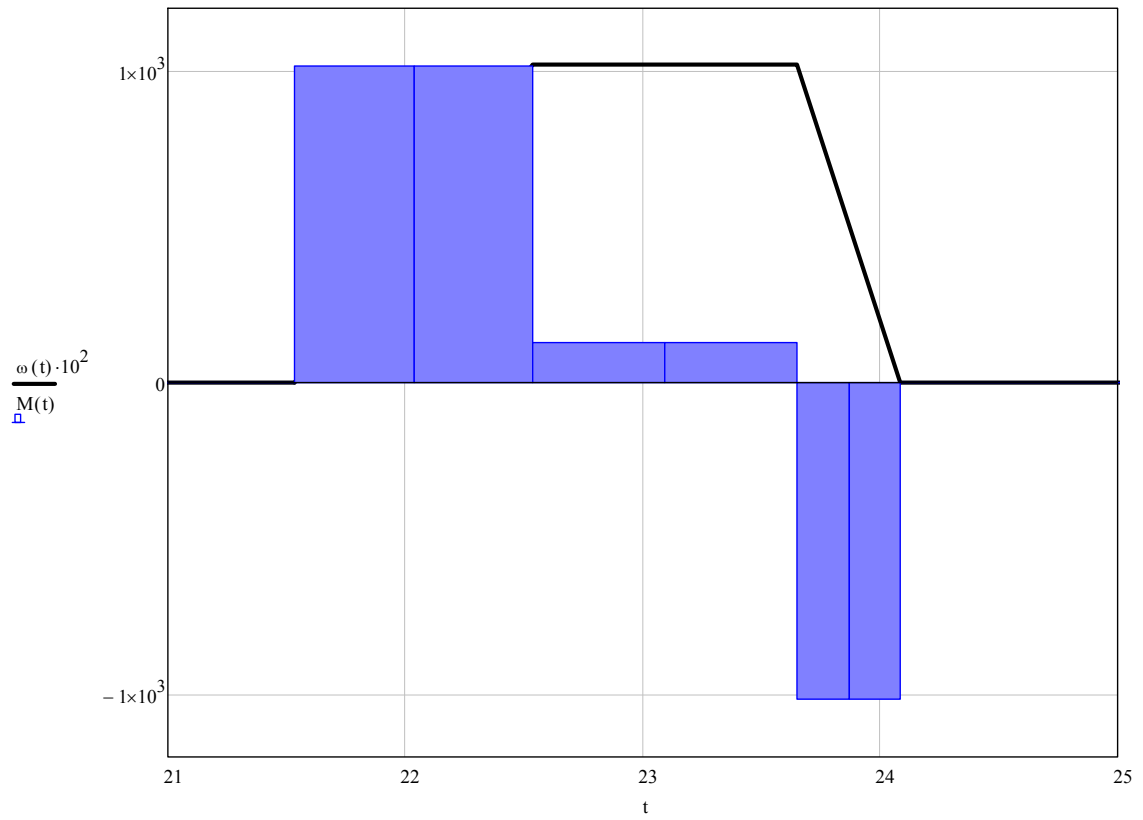
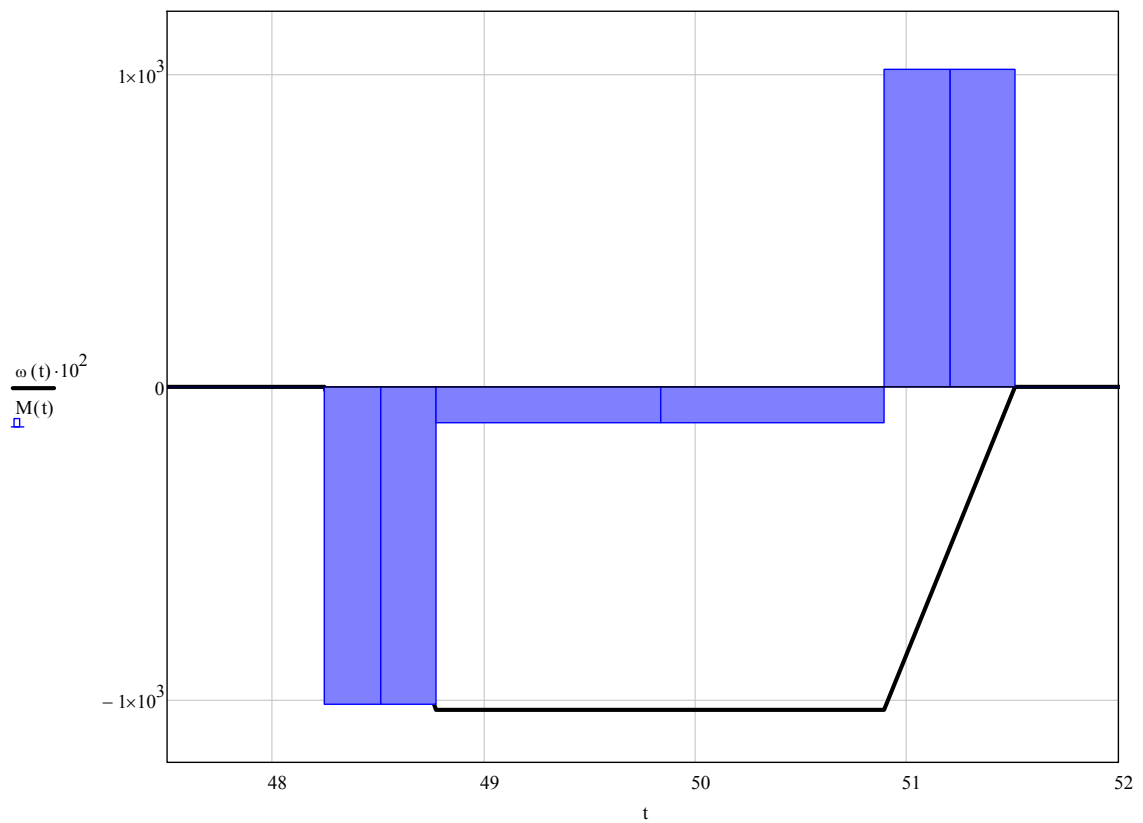


Рисунок 2.2 – Тахограма і навантажувальна діаграма роботи електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю за цикл роботи прокатного стану



п'ятий пропуск



восьмий пропуск

Рисунок 2.3 – Тахограми і навантажувальні діаграми роботи електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю

Цикл роботи електроприводу робочого рольганга складається з наступних ділянок (див. вище): 1 пропуск – розгін рольганга з заготівлею, гальмування вхолосту; 2 пропуск – розгін рольганга вхолосту, гальмування з заготівлею.

Робота робочого рольганга при прокатці розкату в третьому-одинадцятomu пропусках аналогічна роботі його при прокатці в першому-другому пропусках зі збільшенням довжини листа що прокочується.

2.6 Перевірка потужності електродвигуна по нагріву

На рис. 2.2 зображена навантажувальна діаграма електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю. Оскільки в періоди пуску, гальмування і усталеного руху роликів рольганга при прокатці листів швидкість прокатки і швидкість роликів синхронізовані, то буксування о метал відсутнє.

Еквівалентний момент електродвигуна, наведений до фактичного значення тривалості включення $\varepsilon = \Sigma t_{\text{вкл}} / t_{\text{ц}} = 35,16/59,16 = 0,68$:

$$M_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{M_{\text{п}}^2 \Sigma t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 \Sigma t_{\text{т}} + M_{\text{с.т}}^2 \Sigma t_{\text{у}}}{\Sigma t_{\text{п}} + \Sigma t_{\text{т}} + \Sigma t_{\text{у}}}} = \quad (2.29)$$

$$= \sqrt{\frac{1012,8^2 \cdot 8,1 + 1012,8^2 \cdot 6,25 + 138,44 \cdot 10^3}{8,1 + 6,25 + 16,89}} = 731,8 \text{ Нм.}$$

Еквівалентний момент, перерахований для ПВ=100% складає:

$$M_{\varepsilon 100\%} = M_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k}} = 731,8 \sqrt{\frac{0,68}{1,0}} = 603,5 \text{ Нм} = 0,6 M_{\text{н}}. \quad (2.30)$$

Отримане розрахункове значення еквівалентного моменту показує, що прийняті значення пускового і гальмівного моментів забезпечують інтенсивне протікання перехідних процесів при одночасному допустимому навантаженні електродвигуна по нагріванню. Завантаження електродвигуна становить 60%.

Серед усіх можливих моментів на валу двигуна найбільшим є пусковий момент електроприводу при транспортуванні металу – 1012,8 Нм, що по

відношенню до номінального моменту становить $1M_n$, що допустимо. Таким чином, обраний електродвигун проходить і по перевантажувальній здатності (максимально допустима кратність струму якоря 2,5).

При прокатці листів інших типорозмірів (при підкатах більшої маси) завантаження двигуна по середньоквадратичного моменту становить 50-80%, що допустимо. Деяка завищена потужність машини пояснюється необхідністю реалізації заданого темпу розгону/гальмування при транспортуванні металу найбільшої маси 7,5 т. Крім того, в разі ручного керування механізмами району прокатної кліти можливі неузгодженості лінійних швидкостей валів головного приводу, станинних роликів, робочих і розкатних рольгангів що призводить до появи буксування роликів об поверхню металу (статичні моменти на двигуні зростають до моментів буксування), викликаючи додатковий нагрів машини. Також буксування роликів о метал виникає при виході розкату з валів кліти з більшою швидкістю через так зване «випередження». Вважаємо, що 35% -го резерву потужності двигуна досить для покриття додаткових моментів.

3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ

3.1 Вибір силової та перетворювальної техніки рольгангу

Для живлення якірних ланцюгів електродвигунів і обмоток збудження електричних машин постійного струму застосовуються, головним чином, електромашинні генератори (Г) що обертаються, широтно-імпульсні перетворювачі (ШП) на тиристорах і транзисторах і тиристорні перетворювачі (ТП) змінного струму в постійний. Відповідно до цього силова частина електроприводу може бути зібрана за різними схемами: Г-Д, ШП-Д або ТП-Д.

Система Г-Д володіє хорошими регулювальними властивостями, порівняно невисокою питомою вартістю і великим терміном служби. Основною перевагою цієї системи є високий коефіцієнт потужності, крім того, при роботі системи Г-Д не спотворюється форма напруги мережі живлення змінного струму.

До недоліків цієї системи слід віднести: складність, низький ККД через потрійне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки), великий рівень шуму в процесі роботи, необхідність регулярного і ретельного обслуговування.

В даний час система Г-Д має обмежене застосування в зв'язку з масовим впровадженням перетворювачів на тиристорах і транзисторах. У металургійній промисловості використовується в якості електроприводу великої потужності на деякі прокатних станах (наприклад, обтискних).

Переваги системи ШП-Д визначаються перевагами ШП як джерела живлення, а саме:

– високі динамічні властивості (швидкодія, точність, якість регулювання і т.д.) через відсутність у ШП додаткових індуктивностей в ланцюзі навантаження, високої частоти комутації і менш істотних нелінійностей перетворювача;

– широкий діапазон регулювання вихідної напруги (до $1:10^5$);

- високий ККД, оскільки втрати потужності на регулюючому елементі ШПП незначні в порівнянні з втратами потужності в разі безперервного регулювання;

- високий коефіцієнт потужності системи;

- високе використання двигунів по струму через велику частоту комутації і малі пульсації струму якоря;

- низький вихідний опір перетворювача і тому більш жорсткі швидкісні і механічні характеристики двигуна;

- мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим чинником є час провідності ключа, а не величина внутрішнього опору регулюючого елемента, що має місце при безперервному регулюванні;

- малі габарити і маса;

- постійна готовність до роботи.

Разом з тим ШПП притаманні і недоліки:

- імпульсний режим роботи регулюючого елемента призводить до необхідності встановлювати вихідні фільтри, що викликає інерційність процесу регулювання в замкнутих системах;

- високі швидкості включення і виключення струму в силовому ланцюзі ШПП призводять до виникнення радіоперешкод.

В даний час практичне застосування ШПП на напівпровідникових елементах обмежене електроприводами малої і середньої потужності.

В електроприводах середньої і великої потужності широкого поширення набула система ТП-Д. В порівнянні з системою Г-Д ця система електроприводу має низку переваг:

- відсутність обертових частин, безшумність в роботі;

- вищі швидкодія і ККД (ККД системи ТП-Д становить 0,96...0,98, системи Г-Д – 0,76...0,84);

- більш висока точність регулювання завдяки відсутності інерції, що часто забезпечує механізму велику продуктивність і високу якість продукції;

- менша чутливість до впливу газів і забрудненого середовища;
- відсутність складних вентиляційних пристроїв.

Разом з тим у порівнянні з системою Г-Д система ТП-Д має такі недоліки:

- погіршення коефіцієнта потужності пропорційно і зменшення при цьому здатності навантаження ТП, що особливо відчутно в приводах великої потужності;
- при глибокому регулюванні крім зменшення коефіцієнта потужності збільшується амплітуда пульсацій в кривих випрямленої напруги і струму, що може несприятливо позначитися на комутації струму приводного двигуна, викликати розриви струму і коливання швидкості обертання двигуна;
- спотворення форми кривої напруги мережі живлення в результаті комутаційних процесів в ТП, що несприятливо позначається на роботі інших електроустановок, які живляться від цієї мережі, а також на роботі самого ТП, оскільки нерідко мережева напруга використовується в якості опорної.

Особливо відзначимо, що перераховані недоліки системи ТП-Д стають вагомими тільки при великій потужності приводу, однак при цьому і її переваги виступають особливо яскраво.

Тиристорні електроприводи (система ТП-Д) мають високі техніко-економічні показники і експлуатаційні переваги, відповідають сучасним вимогам технологічних процесів і по праву стають головним засобом керованого перетворення електричної енергії в механічну.

Для підтримки системою заданих параметрів на необхідному рівні вони, як правило, будуються замкнутими, а підвищення якісних показників їх роботи досягається введенням спеціальних коригувальних ланок (системи з послідовною, паралельною і змішаною корекцією) або організацією модального керування. Системи з паралельною, послідовною і змішаною корекцією зазвичай представляють собою багатоконтурні системи регулювання. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки.

При застосуванні паралельної корекції підвищується стабільність характеристик системи за рахунок ланок, охоплених зворотнім зв'язком. Вплив перешкод на коригуючий пристрій, включений в ланцюг зворотного зв'язку,

значно менше, ніж при включенні його в прямий канал системи, оскільки сигнал знімається з виходу системи, що представляє собою фільтр низьких частот.

Основними недоліками паралельної корекції є відносна складність розрахунку системи і велика трудомісткість налаштування. Контур, утворений місцевим зворотнім зв'язком, може сам по собі виявитися нестійким, виникають також труднощі з підсумовуванням сигналів. Крім того, цю систему слід завжди розглядати як єдине ціле, оскільки в більшості випадків зміна одного з параметрів вимагає перерахунку і перебудови всієї системи.

Системи з послідовною корекцією вигідно відрізняються від систем з паралельною корекцією, особливо при складних структурах об'єкта регулювання, великому числі регульованих параметрів і високих вимогах до якості регулювання. Прості і зручні для практики методи розрахунку і настроювання контурів систем з послідовною корекцією дозволяють навіть при значних погрішності у визначенні динамічних параметрів об'єкта регулювання отримати цілком працездатну систему керування електроприводом. Такі системи вводять в експлуатацію методом послідовного налаштування окремих контурів системи керування (на відміну від систем з паралельною корекцією). Великою перевагою систем з послідовною корекцією є зручність обмеження будь-якого з регульованих параметрів на заданому рівні.

Створення практично безінерційних тиристорних і транзисторних перетворювачів з малою потужністю керування і операційних підсилювачів постійного струму, що застосовуються в якості активних коригувальних ланок, забезпечило широке впровадження систем з послідовною корекцією для керування практично всіма видами металургійного електроприводу постійного струму.

САК з послідовною корекцією розбивається на ряд контурів, число яких дорівнює числу регульованих параметрів системи. Параметрами регулювання можуть бути: напруга перетворювача, сила струму в головному ланцюзі, швидкість електродвигуна, кутове або лінійне положення робочого механізму, натяг металу, що прокочується і ін.

У системі регулювання з послідовною корекцією головним параметром регулювання є той, який визначає основну мету автоматичного регулювання. Інші параметри – допоміжні, вони підпорядковані головному параметру. Крім того, допоміжні параметри також знаходяться в підпорядкуванні один з іншим. Наприклад, параметр напруги перетворювача підпорядкований параметру струму в головному ланцюзі, а останній підпорядкований параметру швидкості електродвигуна і т.п. Тому системи з послідовною корекцією називають також системами підпорядкованого керування (регулювання).

3.2 Вибір комплектного електропривода

Основними технічними даними комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм $I_{н\ тп}$ і напруга $U_{н\ тп}$. Для багатодвигунових електроприводів при послідовному живленні якірних ланцюгів за номінальний струм перетворювача приймається сумарний струм двигунів, через що зростає його потужність, а отже і його ціна. При роздільному живленні якірних ланцюгів номінальний струм перетворювача, повинен бути більше ніж:

$$I_{н\ дв} \frac{\lambda_{п.т} + M_{с*}}{1,8} = 93 \cdot \frac{1,5 + 0,3}{1,8} = 93 \text{ А} \quad (3.1)$$

де $I_{н\ дв}$ – номінальний струм якоря обраного електродвигуна, А; $\lambda_{п.т}$ – величина кратності пуско-гальмівних струмів, що забезпечує роботу електродвигуна без перегріву; $M_{с*}$ – відносна величина статичного моменту; 1,8 – перевантажувальна здатність по струму перетворювачів SIMOREG DC Master концерну Siemens.

Номінальна напруга перетворювача визначається номінальною напругою електродвигуна, яка менше номінальної напруги ТП, що визначається за ГОСТ 25953-83, на 5-15%, що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості і на безпечне інвертування при зниженні напруги мережі живлення, тобто $U_{н\ тп} = (1,05 \div 1,15)U_{н\ дв}$.

Номінальні дані двигунів Д810У2 для яких проводиться вибір силових ТП наведені в таблиці 2.2.

Дотримуючись наведених рекомендацій вибираємо роздільне живлення якірних ланцюгів. Встановлюємо на кожен електродвигун по одному перетворювачу і один резервний.

Для встановлених електродвигунів, з каталогу [32, 33] вибираємо реверсивний комплектний тиристорний електропривод (КТЕ) SIMOREG DC Master концерну Siemens шафового виконання, технічні дані якого наведені в табл. 3.1. Однолінійна схема силової частини комплектного електроприводу SIMOREG DC MASTER приведена на рис. 3.1 [32].

Перетворювачі SIMOREG DC MASTER є повністю цифровими компактними модулями з трифазним живленням, призначеними для живлення якоря і обмотки збудження двигунів постійного струму з регульованою швидкістю і з номінальним струмом якоря в діапазоні від 15А до 2000А. Компактні перетворювачі можуть включатися паралельно для забезпечення струму до 10000А. Максимальне значення струму для живлення ланцюга збудження дорівнює 40А (рівні струмів залежать від номінального струму якоря).

Таблиця 3.1 – Технічні дані перетворювача шафового виконання SIMOREG DC MASTER 6RM7028-6DV02

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Номінальна 3х фазна напруга живлення, В	$U_{н1\ тп} = 400$
Номінальний вхідний струм, А	$I_{н1\ тп} = 75$
Номінальна випрямлена (постійна) напруга, В	$U_{н\ тп} = 420$
Номінальна випрямлена (постійна) струм, А	$I_{н\ тп} = 90$
Номінальна потужність, кВт	$P_{н\ тп} = 38$
Номінальна напруга збудження, В	$U_{в\ тп} = 325$
Номінальний струм збудження, А	$I_{в\ тп} = 10$
Маса, кг	$m_{тп} = 185$

Всі блоки SIMOREG DC MASTER забезпечені простою панеллю керування (PMU), закріпленою на дверцятах перетворювача. Панель складається з п'ятирозрядного, семисегментного індикатора, трьох світлодіодів індикації стану і трьох кнопок параметрування. На панелі керування так само знаходиться з'єднувач типу X300 з інтерфейсом USS, що відповідає стандарту RS232 або RS485. Панель забезпечує все необхідне для регулювання і налаштування, а так само відображення вимірних значень, необхідних для запуску перетворювача.

Параметрування перетворювача можна так само здійснювати через стандартний РС при використанні відповідного програмного забезпечення. ЕОМ підключається до базового блоку за допомогою послідовного інтерфейсу. Цей інтерфейс використовується під час запуску, для збереження параметрів при відключенні, а так само для діагностики під час роботи. Більш того, оновлене програмне забезпечення перетворювача можна завантажити через цей інтерфейс для зберігання у Flash пам'яті.

У одноквадрантних перетворювачах ланцюг якоря живиться від повністю керованого трифазного моста, а в чотириквADRантний модулях – від двох повністю керованих трифазних мостів, включених зустрічно-паралельно. На схему збудження живлення подається через однофазний напівкерований двонапівперіодний міст.

Напруга живлення якоря і схеми збудження може відрізнитися по частоті (лежати в діапазоні від 45 до 65 Гц). Послідовність чергування фаз джерела живлення якоря значення не має.

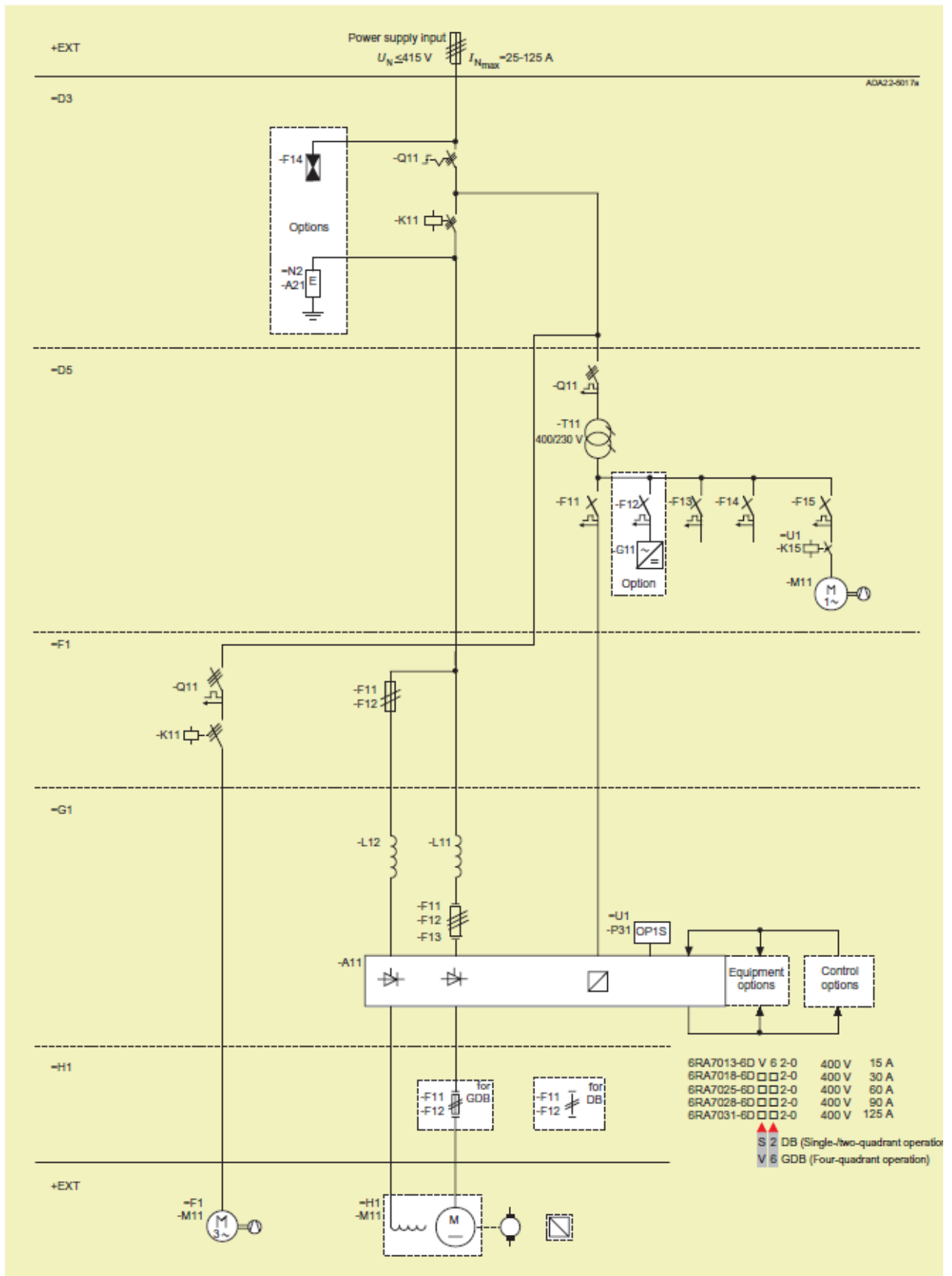


Рисунок 3.1 – Однолінійна схема силової частини комплектного електроприводу SIMOREG DC MASTER

3.3 Вибір силового трансформатора і згладжуючого дроселя

Силовий трансформатор в схемі керованого випрямляча застосовується для узгодження стандартної напруги мережі і напруги навантаження. Зменшення напруги на виході ТП постійного струму за рахунок зміни кута керування в більшості практичних випадків неприпустимо, оскільки це веде до недовикористання по потужності перетворювальної установки і зниження її енергетичних показників (коефіцієнта потужності). Крім того, трансформатор обмежує струм в режимі короткого замикання, а також швидкість наростання струму як в робочих, так і в аварійних режимах роботи перетворювача.

Для узгодження тиристорних перетворювачів (12 + 1) з мережею живлення з довідника [34] обираємо силовий трансформатор ТСЗП-1000/10У3 технічні дані, якого наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні дані силового трансформатора ТСЗП-1000 / 10У3 виконання 5 для живлення тиристорного перетворювача [34]

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Потужність, кВ·А	$P_{\text{тр тп}} = 938$
Номінальна первинна напруга, В	$U_{1 \text{ тр тп}} = 6000$
Номінальна вторинна напруга, В	$U_{2 \text{ тр тп}} = 415$
Діюче значення струму вторинної обмотки, А	$I_{2 \text{ тр тп}} = 1305$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{\text{хх тп}} = 2650$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{\text{кз тп}} = 8000$
Напруга короткого замикання, %	$U_{\text{кз}\% \text{ тп}} = 5,6$
Струм холостого ходу, %	$I_{\text{хх}\% \text{ тп}} = 1,5$
Маса, кг	$m_{\text{тр тп}} = 350$

Оскільки двигун серії Д допускає роботу без реактора, що згладжує і за довідником не рекомендується використовувати його на данні напругу і струм, оскільки індуктивності якоря двигуна і трансформатора досить для згладжування пульсацій, що виникають в роботі електропривода, то вибір згладжувального реактора не проводиться. Це істотно зменшить вартість і масогабаритні показники електроприводу.

3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електроприводу робочого рольганга

Принципова схема силового ланцюга робочого рольганга перед чорною кліткою приведена на рис. 3.2.

3.4.1 Джерела живлення електродвигунів (перетворювача SIMOREG DC Master)

Для живлення електродвигунів використовуються комплектні тиристорні електроприводи SIMOREG DC Master 6RM7028-6DV02 (див. табл. 3.1) з реверсом струму в якорному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, з лінійним контактором і пристроєм динамічного гальмування, з вбудованим пристроєм збудження двигуна; з програмованими засобами керування, з однозонною системою регулювання швидкості зі зворотним зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості, з мережевими зв'язками Profibus DP і CAN. Система захисту реагує на датчики аварій, а також на аварійні ситуації, що вираховуються програмно.

3.4.2 Резервування перетворювальної техніки

Принципова схема перемикачів на резервний ТКЕ приведена на рис. 3.2. Для резервування робочих ТКЕ 44UZ1-44UZ112 приводів робочого рольганга перед чорною кліткою використовується резервний ТКЕ 44UZR типу SIMOREG DC Master 6RM7028-6DV02 (див. табл. 3.1). Схема перемикачів на резервний перетворювач приведена на рис. 3.2.

Перемикання електродвигуна на живлення від резервного ТП виробляється при відключеному живленні основних ланцюгів і зупиненому приводі.

3.5 Вимоги до системи автоматизації

Керування роботою рольгангів – ручне і автоматичне.

Ручний режим керування використовується при налагодженні, випробуванні, в нештатних і аварійних ситуаціях, а також у випадках тимчасових відмов у роботі при автоматичному керування.

Автоматичний режим керування є основним і містить в собі автоматичну послідовність роботи механізмів районі чорнової кліті в функції наявності металу у відповідному контрольному перетині стану.

Передбачається також можливість ручного втручання апаратом ручного керування кожним рольгангом.

Забезпечити два режими роботи рольгангів (як перед, так і за чорною кліттю):

- режим «транспортування» – спільна робота роликів рольганга із забезпеченням синхронного обертання парних і непарних роликів в одну сторону;

- режим «розворот» – одночасне включення двигунів приводів із забезпеченням обертання парних і непарних роликів в протилежних напрямках.

Узгодити швидкість рольгангів зі швидкістю кліті, що примикають рольгангів і станиною роликів (на стороні виходу металу з кліті врахувати випередження металу при прокатці).

Функції системи автоматизації.

Система автоматизації повинна бути інформаційно пов'язана з системами верхнього рівня автоматизації і забезпечувати вирішення наступних завдань:

- зв'язок з іншими локальними системами по супроводу металу і обміну інформацією;

- зв'язок між приводами по шині **Profibus** через станцію віддаленого

вводу/виводу **ET200** і іншим радіальним каналам;

- ситуаційно-логічне управління комплексом;
- введення параметрів і вивід на кольорові монітори, друк протоколів (при необхідності);
- локальна діагностика несправності комплексу.

Інші функції при необхідності забезпечуються розробником АСУ ТП.

Параметри налаштування, що визначають режими роботи приводів, не повинні виходити за допустимі межі.

Технічні засоби, на яких створюється система базової автоматизації, повинні бути максимально уніфіковані і взаємозамінні.

Пульты керування повинні бути інтегрованими (тобто містити як органи керування приводами, так і органи керування, що відносяться до системи автоматизації).

Кількість органів керування і сигналізації повинно бути погоджено між проектувальниками електроприводів і АСУ ТП в ході проектування.

Апарати на пультах керування повинні бути розподілені за трьома зонами:

- оперативна зона;
- зона апаратури ручного (поштовхового) керування;
- зона підготовки обладнання до роботи.

На кожному з пультів, оснащених сигнальної арматурою, передбачити кнопку для контролю справності сигнальних ламп.

Керування робочими рольгангами перед і за чорною кліткою – з поста ПУЗ.

3.6 Математичний опис об'єкта керування

При синтезі системи керування приймаються звичайні для систем електроприводу допущення, лінійризуючі силову частину об'єкта керування – 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 керування 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. Керування ТП здійснюється дискретно, оскільки після відмикання чергового тиристора зміна сигналу керування 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, що проводив струм у зв'язку з неможливістю закрити по ланцюгу керування відкритий тиристор. Останнє явище отримало назву неповної керованості тиристорного перетворювача.

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 тиристорних перетворювачів: безперервна, в якій ТП представляється аперіодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{тп}}$ і сталої часу $\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ та імпульсна. Надалі, при синтезі

САК буде використана безперервна модель тиристорного перетворювача.

Система регулювання обраного тиристорного перетворювача двопроцесорна, всі регулятори (струму якоря, швидкості, ЕДС двигуна, струму збудження і т.п.) побудовані з функціональних блоків, реалізованих програмно. Внаслідок того, що швидкодія мікропроцесорів досить високу ресурсів, яких до того ж вистачає для реалізації системи захистів і сигналізації, здійснення моніторингу стану електроприводу, діагностики збоїв і попереджень, інтерфейсу оператора і т.п., синтез системи регулювання може бути здійснений відповідно до традиційного налаштування контурів за модульним і симетричними оптимумами, причому сама система регулювання вважається безперервною. Детальні структурні схеми відповідних контурів регулювання

перетворювача SIMOREG DC Master будуть представлені в наступних розділах при синтезі САР.

Таким чином, електродвигун представимо у вигляді трьох типових ланок (рис. 3.3): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина двигуна) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативним зворотним зв'язком по ЕРС двигуна.

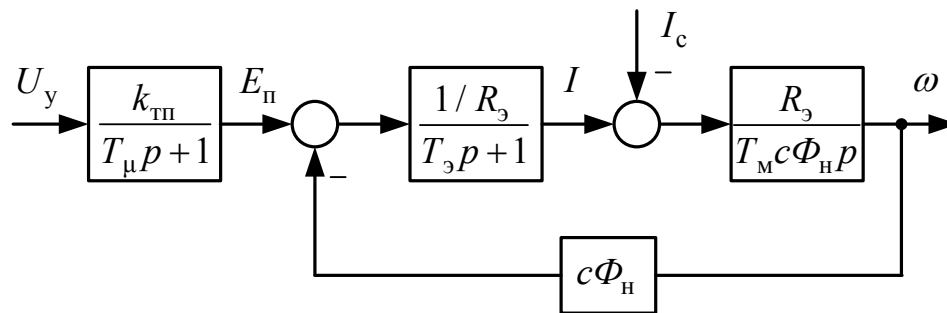


Рисунок 3.3 – Структурна схема силової частини електропривода

3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електроприводу

Значення максимально випрямленої ЕРС (напряга на виході тиристорного перетворювача):

$$E_{d0\text{ ТП}} = 1,35U_{2\text{ тр ТП}} = 1,35 \cdot 415 = 560,25 \text{ В} \quad (3.2)$$

де 1,35 – коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2\text{ тр ТП}}$ – номінальна напряга на вторинній обмотці силового трансформатора, В (див. табл. 3.2).

Кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напряги:

$$\omega_1 = 2\pi f_c m_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6 = 1884,956 \text{ Гц} \quad (3.3)$$

де f_c – частота мережі живлення, Гц;

m_ϕ – число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний і повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр тп}} = \frac{\Delta P_{\text{кз тп}} U_{2 \text{ тр тп}}^2}{P_{\text{тр тп}}^2} = \frac{8000 \cdot 415^2}{(938 \cdot 10^3)^2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \quad (3.4)$$

$$z_{\text{тр тп}} = \frac{U_{\text{кз\% тп}} U_{2 \text{ тр тп}}}{100 I_{2 \text{ тр тп}} \sqrt{3}} = \frac{5,6 \cdot 415}{100 \cdot 1305 \cdot \sqrt{3}} = 10,282 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

$$x_{\text{а тр тп}} = \sqrt{z_{\text{тр тп}}^2 - r_{\text{тр тп}}^2} = \sqrt{10,282 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-3}} = 10,172 \cdot 10^{-3} \quad (3.6)$$

де $\Delta P_{\text{кз тп}}$ – потужність втрат короткого замикання трансформатора, Вт;

$P_{\text{тр тп}}$ – потужність трансформатора, В · А;

$U_{\text{кз\% тп}}$ – напруга короткого замикання трансформатора, %;

$I_{2 \text{ тр тп}}$ – діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А.

Індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму:

$$L_{\text{тр тп}} = \frac{x_{\text{а тр тп}}}{2\pi f_c} = \frac{10,172 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 32,395 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

де $x_{\text{а тр тп}}$ – повний опір силового трансформатора.

Індуктивність якоря двигуна визначається за емпіричною формулою:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = 6 \frac{220}{2 \cdot 165 \cdot 93} = 43,011 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.8)$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції електродвигуна ($k = 5 \dots 6$ – для компенсованих машин);

$U_{\text{н}} = 220$ В – номінальна напруга електродвигуна;

$I_{\text{н}} = 93$ А – номінальний струм електродвигуна;

$2p = 2$ – число пар полюсів електродвигуна;

$n_{\text{н}} = 165$ об/хв – номінальна частота обертання електродвигуна.

Сумарний опір якорного ланцюга електродвигуна:

$$r_{\text{я.дв}} = \beta(r_{\text{я}} + r_{\text{дп}}) = 1,32(0,065 + 0,034) = 0,128 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

де $\beta = 1,32$ – температурний коефіцієнт двигуна, що враховує зміну опору при нагріванні машини на 80°C ;

$r_{\text{я}} = 0,065 \text{ Ом}$ – опір обмотки якоря (холодний) при 20°C ;

$r_{\text{дп}} = 0,034 \text{ Ом}$ – опір додаткових полюсів (холодний).

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ф}} \cdot x_{\text{а}}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 10,172 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 9,718 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.10)$$

де $m_{\text{ф}} = 6$ – число фаз випрямлення;

$x_{\text{а}} = 10,172 \text{ мОм}$ – повний опір силового трансформатора.

При синусоїдальній опорній напрузі СІФУ перетворювача характеристика вхід-вихід ТП лінійна і коефіцієнт передачі ТП по напрузі розраховується за формулою:

$$k_{\text{ТП}} = \frac{E_{\text{д0}}}{U_{\text{у max}}} = \frac{560,25}{10} = 56,1 \quad (3.11)$$

де $U_{\text{у max}} = 10 \text{ В}$ – максимальна керуюча напруга ТП.

Еквівалентний активний опір якорного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_{\text{я}} &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_{\text{к}} + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,128 + 2(1,5 \cdot 10^{-3}) + 9,718 \cdot 10^{-3} + 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,154 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $r_{\text{я.дв}} = 0,128 \text{ мОм}$ – активний опір якорного ланцюга двигуна;

$r_{\text{тр}} = 1,5 \text{ мОм}$ – активний опір силового трансформатора;

$r_{\text{к}} = 9,718 \text{ мОм}$ – комутаційний опір;

$r_{\text{ш}} = 0,1r_{\text{я.дв}} = 0,1 \cdot 0,128 = 12,8 \text{ мОм}$ – активний опір шин або кабелю, що

з'єднують ТП з якорем двигуна.

Еквівалентна індуктивність якорного ланцюга системи ТП-Д:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{дв}} + 2L_{\text{тр}} = 43,011 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 32,395 \cdot 10^{-6} = 0,043 \text{ Гн} \quad (3.13)$$

Сумарний приведений момент інерції електроприводу:

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}} = 3,125 + 43,78 + 40,08 = 87 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.14)$$

де $J_{\text{дв}} = 3,125 \text{ кгм}^2$ – момент інерції електродвигуна (див. табл. 2.1);

$J_{\text{р}} = 43,78 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції ролика;

$J_{\text{м}}$ – момент інерції транспортованого злитка, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я.дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 93 \cdot 0,128}{17,3} = 12,04 \text{ Вс} \quad (3.15)$$

де $\omega_{\text{н}} = 17,3 \text{ 1/с}$ – номінальна швидкість електродвигуна.

Електромагнітна стала часу системи ТП-Д:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,043}{0,154} = 0,27 \text{ с} \quad (3.16)$$

Електромеханічна стала часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = \frac{J'_{\Sigma} R_{\Sigma}}{c\Phi_{\text{н}}^2} = \frac{87 \cdot 0,154}{12,04^2} = 0,1 \text{ с} \quad (3.17)$$

Постійну часу ТП через наявність в ньому і взагалі в системі малих неврахованих інерційні, приймаємо $T_{\mu} \approx 5 \text{ мс}$.

3.8 Синтез лінійного регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму будемо вважати, що електромеханічна стала часу набагато більше електромагнітної сталої часу T_{Σ} . Можна також знехтувати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, вважаючи його збурюючим впливом в контурі струму.

Структурна схема контуру струму представлена на рисунку 3.4.

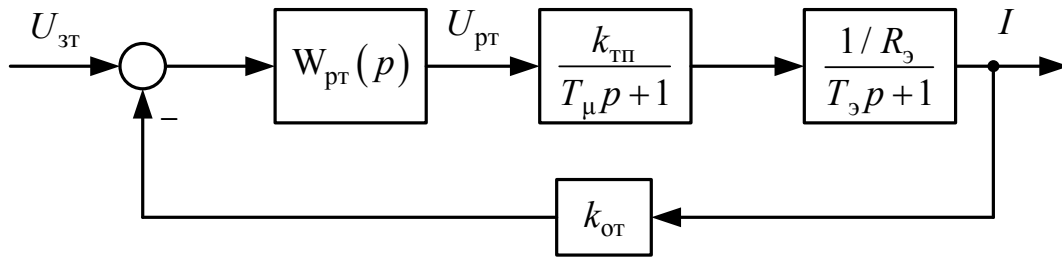


Рисунок 3.4 – Структурна схема контуру струму

Як малої сталої часу контуру струму приймаємо малу постійну ТП $T_{\mu} = 5$ мс. Налаштовуємо контур струму на модульний оптимум.

Передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{рті}}^{\text{м}}(p) = \frac{R_{\text{э}}(T_{\text{э}}p + 1)}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}2T_{\mu}p} = \frac{R_{\text{э}}(T_{\text{э}}p + 1)}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}p} = k_{\text{рті}} + \frac{k_{\text{рті}}}{p} \quad (3.18)$$

Пропорційна та інтегральна частина ПІ-регулятора струму:

$$k_{\text{рті}} = \frac{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}} = \frac{0,154 \cdot 0,27}{56,02 \cdot 0,043 \cdot 0,01} = 1,785 \quad (3.19)$$

$$k_{\text{рті}} = \frac{R_{\text{э}}}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}} = \frac{0,154}{56,02 \cdot 0,043 \cdot 0,01} = 6,39 \quad (3.20)$$

де $T_{\text{э}} = 0,27$ с – електромагнітна стала часу системи ТП-Д;

$k_{\text{тп}} = 56,02$ – коефіцієнт передачі ТП по напрузі;

$k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт.мак}}}{I_{\text{мак}}} = \frac{10}{232,5} = 0,043$ В/А – коефіцієнт передачі ланки зворотнього

зв'язку по струму;

$U_{\text{зт.мак}} = 10$ В – максимальний сигнал завдання на струм;

$I_{\text{мак}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 93 = 232,5$ А – максимально допустимий струм якоря двигуна (струм упору);

$T_{\text{от}} = 2T_{\mu} = 2 \cdot 0,005 = 0,01$ с – стала часу інтегрування контуру струму при налаштуванні на модульний оптимум.

Функціональна схема контуру регулювання струму якоря, реалізована в перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлена на

рисунку 3.5. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора струму при налагодженні електроприводу необхідно встановити в параметрах P155.F і P156.F відповідно.

Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якоря двигунів використовується канал аналогового входу (клеми X174.4 і X174.5 на рис. 4.4), на які подається напруга з датчика напруги, підключеного до вимірювального шунту. Шунт необхідно встановити в якірному ланцюзі двигуна. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем А/D, нормується за величиною до 100% параметром P701.F і далі при необхідності інвертується за допомогою параметра P703, програмно фільтрується і на виході конектора K0011 виходить програмний сигнал, пропорційний реальному току.

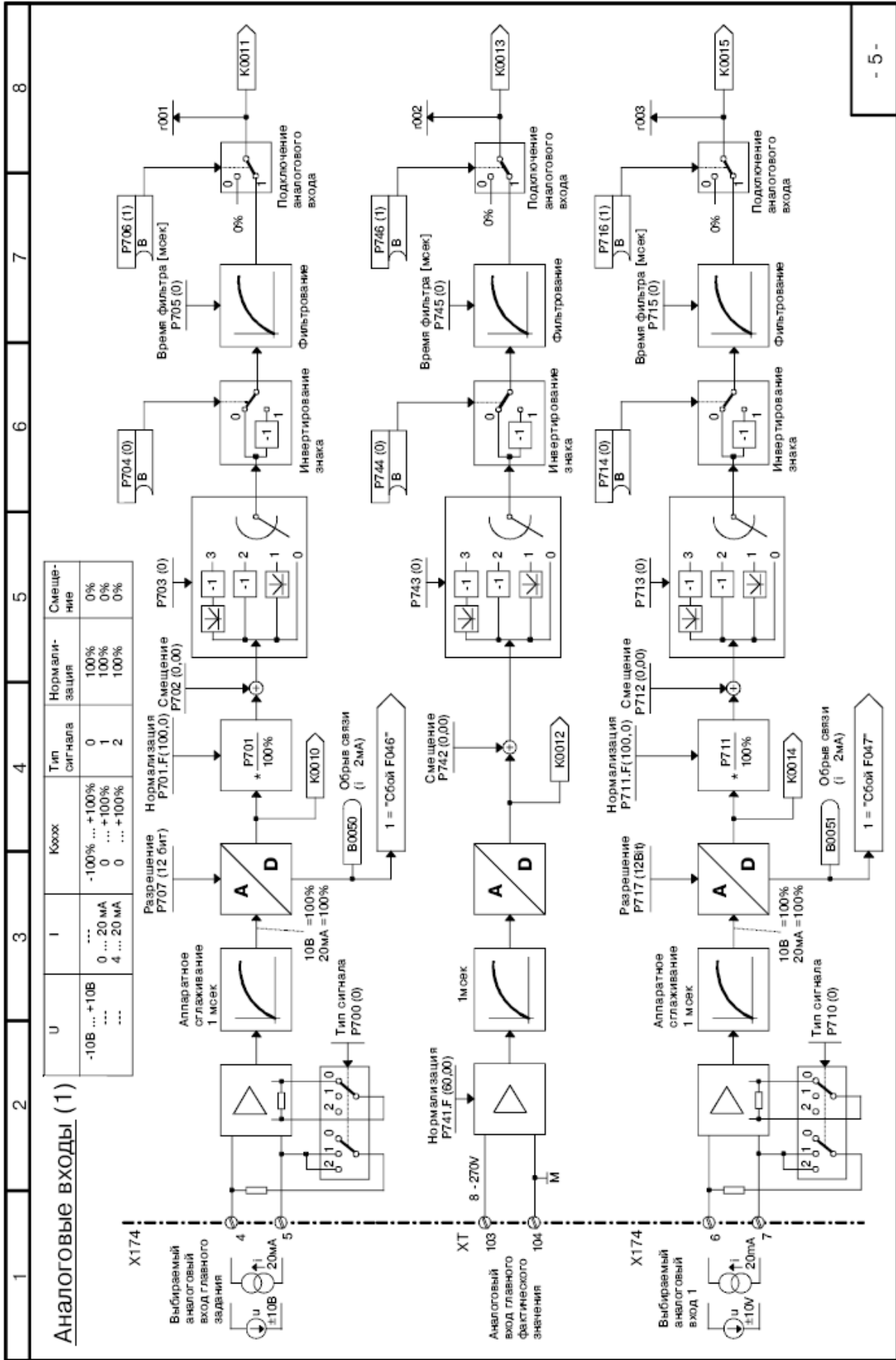


Рисунок 3.6 – Канал формирования сигнала зворотного зв'язку по струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

3.9 Синтез лінійного регулятора швидкості

Структурна схема контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки T_μ – мала стала часу, то добутком $T_{от}T_\mu$ можна знехтувати) приведена на рисунку 3.7.

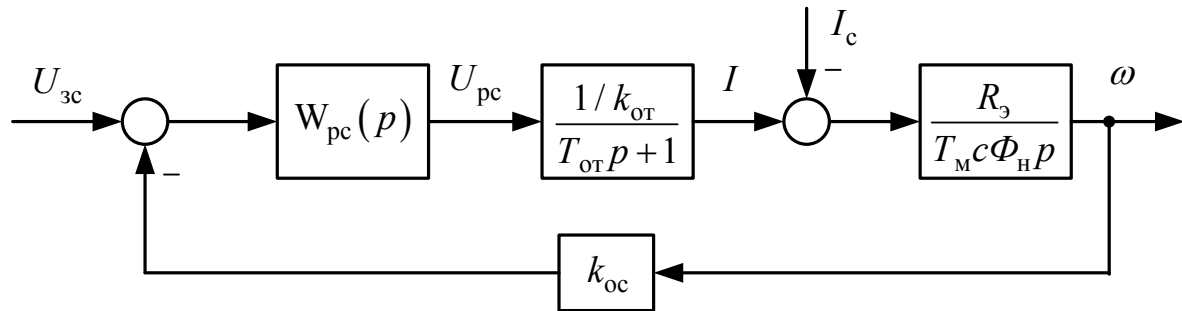


Рисунок 3.7 – Структурна схема контуру швидкості

Оскільки вимоги до статички – забезпечення статичної помилки регулювання в межах 5%, контур швидкості виконуємо дворазово-інтегруючим (з ПІ-регулятором), тобто здійснюємо налаштування на симетричний оптимум. В цьому випадку передавальна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{рс}^c(p) = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_3 k_{ос} 2T_{от}} \frac{4T_{от}p + 1}{4T_{от}p} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_3 k_{ос} T_{ос}} \frac{2T_{ос}p + 1}{2T_{ос}p} = k_{рс\Pi} + \frac{k_{рсИ}}{p} \quad (4.20)$$

Пропорційна та інтегральна частина ПІ-регулятора швидкості:

$$k_{рс\Pi} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_3 k_{ос} T_{ос}} = \frac{0,1 \cdot 12,04 \cdot 0,043}{0,154 \cdot 0,578 \cdot 0,02} = 15,81 \quad (4.21)$$

$$k_{рсИ} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_3 k_{ос} 2T_{ос}^2} = \frac{0,1 \cdot 12,04 \cdot 0,043}{0,154 \cdot 0,578 \cdot 2 \cdot 0,02^2} = 395,4 \quad (4.22)$$

де $T_м = 0,1$ с – електромеханічна стала часу системи ТП-Д;

$$k_{ос} = \frac{U_{зс.max}}{\omega_{max}} = \frac{10}{17,78} = 0,578 \quad \text{Вс} \quad - \quad \text{коефіцієнт передачі ланцюгу}$$

зворотнього зв'язку по швидкості;

$$U_{зс.max} = 10 \text{ В} \quad - \quad \text{максимальний сигнал завдання на швидкість};$$

$$\omega_{max} = \omega_н = 17,78 \text{ 1/с} \quad - \quad \text{максимальна швидкість електродвигуна};$$

$T_{oc} = 2T_{от} = 2 \cdot 0,01 = 0,02$ с – стала часу інтегрування контуру швидкості при налаштуванні на симетричний оптимум.

Для зниження перерегулювання по швидкості під час налаштування контуру на симетричний оптимум на його вході, встановлюємо фільтр з передаточною функцією:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} \quad (3.24)$$

де $T_{\phi} = 8T_{\mu} = 2T_{oc} = 2 \cdot 0,02 = 0,04$ с – стала часу фільтра.

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.8. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора швидкості при налагодженні електроприводу необхідно встановити в параметрах P550.F, P225.F і P226.F відповідно.

У якості датчика швидкості обираємо імпульсний датчик HOG 10 DN концерну Huebner Berlin – 1024 імпульсу/оберт.

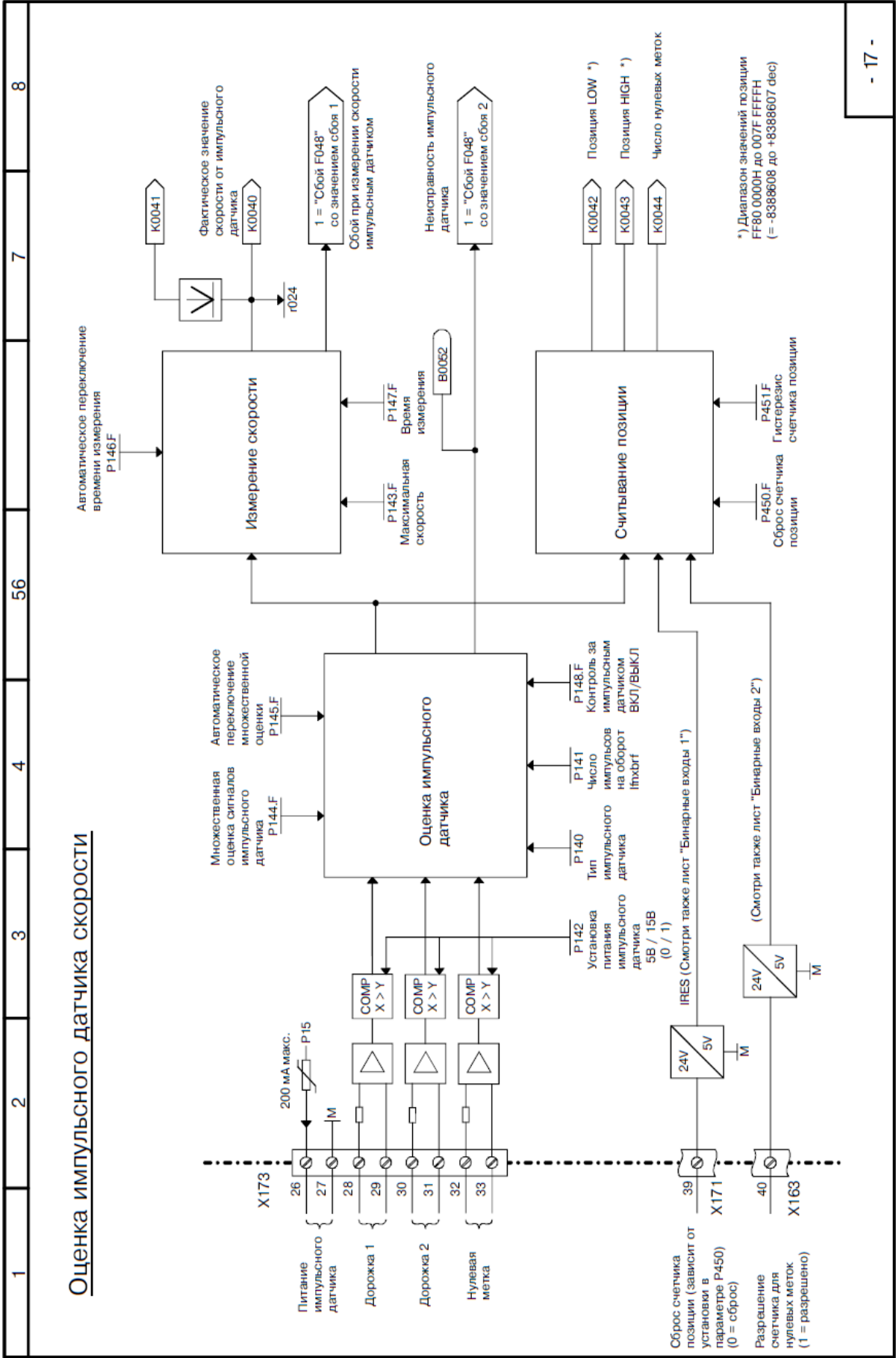


Рисунок 3.9 – Функціональна схема регулятора швидкості в перетворювачі SIMOREG DC Master

3.10 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону і гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки струмообмеження ($I_{\max} = 2,5I_H$) необхідно на вході регулятора швидкості встановити задатчик інтенсивності швидкості (ЗІШ). Він перетворює ступінчастий сигнал завдання швидкості в сигнал, що лінійно змінюється в часі. Стале значення напруги виходу ЗІШ, яке подається на вхід регулятора швидкості, так само вхідного сигналу. Структурна схема задатчика інтенсивності приведена на рисунку 3.10.

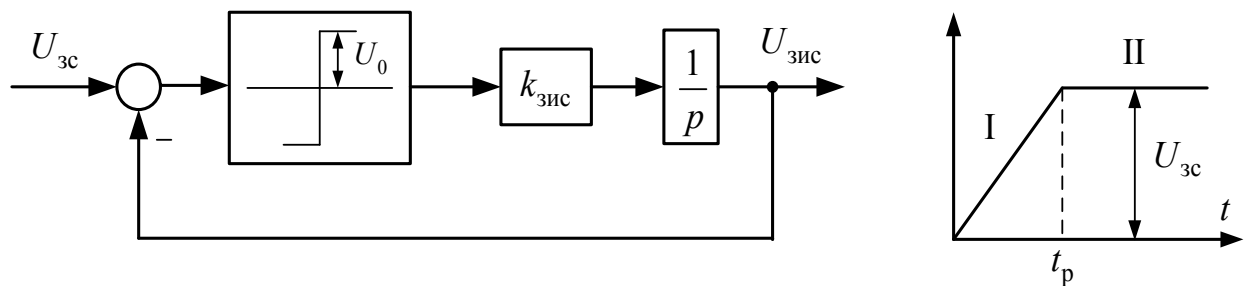


Рисунок 3.10 – Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідну напругу задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{I}} = U_0 k_{\text{зис}} t_p = \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{м}} c \Phi_{\text{н}}} \frac{I_{\text{дин}} U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{з.уст}}} t_p \quad (3.25)$$

II ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{II}} = U_{\text{зс}} \quad (5.6)$$

де $I_{\text{дин}} = I_H = 93$ А – заданий динамічний струм;

$\omega_{\text{з.уст}} = 10,18$ 1/с – стала швидкість (швидкість транспортування злитка),

відповідна $U_{\text{зс}}$;

$U_{\text{зс}} = 10$ В – напруга на вході ЗІШ (напруга, що задається);

$U_0 = 10$ В – полиця релейного елемента.

Визначимо час розгону двигуна до сталої швидкості:

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_n}{R_\Sigma} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} = \frac{0,1 \cdot 12,04}{0,154} \cdot \frac{10,18}{93} = 0,65 \text{ с} \quad (5.7)$$

Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p} = \frac{10}{0,65} = 15,38 \text{ В/с.} \quad (3.28)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.11.

На рисунку 3.12 наведена структурна схема швидкісний системи підпорядкованого керування електроприводу.

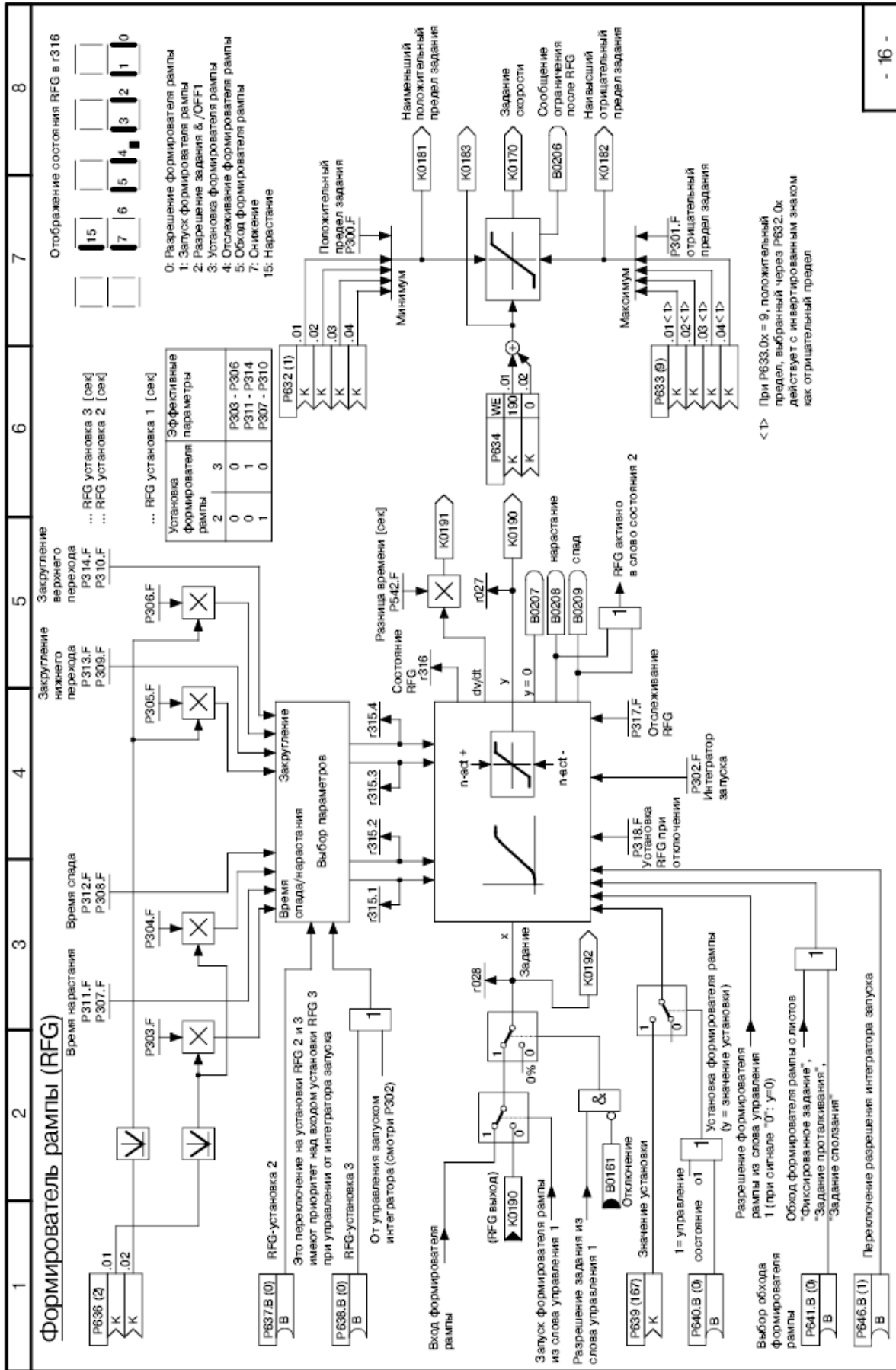


Рисунок 3.11 – Функциональная схема датчика интенсивности в перетворювачі SIMOREG DC Master

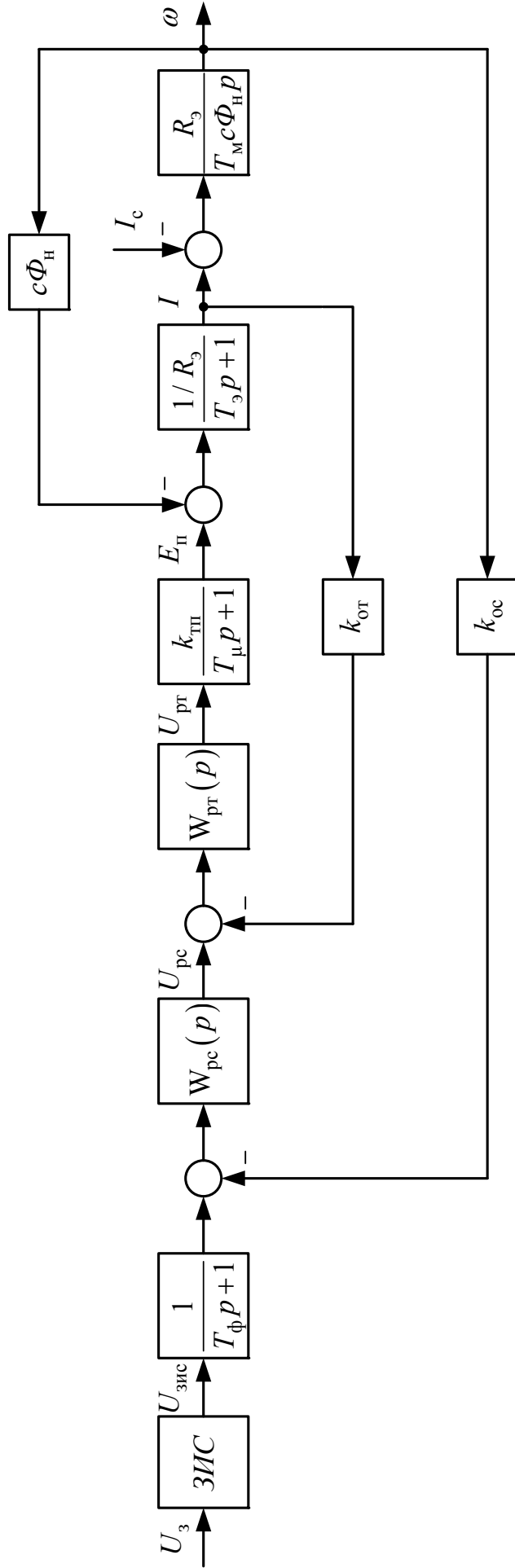


Рисунок 3.12 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

3.11 Моделювання електроприводу рольгангу з лінійною системою керування в Matlab/Simulink

Цифрове моделювання розрахованої системи здійснюється в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводом рольгангу, що має в своєму складі ПІ-регулятор струму, ПІ-регулятор швидкості і задатчик інтенсивності швидкості наведена на рис. 3.13. Внутрішні структури підсистем (Subsystem) типових вузлів схеми наведені на рис. 3.14 – 3.16.

При реалізації регуляторів струму і швидкості в цифровій моделі враховувалося їх насичення. Наприклад, при побудові моделі ПІ-регулятора недостатньо обмежити тільки його вихідну напругу за допомогою блоку Saturation, оскільки внутрішня інтегральна складова блоку при цьому може накопичувати в перехідному процесі значення, що перевершують передбачуваний поріг насичення. З цієї причини використання стандартного блоку PID-Controller, представленого в бібліотеці Simulink Extras/Additional Lincer неприпустимо. Моделі регуляторів коректно враховують поріг насичення регулятора В (див. рис. 3.16).

Графіки перехідних процесів (швидкість обертання двигуна; струм якірного ланцюга системи; ЕРС силового перетворювача; вихідна напруга регулятора положення; вихідна напруга регулятора швидкості; вихідна напруга регулятора струму; вихідна напруга задатчика інтенсивності швидкості) отримані як за номінальними параметрами об'єкта керування, так і при їх варіації наведено на рис. 3.17 – 3.29.

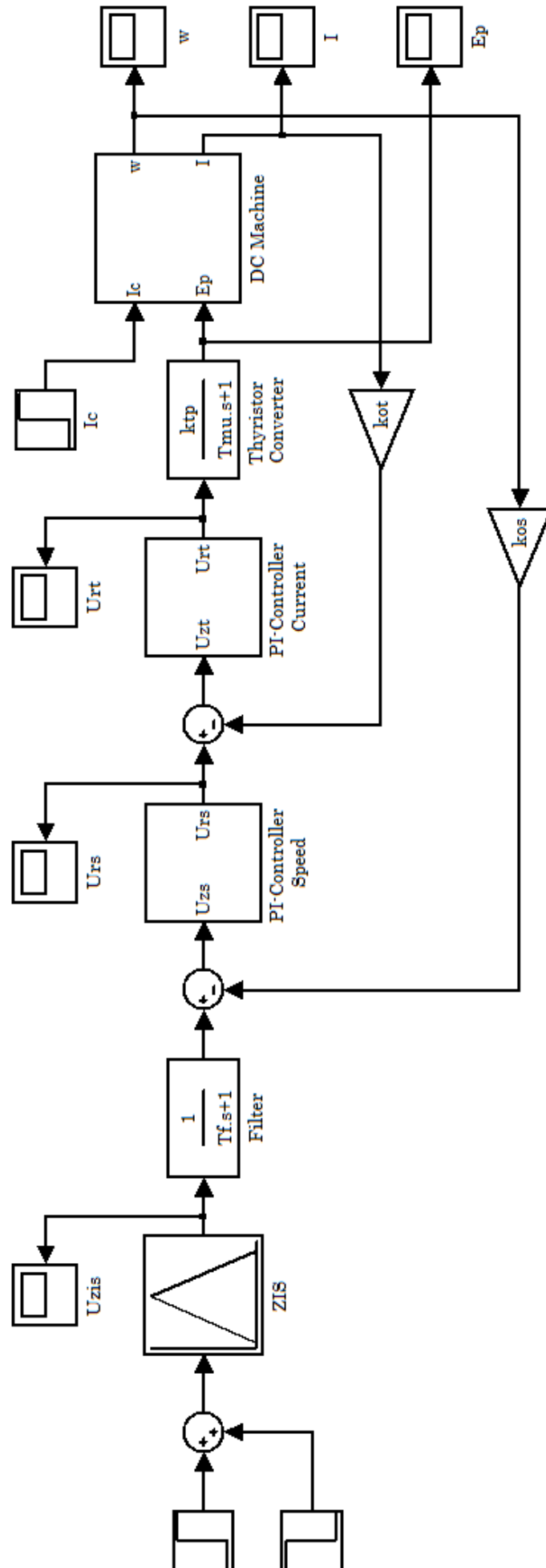


Рисунок 3.13 – Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування

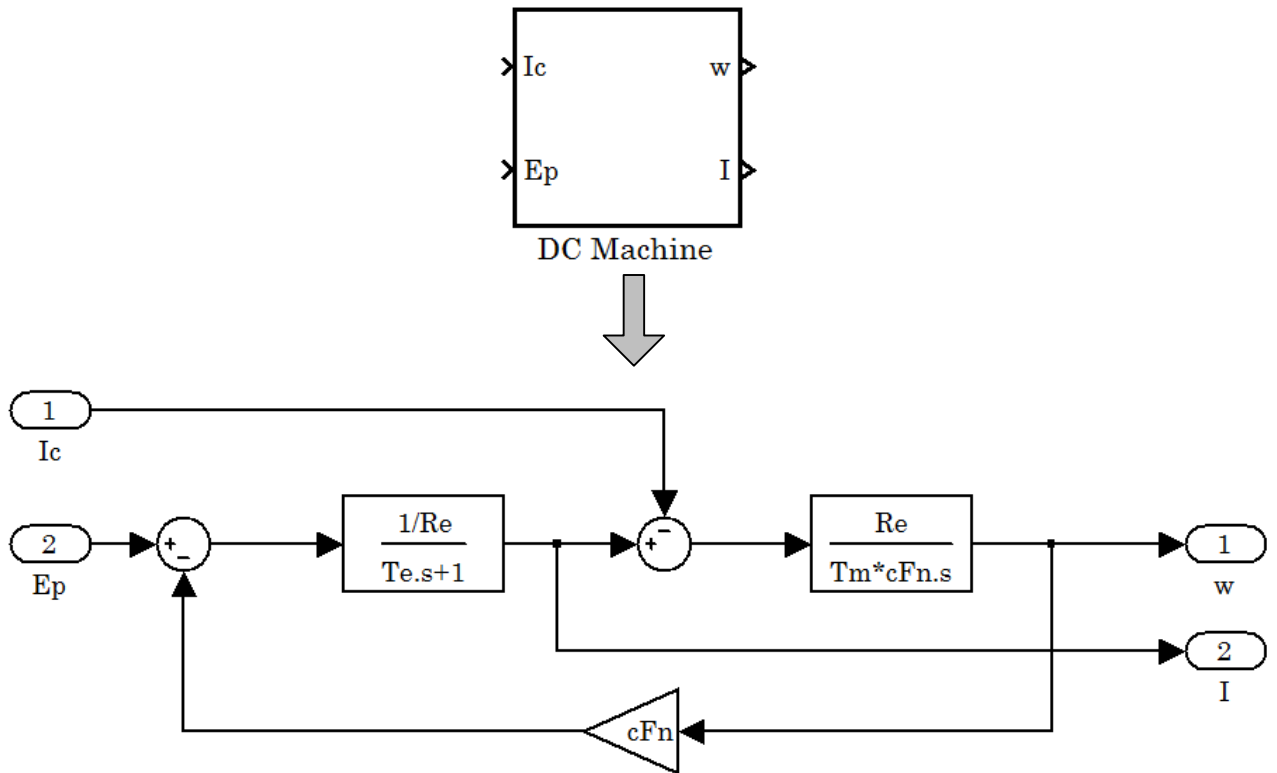


Рисунок 3.14 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

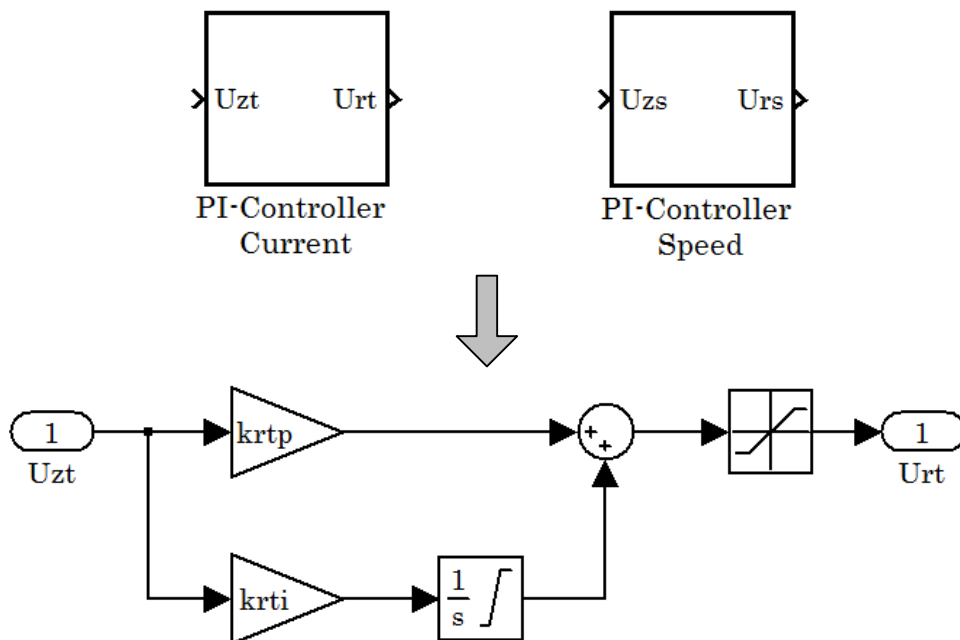


Рисунок 3.15 – Підсистема «ПІ-регулятор» струму (PI-Controller Current) і швидкості (PI-Controller Speed), що враховує поріг насичення регулятора

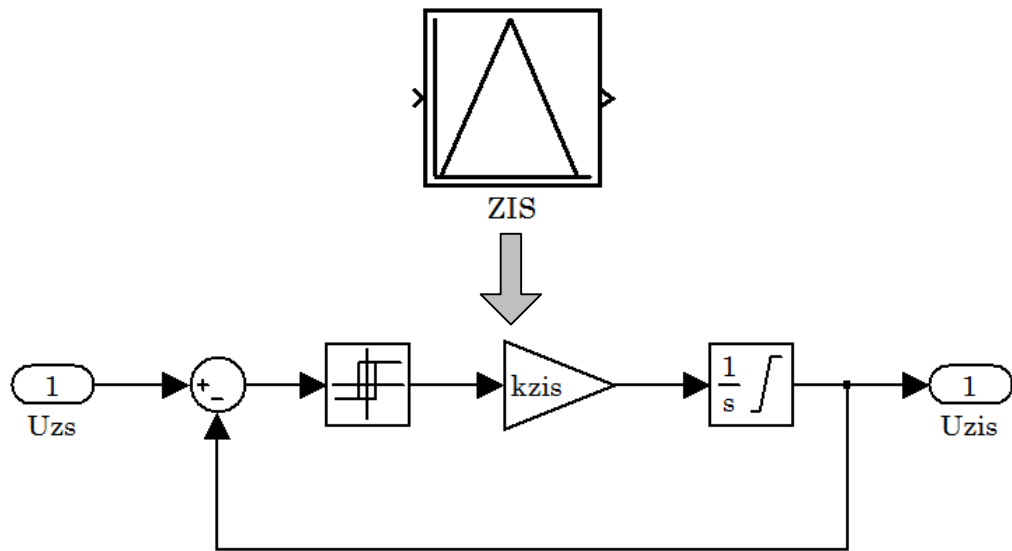


Рисунок 3.16 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), що реалізує раціональну динаміку

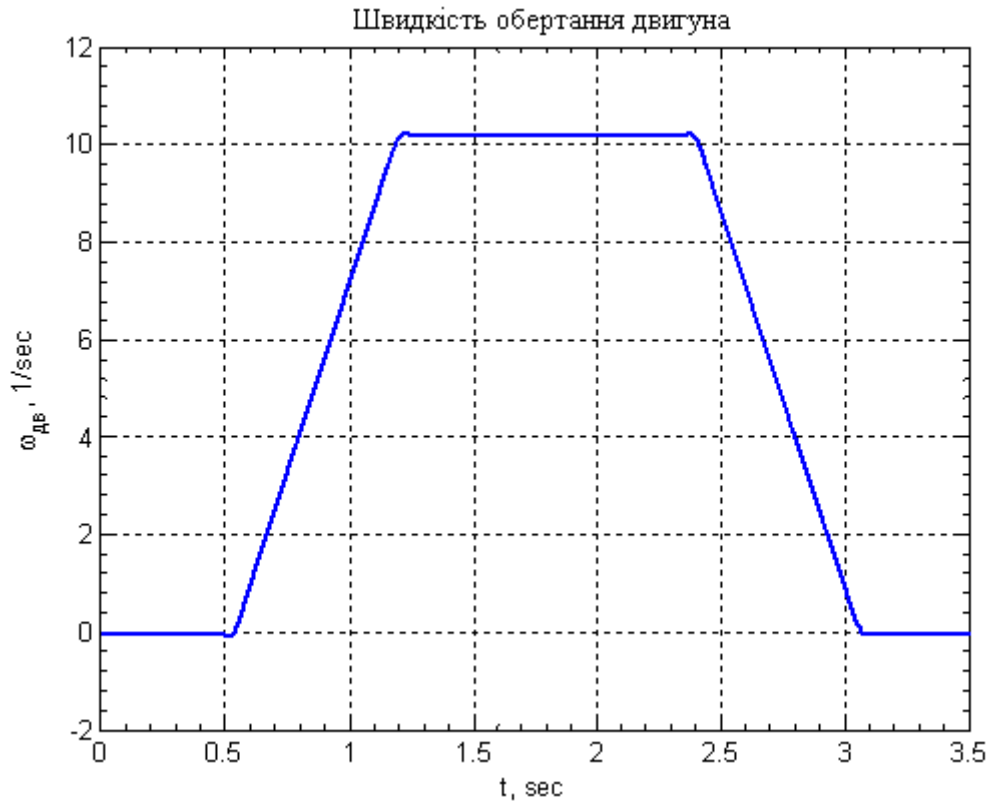


Рисунок 3.17 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ($I_c = 0,3I_H$)

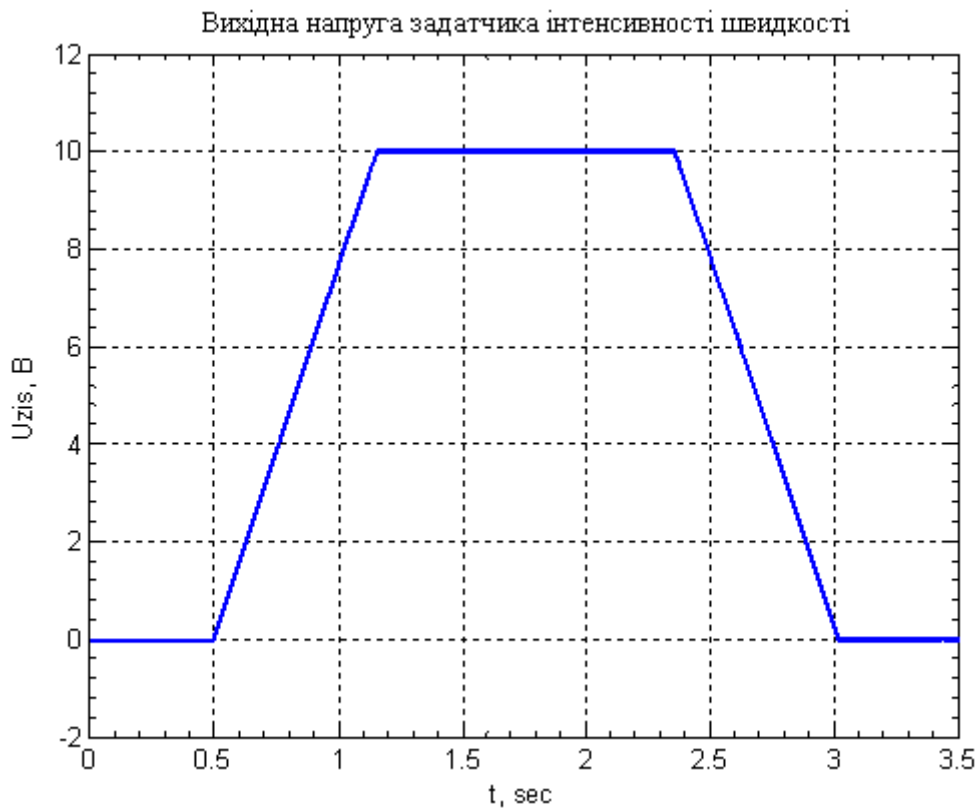


Рисунок 3.18 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості ($I_c = 0,3I_H$)

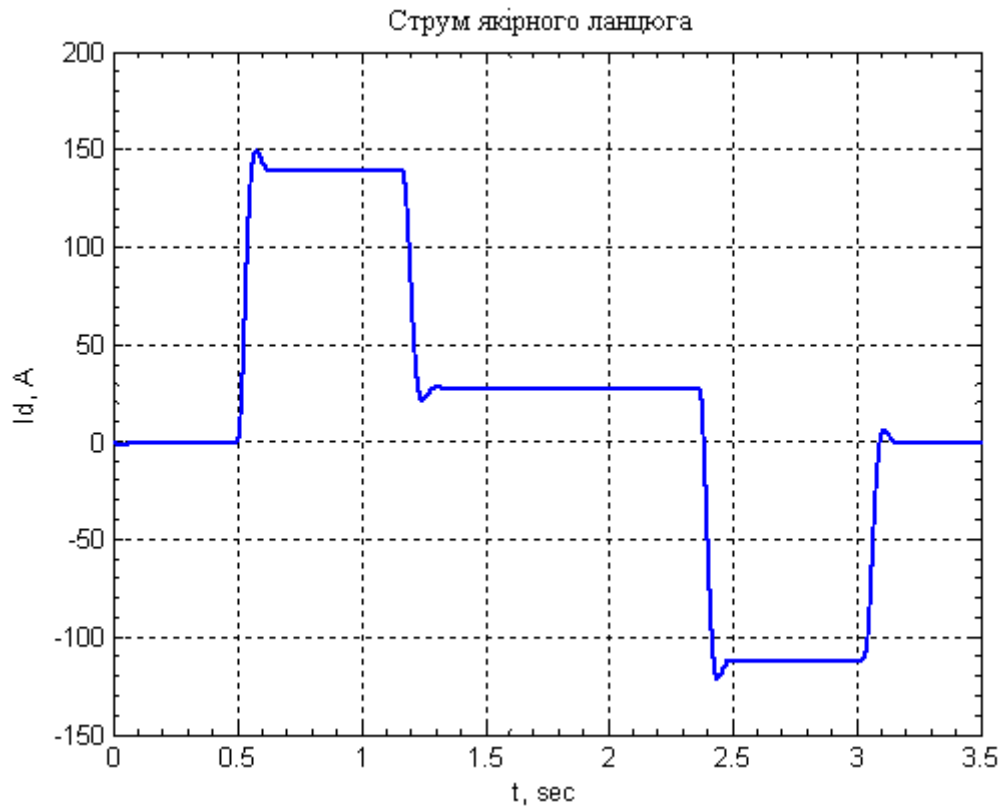


Рисунок 3.18 – Графік перехідного процесу струму якоря ($I_c = 0,3I_H$)

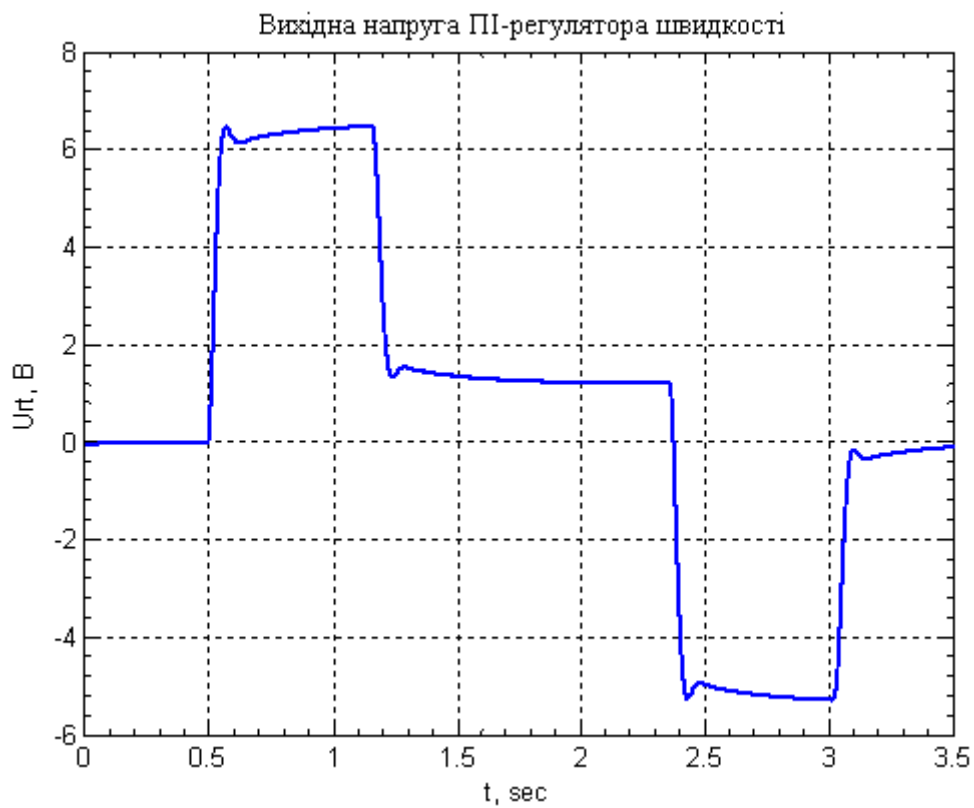


Рисунок 3.19 – Графік перехідного процесу напруги
ПІ-регулятора швидкості ($I_c = 0,3I_H$)

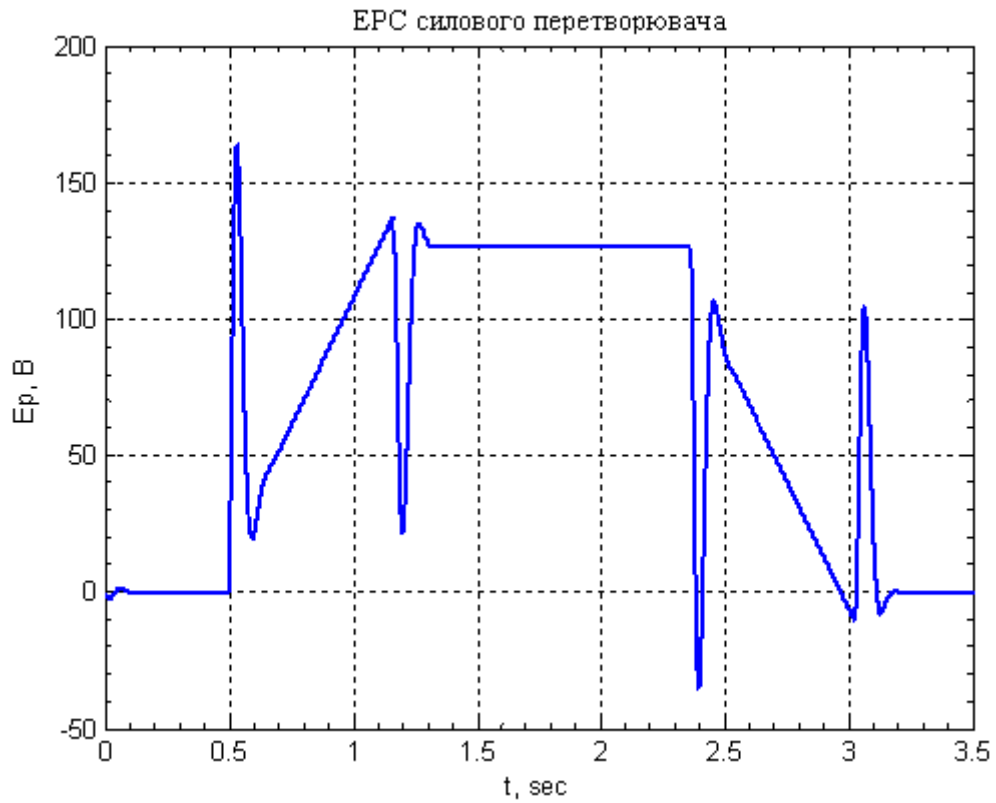


Рисунок 3.20 – Графік переходного процесу ЕРС тиристорного перетворювача ($I_c = 0,3I_H$)

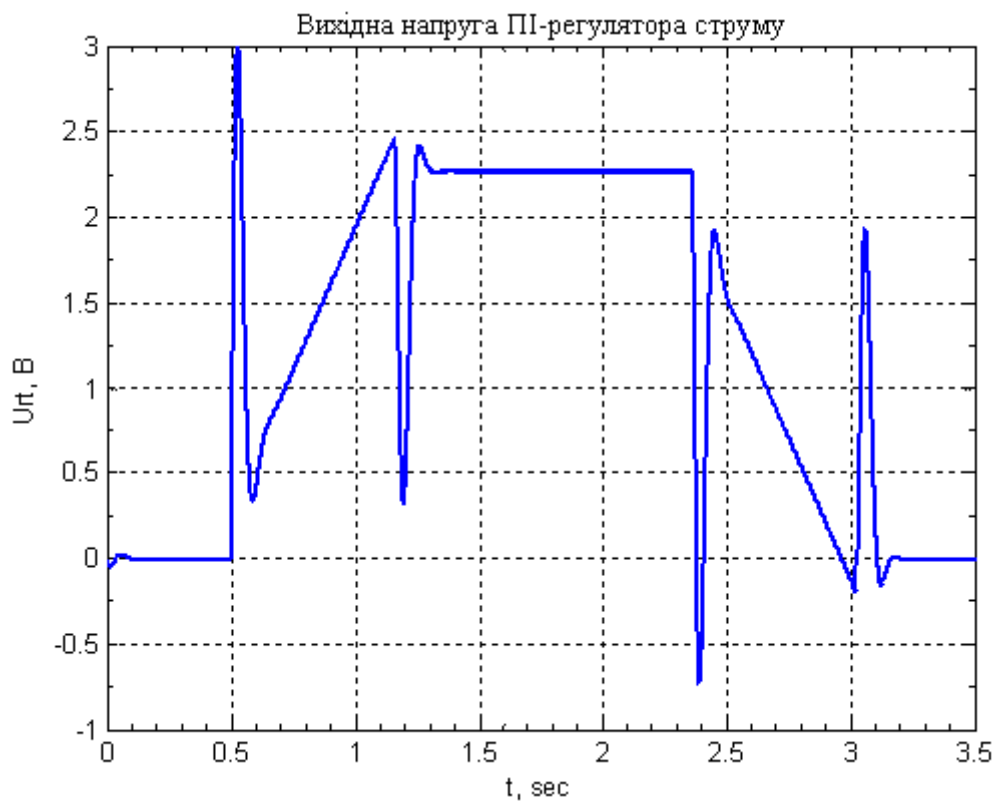


Рисунок 3.21 – Графік переходного процесу напруги ПІ-регулятора струму ($I_c = 0,3I_H$)

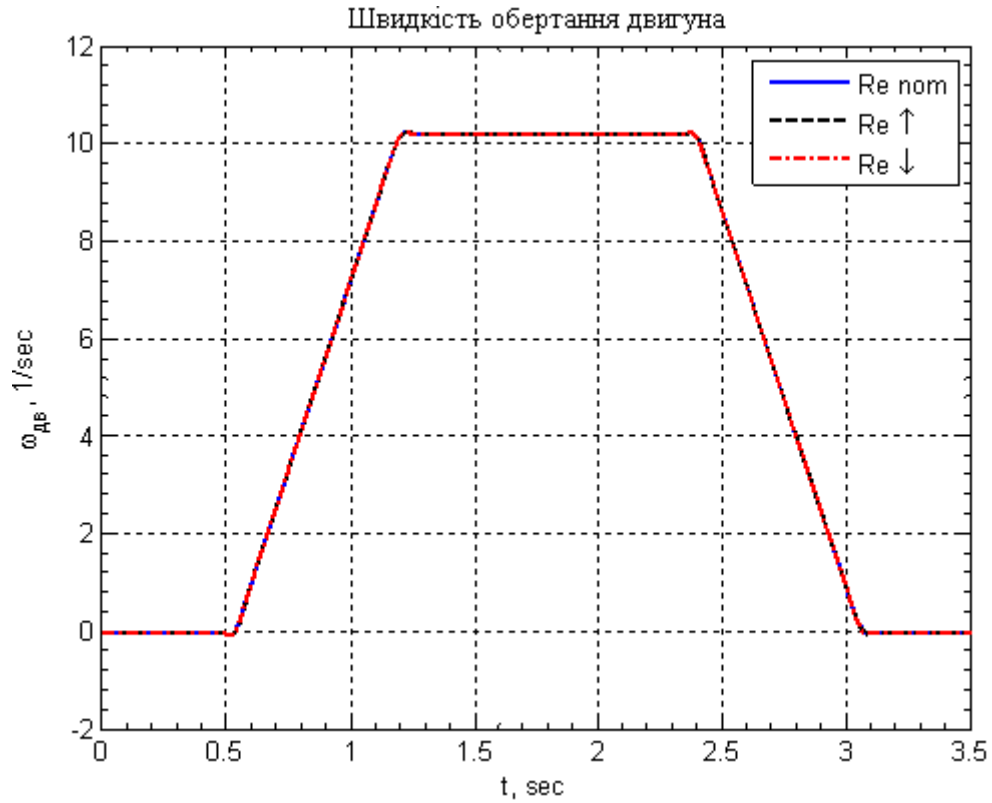


Рисунок 3.22 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні R_s у 2 рази

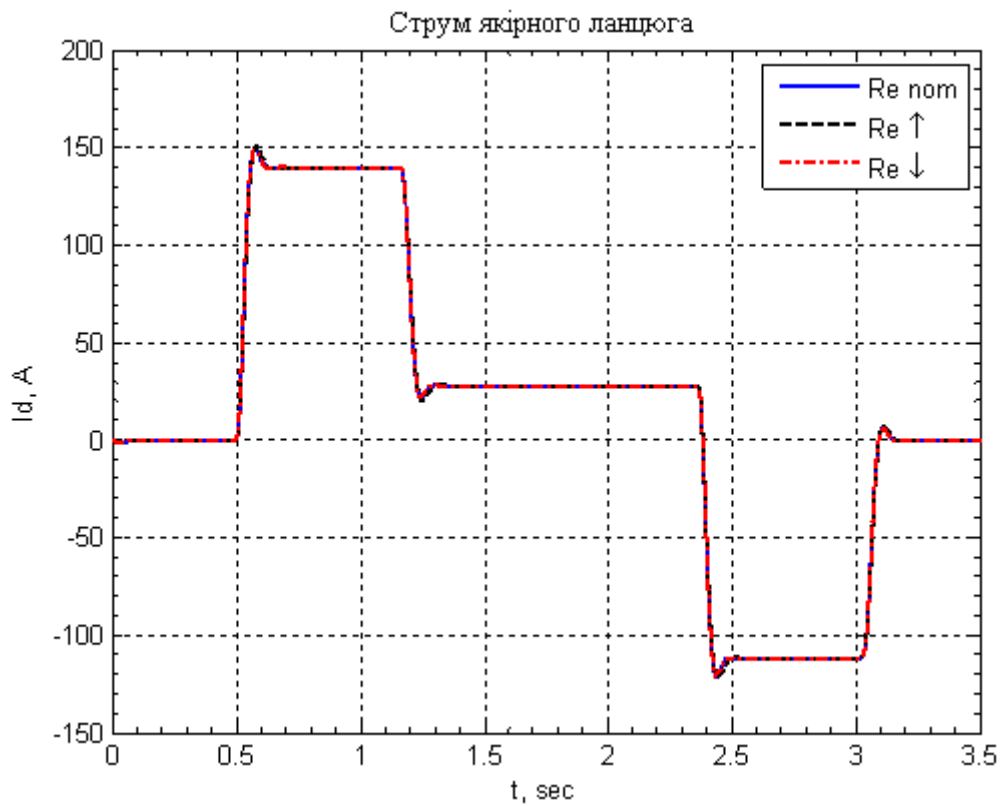


Рисунок 3.23 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні R_s у 2 рази

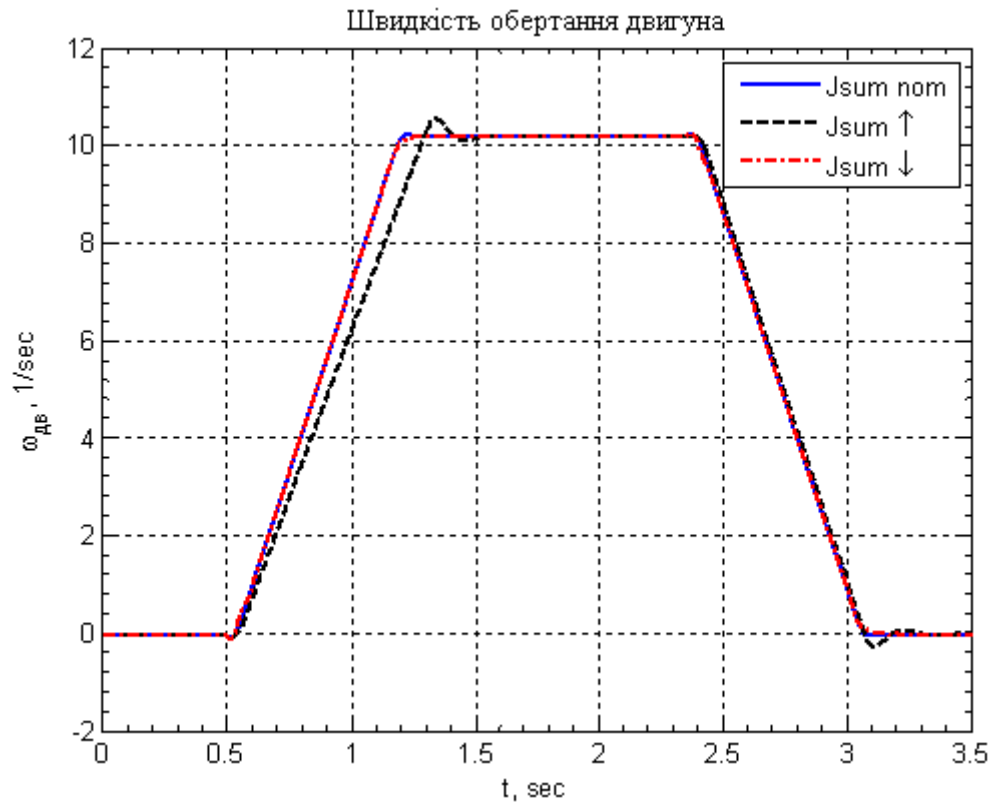


Рисунок 3.24 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні J'_{Σ} у 2 рази

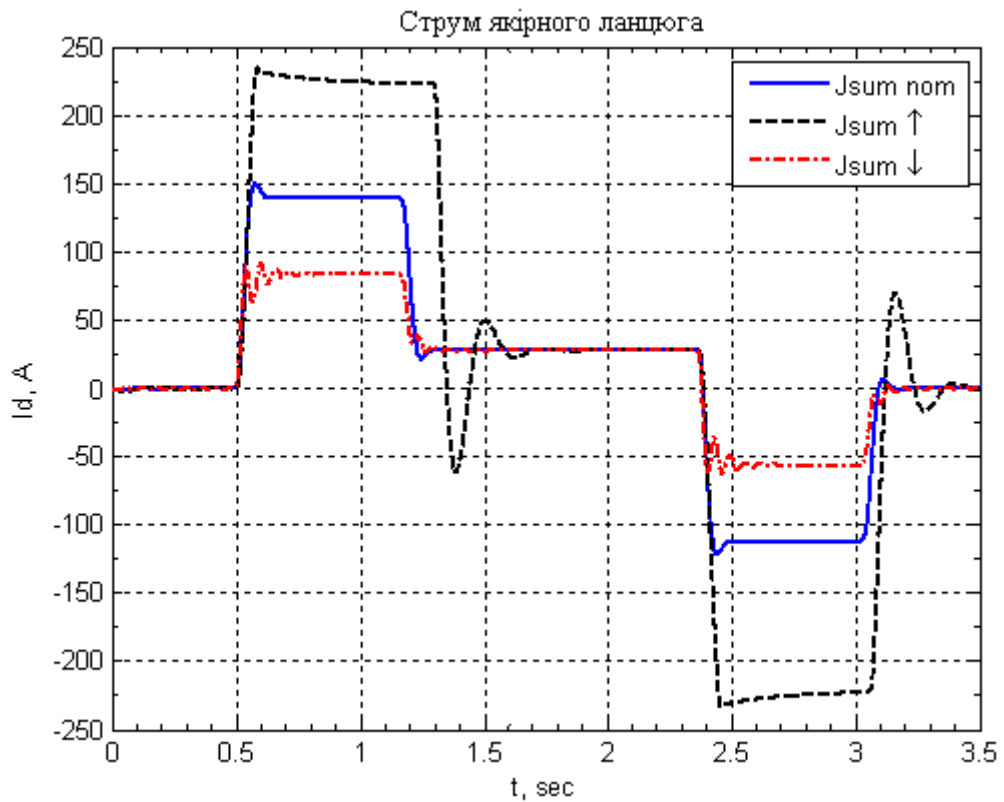


Рисунок 3.25 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні J'_{Σ} у 2 рази

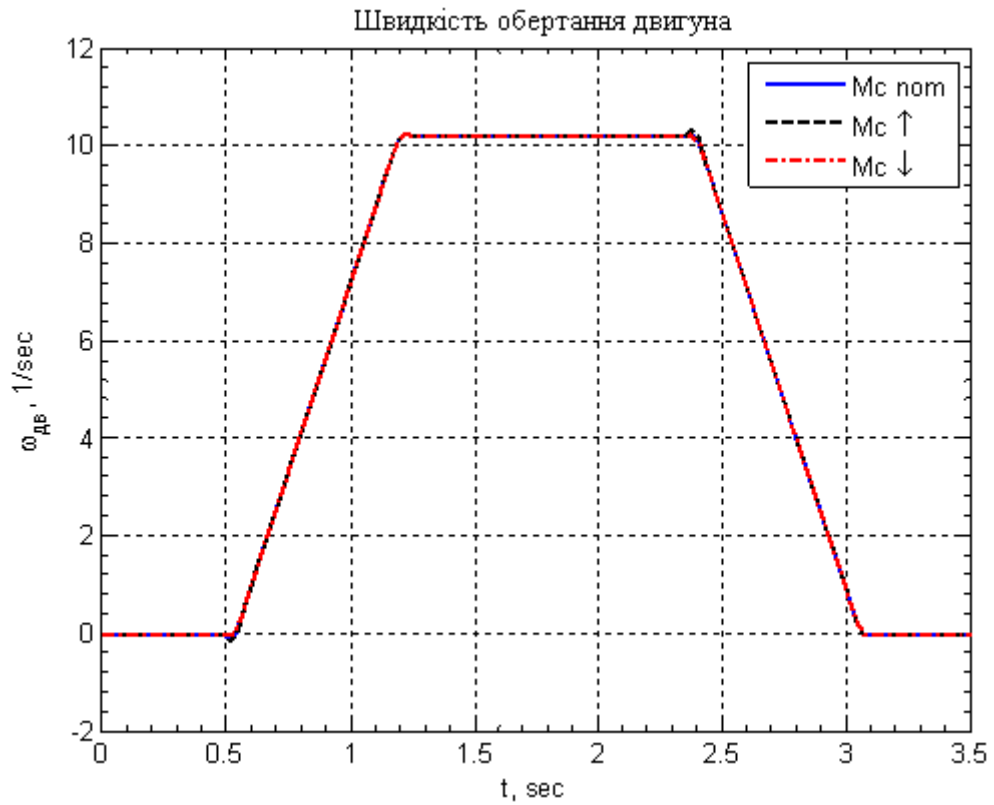


Рисунок 5.6 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні M_c у 2 рази

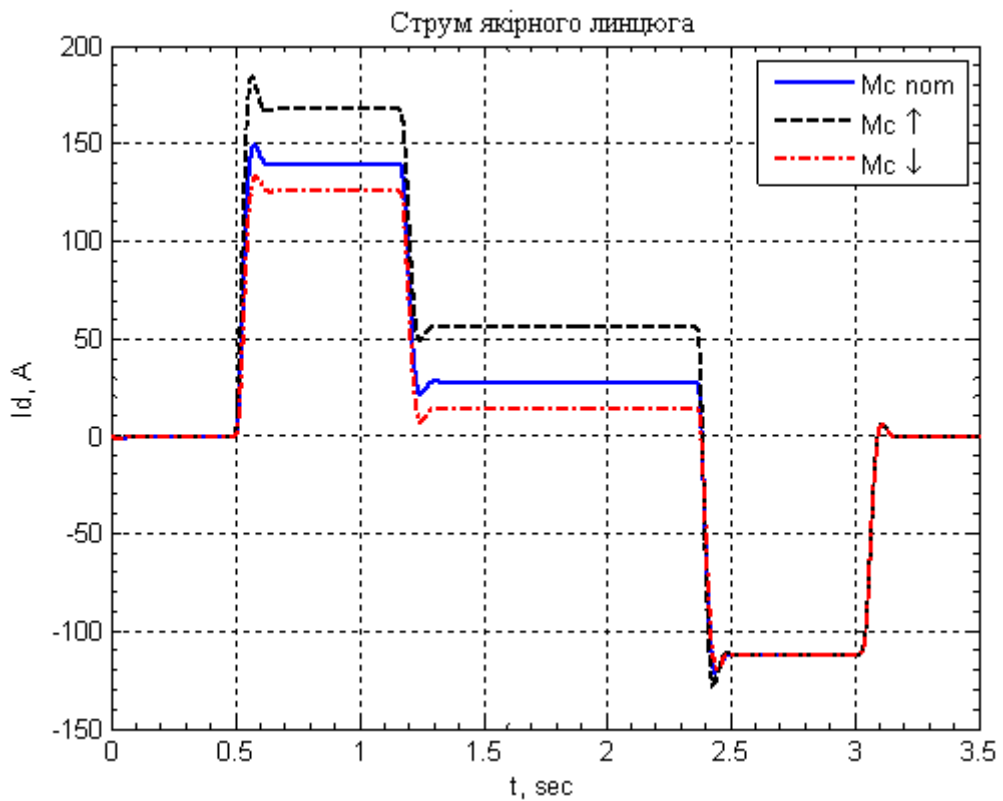


Рисунок 5.7 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні M_c у 2 рази

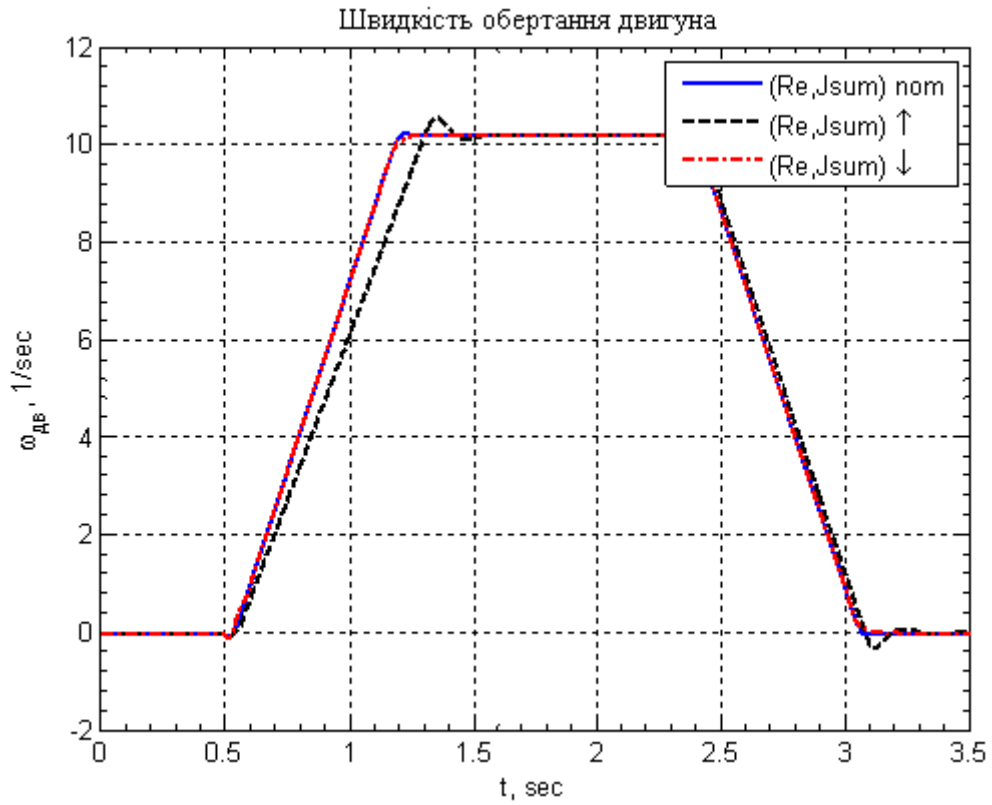


Рисунок 3.28 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при одночасній зміні R_s і J'_Σ у 2 рази

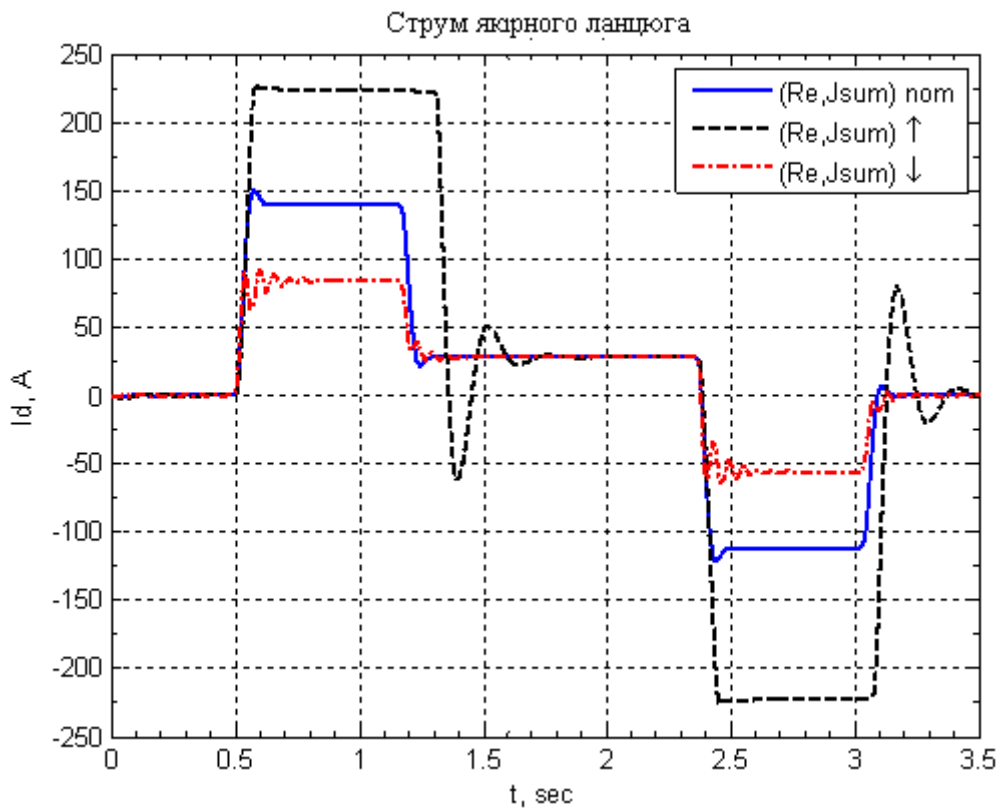


Рисунок 3.29 – Графік перехідного процесу струму якоря при одночасній зміні R_s і J'_Σ у 2 рази

4 СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ 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.

4.1 Синтез релейного 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:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_3 \\ (T_3 p + 1) \cdot I = (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) / R_3 \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{mn} \cdot U_y \end{cases} \quad (4.1)$$

Запишемо систему (4.1) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_3}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_3} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_3 \cdot T_3} \cdot \omega + \frac{1}{R_3 \cdot T_3} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (4.2)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{i}{I_m}; x_2 = \frac{\omega}{\omega_m}; x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (4.3)$$

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 (4.3) система (4.2) набуде вигляду

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_3 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{де } b_{11} = -\frac{1}{T_3}, \quad b_{12} = -\frac{C\Phi_n \cdot \omega_m}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m}, \quad b_{13} = \frac{E_{nm}}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m},$$

$$b_{21} = \frac{R_3 \cdot I_m}{T_m \cdot C \Phi_n \cdot \omega_m}, \quad b_{33} = -\frac{1}{T_\mu}, \quad n_3 = \frac{k_{mn} \cdot U_{ym}}{T_\mu \cdot E_{nm}}.$$

Для зменшення трудомісткості виконання курсового проекту розрахунок коефіцієнтів системи (4.4) 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:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{11} \cdot \eta_1 + b_{12} \cdot \eta_2 + b_{13} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (4.5)$$

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

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

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:

$$C \cdot A = -K \quad (4.6)$$

де C – матриця Барбашина

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

$$C_{ij,kl} = \begin{cases} 0, \text{ при } i \neq k \text{ и } j \neq l; \\ b_{jl}, \text{ при } i = k \text{ и } j \neq l; \\ b_{ii} + b_{jj}, \text{ при } i = k \text{ и } j = l; \\ b_{ii}, \text{ при } i = j = k = l \end{cases} \quad (4.7)$$

A – вектор-стовпець коефіцієнтів Ляпунова;

K – вектор-стовпець обмежуючих коефіцієнтів.

Для нашого випадку рівняння (4.7) набуде вигляду:

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

Для даної системи:

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

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

$$R_{12} = \frac{k_{mz} \omega_{макс}}{k |A_{23}|} = \frac{1,91 \cdot 52,36}{1,5 \cdot 0,003091} = 17051,50 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = \frac{k_{dm} k_{ш} I_{макс}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,000075 \cdot 1988}{1,5 \cdot 0,025} = 12720 \text{ Ом}$$

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

де $k=1.5$ – коефіцієнт пропорційності.

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

4.2 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат

Запишемо систему рівнянь, що описує контур швидкості:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_3 \\ (T_3 p + 1) \cdot I = \frac{1}{R_3} (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{mn} \cdot U_y \end{cases} \quad (4.17)$$

Запишемо систему (4.17) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_3}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_3} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_3 \cdot T_3} \cdot \omega + \frac{1}{R_3 \cdot T_3} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (4.18)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{\omega}{\omega_m}; x_2 = \frac{I}{I_m}; x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (4.19)$$

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 (4.19) система (4.18) набуде вигляду:

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{12} \cdot x_2 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 + b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\text{де } b_{12} = \frac{R_9 \cdot I_m}{T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega_m}, \quad b_{22} = -\frac{1}{T_9}, \quad b_{21} = -\frac{C\Phi_n \cdot \omega_m}{R_9 \cdot T_9 \cdot I_m}, \quad b_{23} = \frac{E_{nm}}{R_9 \cdot T_9 \cdot I_m},$$

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

Розрахунок коефіцієнтів системи (4.20) 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:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{12} \cdot \eta_2 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 + b_{22} \cdot \eta_2 + b_{23} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (4.21)$$

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:

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

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:

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

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:

$$u = -\text{sign}(A_{31} \cdot \eta_1 + A_{32} \cdot \eta_2 + A_{33} \cdot \eta_3) \quad (4.22)$$

Відповідно до (4.22) структурна схема контуру швидкості набуде вигляду представлений на рис. 4.3.

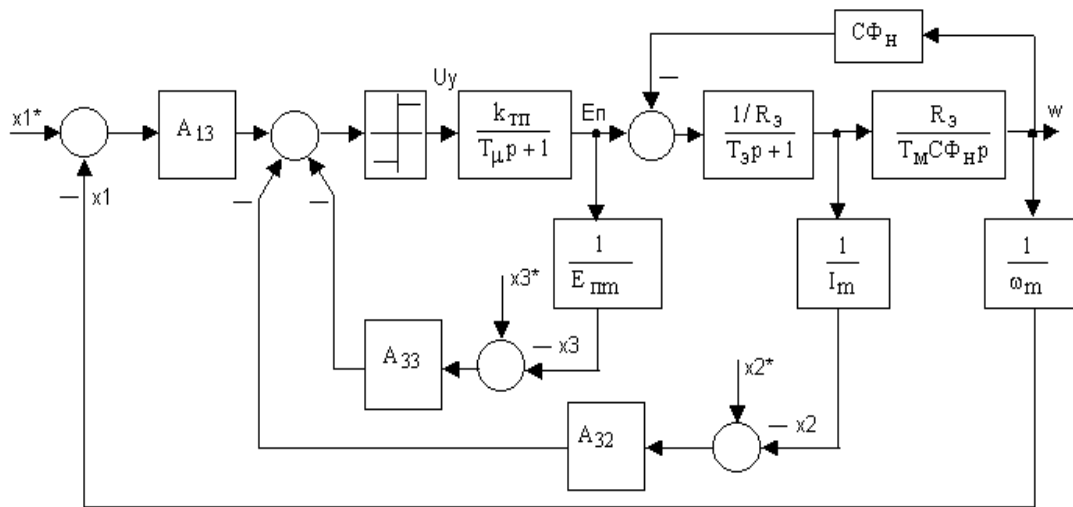


Рисунок 4.3 – Структурна схема контуру швидкості

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

$$R_{12} = \frac{k_{m2} \omega_{\text{макс}}}{k |A_{23}|} = \frac{1,91 \cdot 52,36}{1,5 \cdot 0,006076} = 10972 \text{ Ом} \quad (4.23)$$

$$R_{13} = \frac{k_{\text{дм}} k_{\text{ш}} I_{\text{макс}}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,000075 \cdot 1988}{1,5 \cdot 0,007161} = 4442 \text{ Ом} \quad (4.24)$$

$$R_{14} = \frac{k_{\text{дн}} \cdot E_{\text{гп.макс}}}{k \cdot A_{33}} = \frac{0,0322 \cdot 310,5}{1,5 \cdot 0,001164} = 5726 \text{ Ом} \quad (4.25)$$

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 4.4 і 4.5 відповідно.

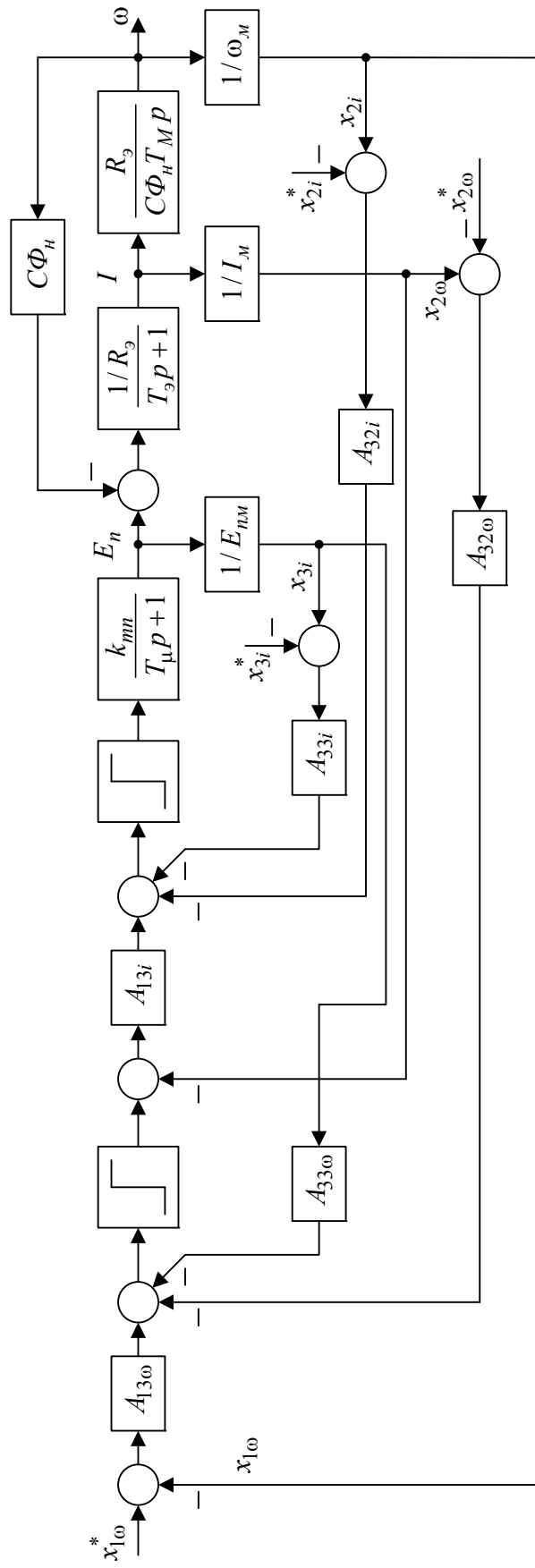


Рисунок 4.4 – Повна структурна схема релейної системи електроприводу

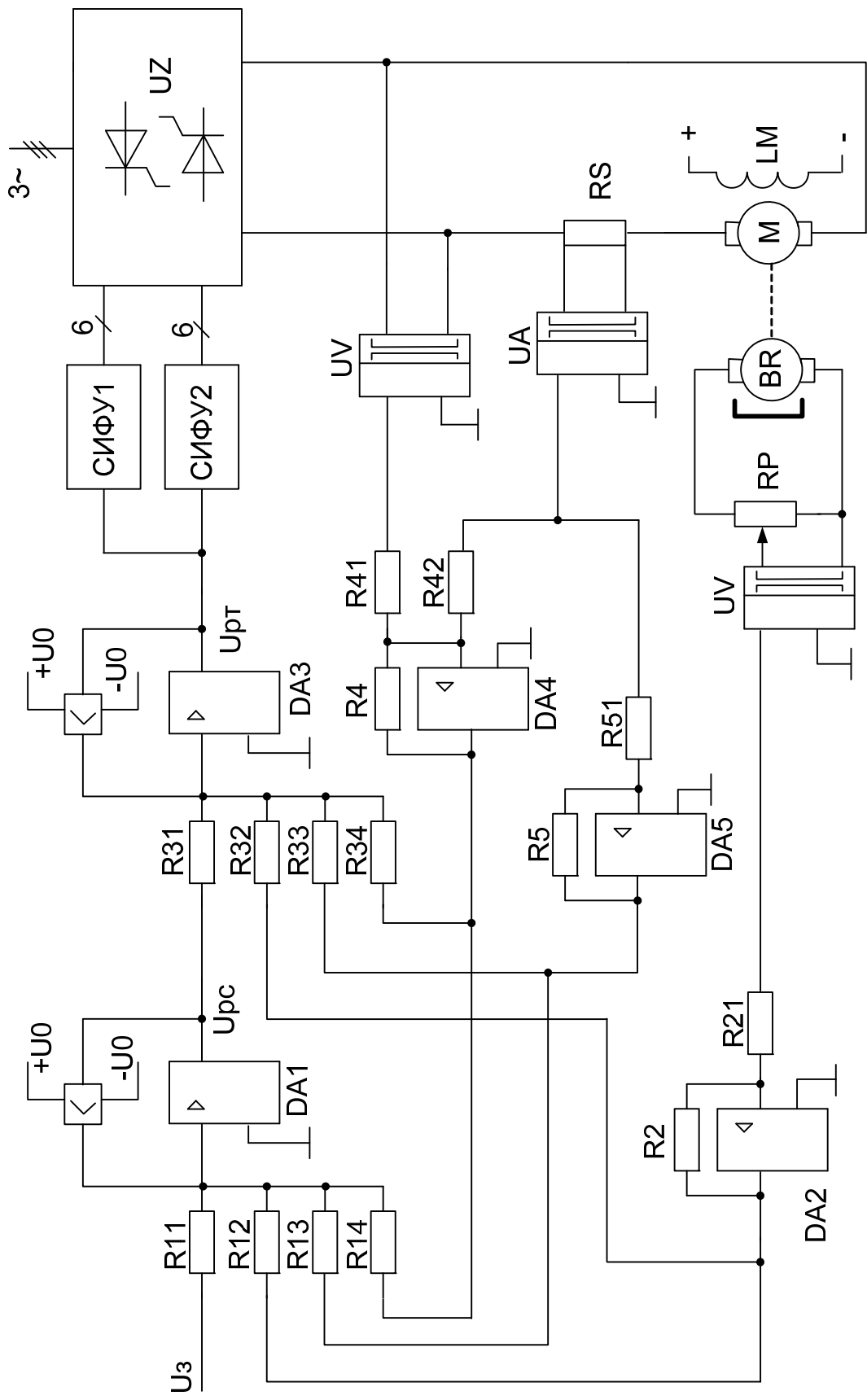


Рисунок 4.5 – Повна функціональна схема релейної системи електроприводу

4.3 Математичне моделювання електроприводу рольгангу з оптимальною системою керування в Matlab/Simulink

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 4.6. Робота релейної системи досліджувалася за такою самою програмою як і класична система підпорядкованого регулювання. З графіків перехідних процесів (рис. 4.7 – 4.10) 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.

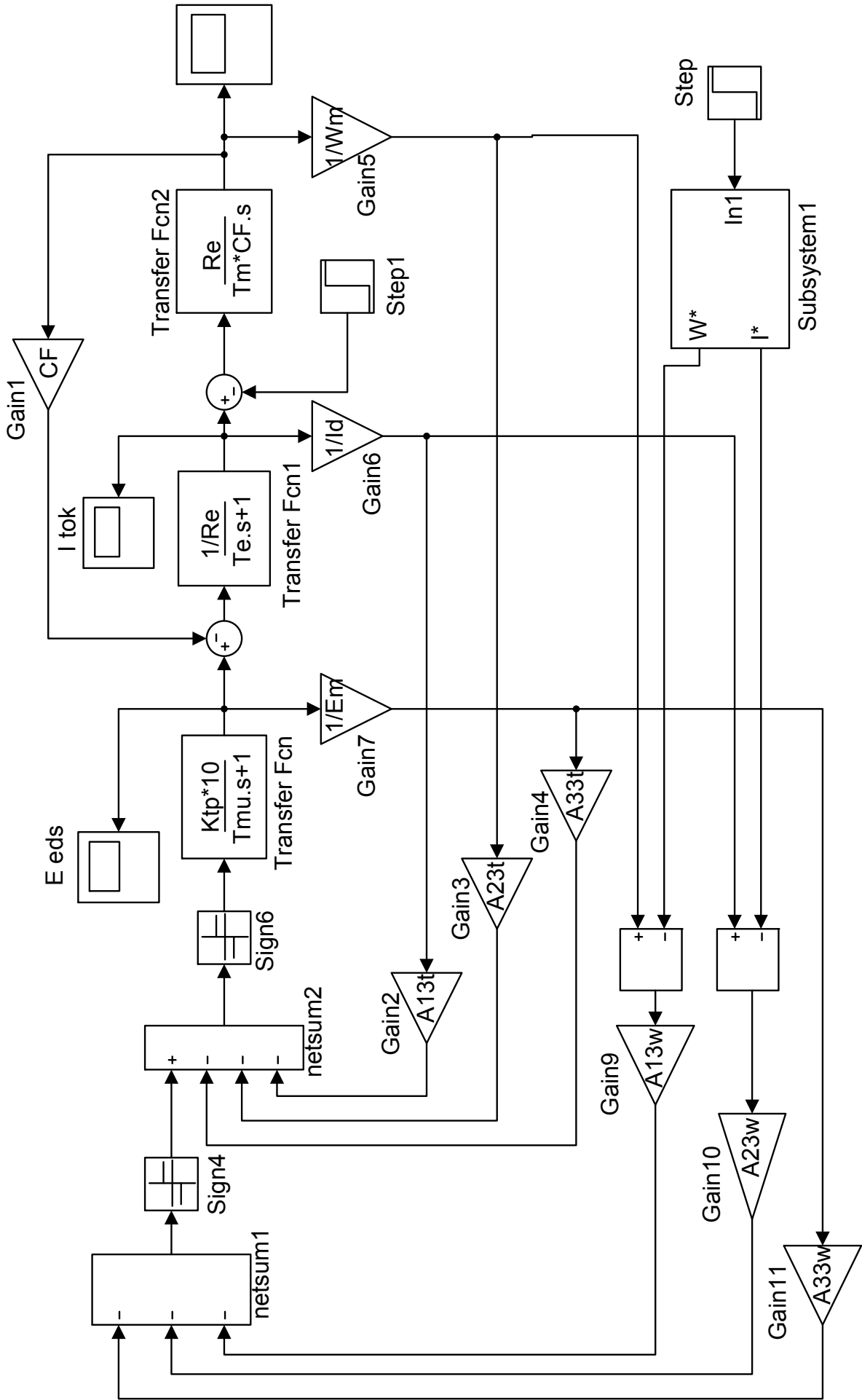


Рисунок 4.6 – Структура моделі релейної системи електроприводу

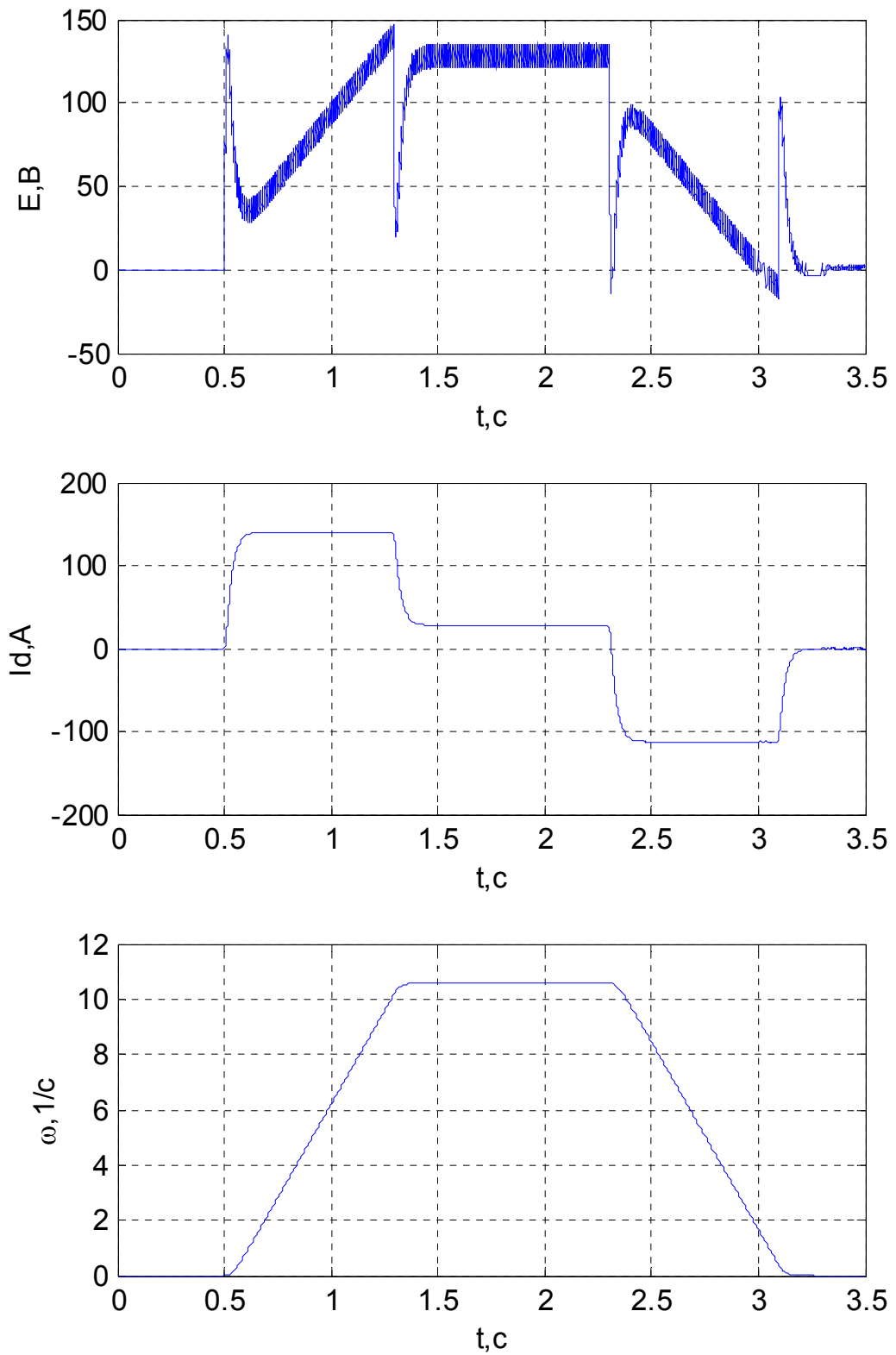


Рисунок 4.7 – Графіки процесів при відпрацюванні програми руху ($I_c = 0,3I_H$)

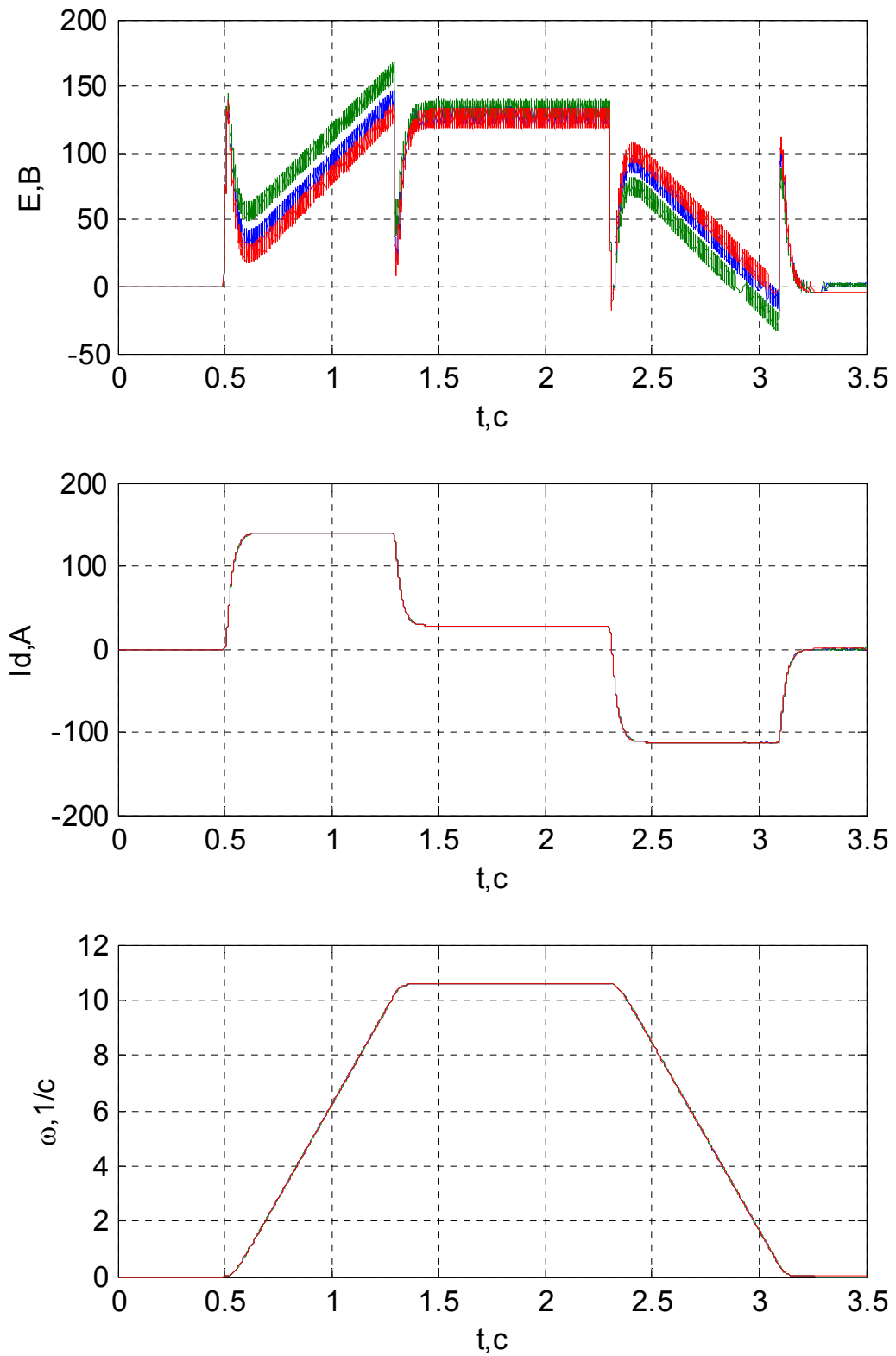


Рисунок 4.8 – Графіки відпрацювання програми руху ($I_c = 0,3I_H$) при змінні R_s у 2 рази

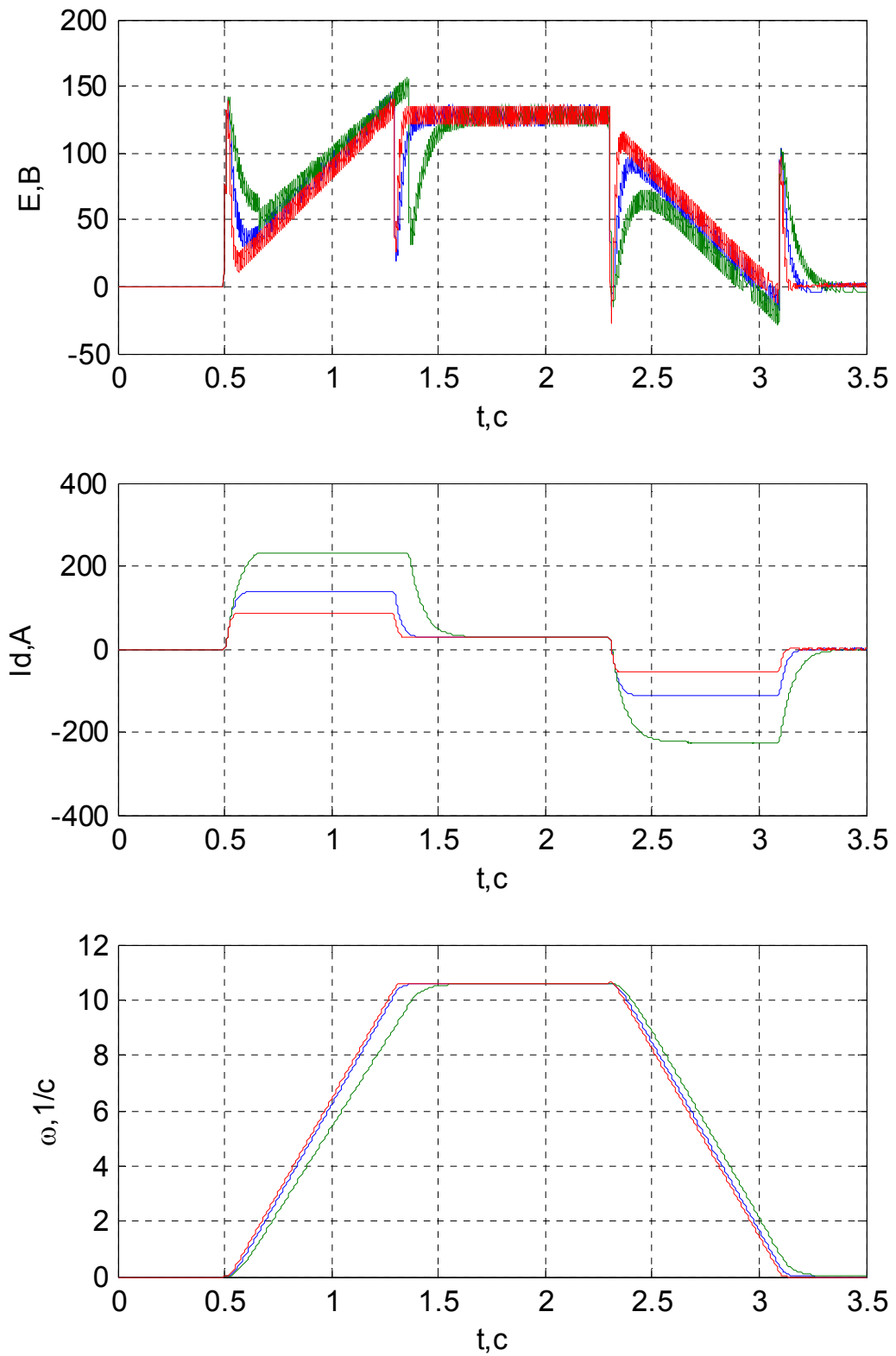


Рисунок 4.9 – Графіки відпрацювання програми руху ($I_c = 0,3I_H$) при змінній J'_Σ у 2 рази

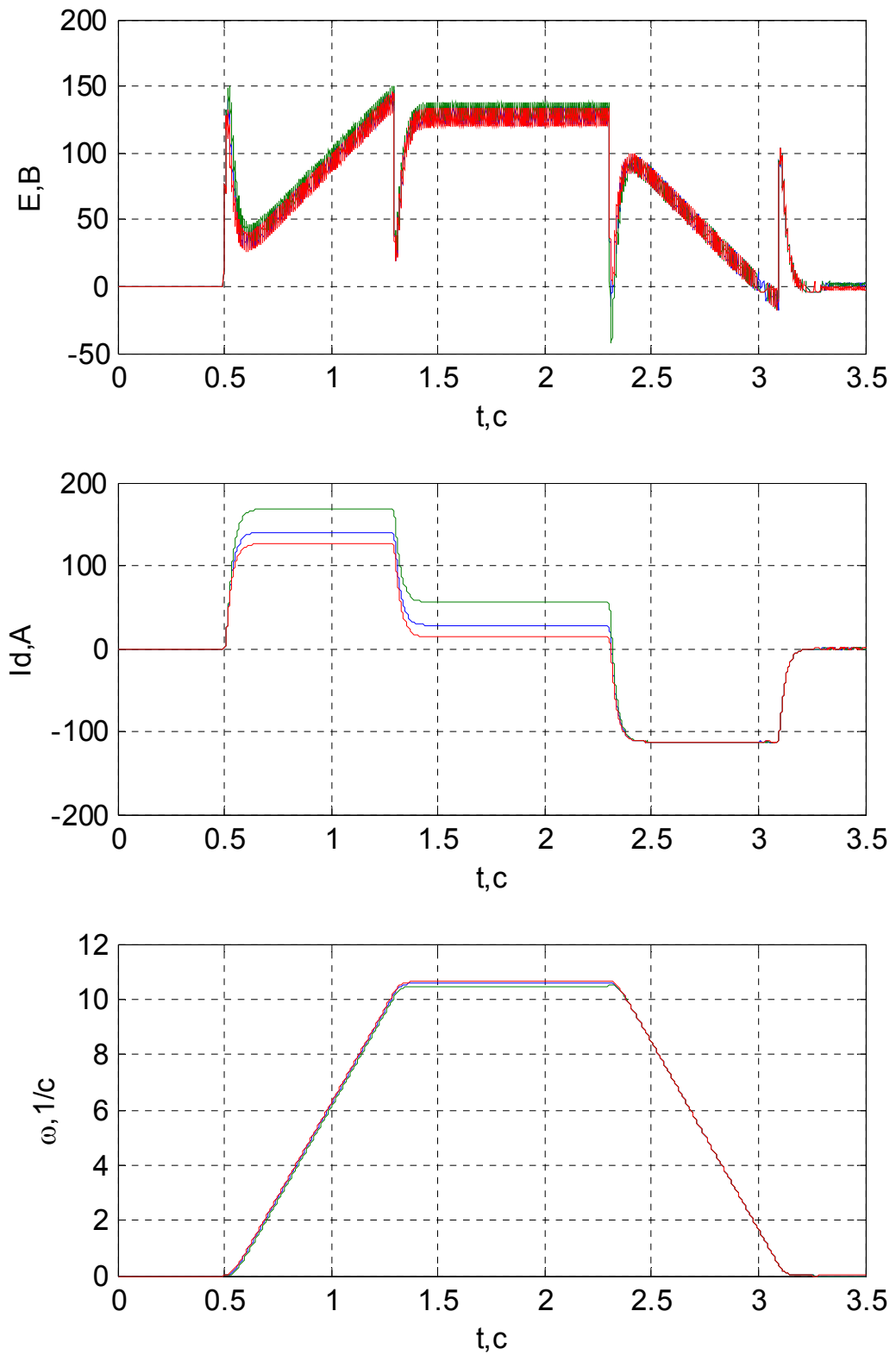


Рисунок 4.10 – Графіки відпрацювання програми руху при змінненні M_c у 2 рази

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ДІЇ ПАРАМЕТРИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

5.1 Дослідження залежності показників якості системи від параметрів системи методом найменших квадратів

Найбільш поширеним методом апроксимації є метод найменших квадратів (МНК). Метод забезпечує визначення коефіцієнтів апроксимуючої функції за яких забезпечується мінімум суми квадратів різниці між заданими значеннями функції і значеннями апроксимуючої функції з аргументами в заданих точках. Метод дозволяє визначити параметри навіть нелінійної функції [38, 39]. Переваги метода:

- 1) за вибраної функціональної залежності оптимальні значення її параметрів у межах заданого діапазону значень аргументу та його функції найбільш просто і ефективно;
- 2) вибір виду та структури моделі є прерогативою дослідника;
- 3) у класі заданих функцій МНК дозволяє отримати не лише оптимальні значення коефіцієнтів, але й оптимальний вид залежності.

Метод найменших квадратів в загальному випадку дозволяє знаходити залежності від декількох змінних. Дані для апроксимації багатовимірною функцією в загальному випадку одержуються з повного або дробового факторного експерименту.

За результатами аналізу показників якості роботи релейної системи керування одержимо аналітичну залежність середньоквадратичного відхилення швидкості від заданого рівня за час пуску при варіації моменту інерції. Таким чином відшукаємо залежність одного показника від одної змінної $y = f(x)$, де

$$y_i = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} (\omega^* - \omega)^2 dt}, \quad x_i = k_{J_i}, \quad k_{J_i} = J_i / J_{баз}.$$

Задаємось видом функції $f(x)$ в виді поліному другого порядку

$$f(x) = k_2 x^2 + k_1 x + k_0. \quad (5.1)$$

Для пошуку коефіцієнтів k_i в (5.1) складається та вирішується система лінійних рівнянь. Складання системи та її розв'язок реалізуємо в матричному виді. Для цього складаємо матриці

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_1 \\ k_0 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$

де \mathbf{k} – вектор невідомих коефіцієнтів;

\mathbf{A} , \mathbf{b} – матриці складені із вихідних даних.

Вектор невідомих коефіцієнтів знаходимо наступним чином

$$\mathbf{k} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (5.2)$$

Дані, одержані в результаті моделювання, приведені в таблиці 5.1. Рівняння (5.2) вирішуємо в пакеті MATLAB. Відповідний скрипт приведений в додатку В.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

x_i	0,5	0,75	1	1,4	1,75	2
y_i	0,3357	0,4315	0,5272	0,6789	0,8097	1,2208

В результаті одержуємо шукані коефіцієнти та вид функції в цілому

$$k_2 = 0,3076; k_1 = -0,2512; k_0 = 0,4216;$$

$$f(x) = 0,3076x^2 - 0,2512x + 0,4216.$$

Графічно вихідні точки та одержана функція наведені на рисунку 5.1.

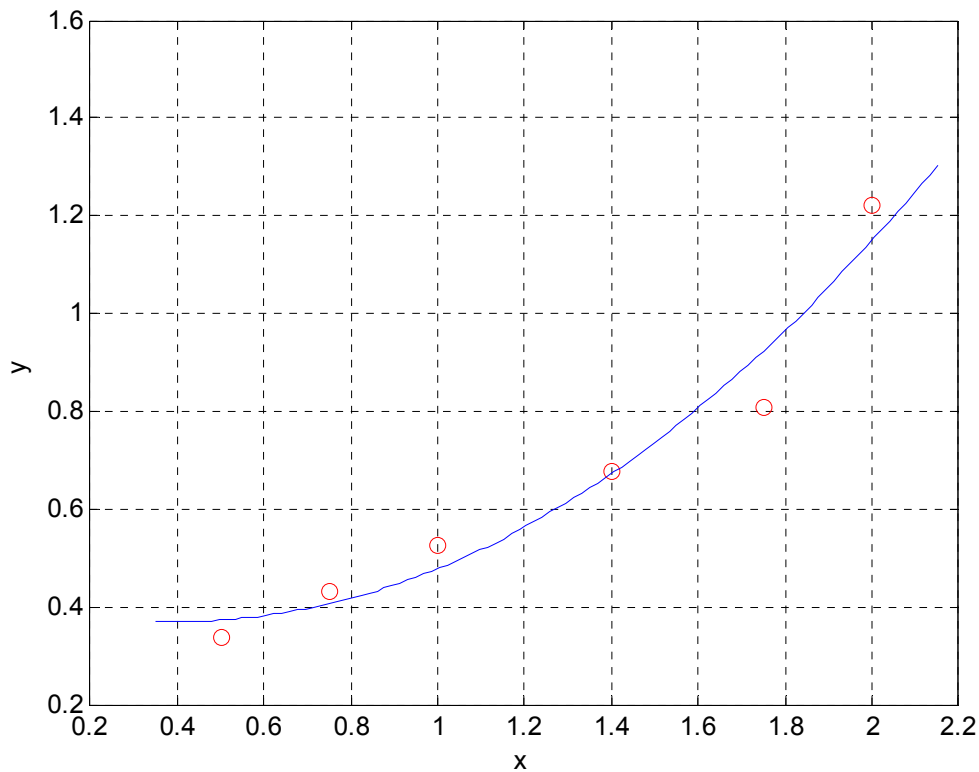


Рисунок 5.1 – Одержані дані та їх апроксимація

5.2 Енергозберігаючий електропривод

Енергозбереження є найбільш дешевим і безпечним способом збільшення енергоозброєності без введення нових генеруючих потужностей, так як витрати на економію 1 кВт потужності обходяться в 4-5 разів дешевше, ніж вартість знову вводиться 1 кВт потужності.

Основні втрати (до 90%) припадають на сферу енергоспоживання, і саме тут повинні бути сконцентровані основні зусилля щодо раціонального використання електроенергії. Так як електроприводи споживають до 70% усієї вироблюваної електроенергії (це характерно для всіх розвинених країн), найбільш істотна економія електроенергії може бути досягнута при використанні регульованих електроприводів в поєднанні з автоматизацією технологічних процесів.

У зв'язку з тим, що серед регульованих електроприводів найкращі сукупні показники мають частотно-регульовані електроприводи і асинхронних двигунів в діапазоні потужностей до 100 кВт виробляється в 40 -50 разів більше, ніж