

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 релейної системи керування
електроприводом станинних роликів чорнової кліті
товстолистового стану 3000

Виконав: студент групи ЕЕ-21дм
Петровський В. С.
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник
доц. Руднев Є. С.
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри
доц. Руднев 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

Петровському Володимирі Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом станинних роликів чорнової кліті товстолистового стану 3000

керівник проекту Руднев Є. С. 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 22 листопада 2021 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 ЕП (лист 4). Структурні схеми та математичні моделі підпорядкованої та релейної систем керування ЕП (лист 5-7). Графіки перехідних процесів (листи 8-9).

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 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)Петровський В. С.
(прізвище та ініціали)Керівник проекту _____
(підпис)Руднев Є. С.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	11
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ.....	19
2.1 Опис конструкції та роботи станинних роликів чорнової кліті	19
2.2 Вимоги до електроприводу станинних роликів	21
2.3 Розрахунок статичних моментів.....	22
2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень	25
2.5 Час керування електроприводом	29
2.6 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву.....	34
3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЛІНІЙНИХ ТА РЕЛЕЙНИХ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ	36
3.1 Вибір і обґрунтування силової частини системи електроприводу	36
3.2 Вибір комплектного електропривода.....	38
3.3 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя.....	43
3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електроприводу станинних роликів.....	46
3.4.1 Джерела живлення електродвигунів (SIMOREG DC Master)	50
3.4.2 Резервування перетворювальної техніки	50
3.5 Вимоги до системи автоматизації	50
3.6 Математичний опис об'єкта керування.....	52
3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електропривода.....	53
3.8 Синтез регулятора струму	55
3.9 Синтез регулятора швидкості	60
3.10 Розрахунки задатчика інтенсивності швидкості.....	64
3.11 Моделювання електроприводу станинних роликів з підпорядкованою системою керування в середовищі Matlab/Simulink	68

4 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ	78
4.1 Загальні положення синтезу системи методом аналітичного конструювання регуляторів	79
4.2 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат	81
4.3 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат	84
4.4 Математичне моделювання електроприводу станинних роликів з релейною системою керування в середовищі Matlab/Simulink.....	86
4.5 Принципи управління підприємствами на основі обліку енергоспоживання.....	95
4.6 Дослідження динаміки і енергетичних показників електропривода з векторним керуванням методом віртуального моделювання	99
ВИСНОВОК.....	110
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	111
Додаток А.....	119

ВСТУП

Актуальність теми. Станинними називаються перші ролики, розташовані по обидва боки прокатної кліті (до трьох роликів з кожного боку). Вони застосовуються тільки на великих обтискних заготівельних станах, що прокочують короткі злитки. Ці ролики розташовуються якомога ближче до валків для надійної подачі металу в кліть зі швидкістю, що відповідає швидкості обертання прокатних валків або дещо більшою. Станинні ролики призначені для завдання металу у валки і приймання його з валків прокатної кліті. Загальна довжина рольгангів досить значна, а вага їх досягає 20-30% від загальної маси механічного обладнання прокатного стану. За призначенням рольганги діляться на робочі та транспортні.

Робочі рольганги розташовані безпосередньо у робочій кліті стану і служать для завдання прокочуваного металу у валки і приймання його з валків. Перші ролики, розташовані праворуч і ліворуч від валків стану (по одному або по два з кожного боку), називають станинними.

Транспортні рольганги (підвідні та відвідні) призначені для зв'язку між собою окремих допоміжних машин і пристроїв стану.

В даний час одними з найбільш поширених і масово виготовлених промисловістю є системи керування електроприводом, побудовані за принципом підпорядкованого регулювання. Порівняно з попередніми їм системами вони володіють великою швидкодією, виконані на базі уніфікованих елементів, що полегшує проектування і складання. Однак такі системи мають і істотний недолік - високу чутливість до параметричних і зовнішніх збурювань.

При синтезі системи керування електроприводом одночасно необхідно забезпечити високу точність відпрацьовування завдання, а також низьку чутливість до змінень різних параметрів об'єкта керування та до зовнішніх збурювань. При такій постановці задачі найбільш перспективним є створення систем оптимального керування.

В умовах швидкого зростання питомої ваги регульованих електроприводів при суворій економії матеріальних і трудових ресурсів

гідності електроприводу оцінюються не тільки по ефекту, досягнутого в технологічній сфері, але і по тому, якою ціною вони були досягнуті у сфері виробництва і експлуатації обладнання. Тому існує тенденція до глибокої уніфікації пристроїв керування.

В теперішній час при автоматизації технологічних процесів з'явилося тенденція к пошуку спільних принципів синтезу систем керування для складних об'єктів, які в максимальній мірі враховували та використовували властивості об'єкта керування [1-6]. При такому підході специфічні властивості об'єкта управління, обумовлені його фізичної природою, не просто враховуються, а ефективно використовуються для досягнення поставленої мети. Саме на цьому шляху можливе виникнення нових принципів і законів керування, які поряд з забезпеченням високої якості керування, забезпечать високі техніко-економічні показники системи. Однак в нелінійному світі немає регулярних шляхів і універсальних методів, характерних для лінійної теорії управління. Кожна нелінійність індивідуальна і породжує свої методи синтезу.

Серед нелінійних об'єктів керування, безсумнівно, одне з провідних місць займають автоматизовані електроприводи (ЕП), на частку яких припадає більш ніж 60% всієї споживаної енергії, виробленої в промислово розвинених країнах [7-12]. На виробництво електроенергії сьогодні йде близько третини видобутої, найчастіше непоправною, первинної енергії, причому споживання електроенергії весь час зростає. Тому актуальною є задача раціонального використання електроенергії, забезпечення вирішення поставлених завдань управління з мінімально можливими витратами енергії. Одним з можливих шляхів вирішення поставленого завдання є алгоритмічний шлях, тобто розробка таких алгоритмів керування електроприводів, які б забезпечували виконання поставлених завдань керування з мінімальними втратами електроенергії [13-18].

На сьогоднішній день найбільш перспективними з точки зору ККД та компактності конструкції є ЕП на базі електричних машин змінного струму з живленням від силових напівпровідникових перетворювачів напруги, але й

електроприводи постійного струму широко задіяні на діючих підприємствах, особливо на металургійних комбінатах.

Характерною рисою таких ЕП є релейна нелінійність. Вона обумовлена роботою сучасних силових приладів переважно в «ключовому режимі» з метою забезпечення малих втрат енергії [8-9, 11, 15-16, 19-22]. Такі динамічні системи є принципово нелінійними динамічними системами, які описуються диференціальними рівняннями з розривними керуванням. Звідси і назви таких систем - релейні системи, системи з розривними керуваннями.

Історія релейних систем значно старше, ніж історія існування напівпровідникових приладів, і починається з релейного зворотного зв'язку, використаної Ч.Шофілдом в 1836 р [14, 23, 24]. Незважаючи на схильність релейних систем до автоколивань, простота їх реалізації в поєднанні з високими динамічними властивостями і властивістю самоадаптації при зміні параметрів і навантаження забезпечили таким системам широке поширення і, як наслідок, створення і розвиток теорії релейних систем.

Перший етап розвитку теорії релейних систем пов'язаний в першу чергу з роботами А.А. Андропова [25], Я.З. Ципкіна [24, 26] та І.Флюгге-Лотц [27, 28]. Надалі з теорії релейних систем виділилися такі самостійні напрямки як:

- теорія нелінійних систем автоматичного керування з різними видами модуляції [29-32] і

- теорія систем автоматичного керування зі змінною структурою [33-35].

Основоположником останньої є академік С.В. Ємельянов, який виховав цілу плеяду вчених, які зробили істотний внесок у цю теорію. Основною ідеєю цієї теорії є використання для синтезу систем автоматичного керування ковзного режиму - спеціального виду руху, що виникає при певних умовах в релейних системах і властивого тільки їм. Зазначений режим забезпечує в динамічній системі високу якість процесів керування, інваріантність до зовнішніх збурень, малу чутливість до змін динамічних властивостей об'єкта керування.

Подальшим розвитком і узагальненням теорії систем зі змінною

структурою з'явилися теорія систем з розривними управліннями [36-41] і теорія бінарних систем [1-2, 7]. Перша з них, ґрунтується на використанні багатовимірного змінного режиму в просторі стану для вирішення поставлених завдань керування, а друга, базується на принципі бінарної, тобто двоїсту природу сигналів в нелінійних динамічних системах, що дозволяє покласти синтез оператора стабілізуючою зворотного зв'язку на допоміжну нелінійну систему.

Можливість та перспективність використання ковзних режимів для керування електроприводами на базі напівпровідникових перетворювачів напруги з релейними регуляторами знайшли широке застосування [42-45]. Примітне, що незалежно від фахівців в галузі керування, фахівці в області електроприводу також звернулися до використання релейних законів керування на основі ковзних режимів [46-49]. Використання цих законів було обумовлено прогресом напівпровідникової техніки і переходом до силових напівпровідникових перетворювачів напруги або струму, силові елементи яких працюють в ключовому (релейному) режимі.

Бурхливий розвиток силової напівпровідникової техніки присіла до появи нових типів високочастотних силових приладів на основі технологій MOSFET і IGBT, що відкрило широкі можливості по створенню та вдосконаленню провідникових перетворювачів електричної енергії, які є основою для побудови автоматизованого електроприводу в останнє десятиліття в них все активніше - використовуються багатовимірне релейне керування, правда, переважно в контурі регулювання фазних струмів електродвигуна. Про це свідчить зростаюча кількість публікацій. Причому таке регулювання в різних публікаціях називається по-різному: «релейне керування» [8, 9], «розривне керування» [19, 50], частотно-токове керування, «керування на ковзних режимах», "hanging control", "hysteresis current control", current forced control, direct torque control і т.д. З позиції найбільш повного пояснення процесів, що протікають при використанні даного виду керування, краще є використання терміну «керування на ковзних режимах».

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

Предметом дослідження є електропривод постійного струму станинних роликів чорнової кліті товстолистого стану з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Метою роботи є синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом станинних роликів чорнової кліті товстолистого стану, яка має необхідні (високі) показники якості в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

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

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У системах автоматичного регулювання технологічних процесів мають місце коливання параметрів. 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. 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.

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.

Недоліком лінійних систем підпорядкованого регулювання, як показано в [51], 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.

Меєровим М. В. показано, що стійкі лінійні системи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення мають властивості інваріантності до параметричних збурювань [52]. 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 збурень, що на рис 3.1 приведені до його входу і представлені величиною f_{Π} .

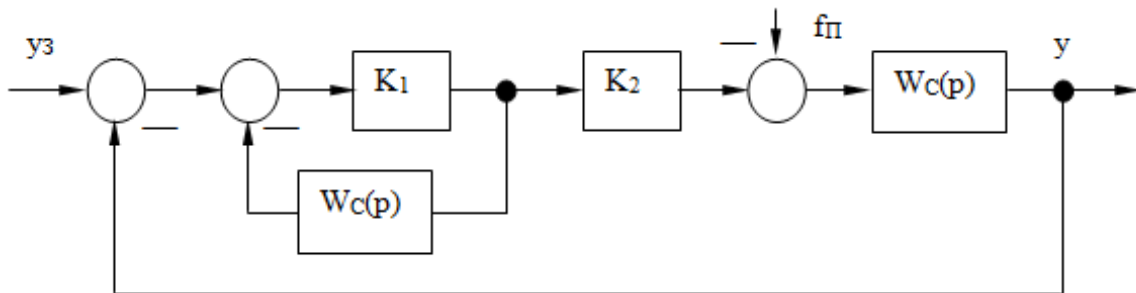


Рисунок 1.1 – Структурна схема замкненої лінійної системи регулювання

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

$$W_{y_3}(p) = \frac{y_1(p)}{y_3(p)} = \frac{K_1 K_2 W_0(p)}{1 + K_1 W_c(p) + K_1 K_2 W_0(p)}, \quad (1.1)$$

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

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} , $W_{f_{II}}(p)$ і виконання необхідних перетворень виходить наступне рівняння для визначення $y(p)$:

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

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 [11], 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:

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

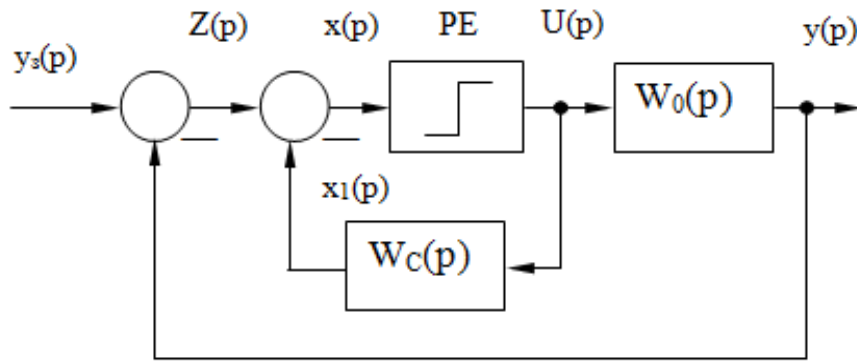


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи, що має релейний елемент

У ковзному режимі сигнал $x(p)$ на вході РЕ, як показано в [26], 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.

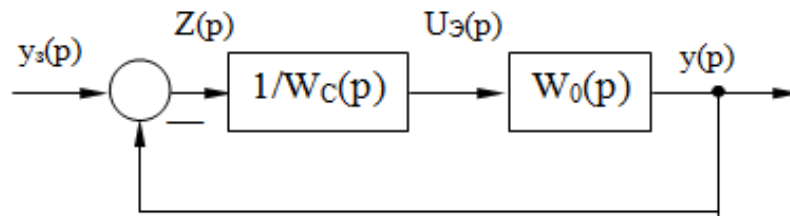


Рисунок 1.3 – Структурна схема лінійної системи, що еквівалентна релейній

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 таким чином 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, зроблений Я. З. Ципкіним в [26], також покладено в основу методу структурного синтезу.

Отримане вище рівняння (1.6) для $Z(p)$ справедливо також і для системи управління, структурна схема якої наведена на рисунку 1.3. З цього виходить, що релейна САУ, що працює в ковзному режимі, нечутлива до змін параметрів ланки $K_1(p)$, охопленого 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.

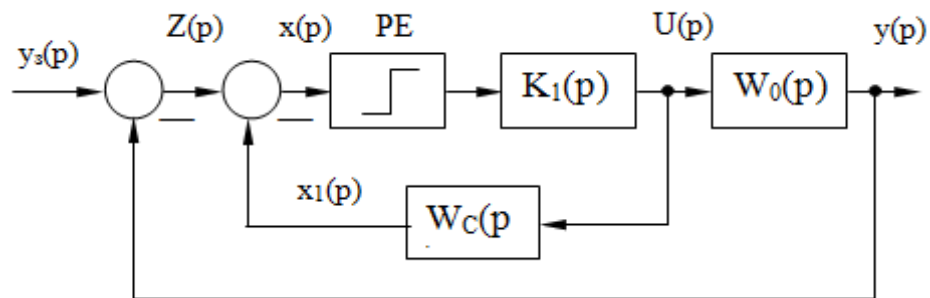


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління

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 [52], 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 [53, 54]. 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 [55-60].

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 [54], 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).

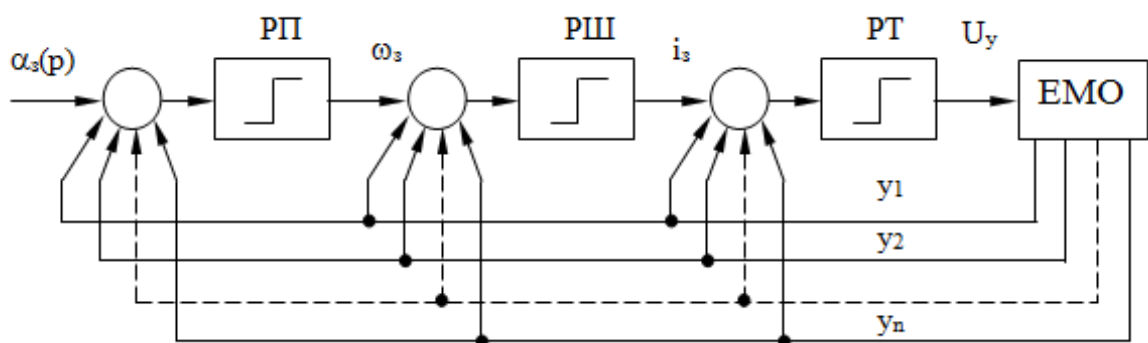


Рисунок 1.5 – Структурна схема оптимальної САУ

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 релейної САУ за швидкодією.

Для формування управлінь використовуються фазові координати $y_1 \div y_n$ ЕМО. В якості таких координат можуть бути застосовані природні координати стану (ЕРС перетворювача, струм, швидкість, положення), канонічні координати (положення та три похідні від нього) та їх комбінації. При зміні використаних координат змінюється опис ЕМО як об'єкта управління. Процедура синтезу від вибору координат стану не залежить. Статичні властивості систем з управліннями в різних просторах стану суттєво відрізняються. Таким чином вибір набору координат стану для реалізації релейного управління визначаються компромісом між властивостями системи та складністю її технічної реалізації.

В роботі буде розглянута та досліджена релейна система керування швидкістю з підпорядкованою структурою та релейними управліннями в просторі природних координат.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ

2.1 Опис конструкції та роботи станинних роликів чорнової кліті

Станинні ролики встановлюються між станинами з обох боків кліті на ділянці між роликом робочого рольганга і робочими валками. Перед і за кліттю встановлюється по три станинні ролика. Станинні ролики мають ребристу бочку діаметром 600/400мм. Кінематична схема механізму представлена на рис.2.1

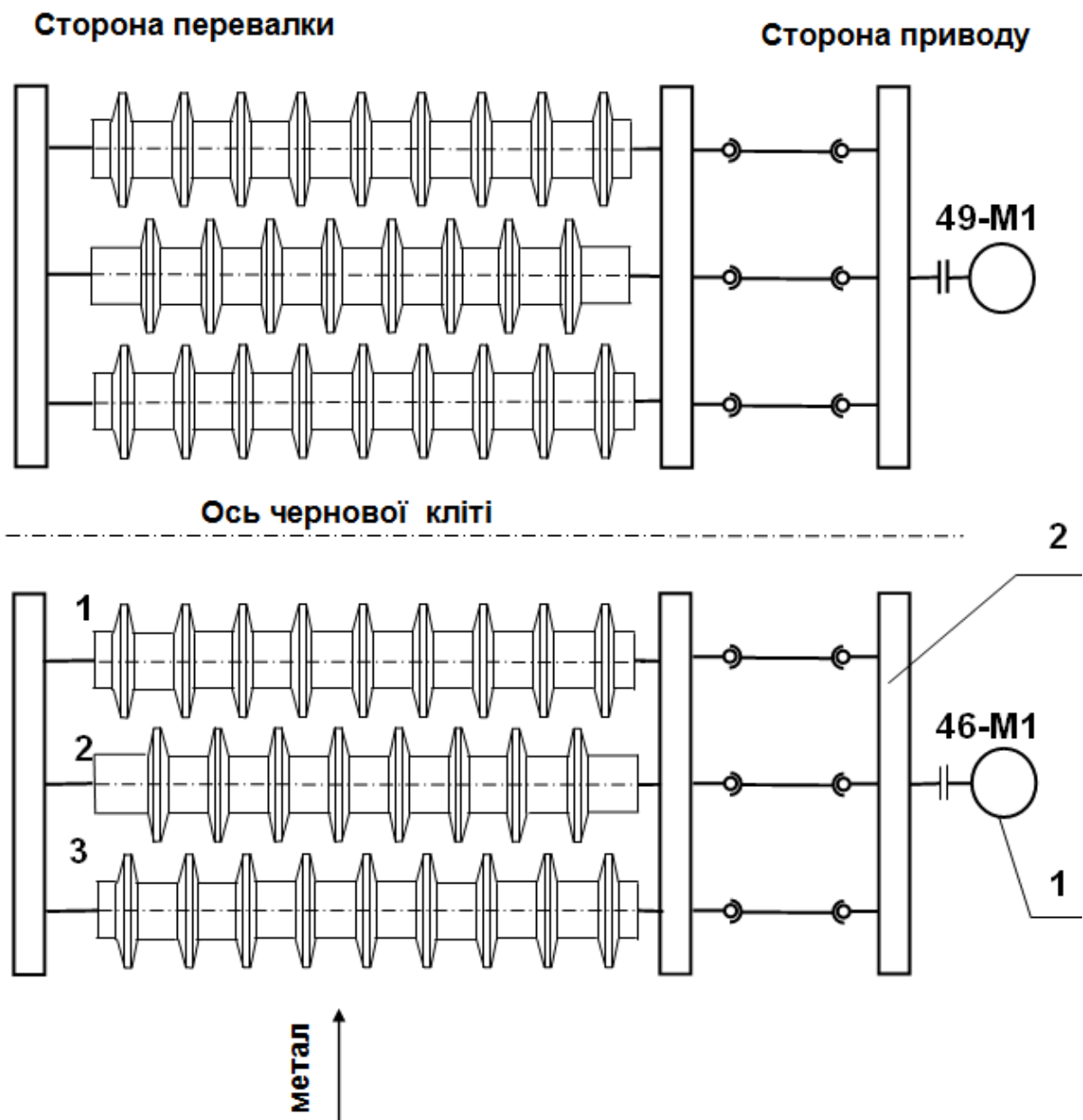


Рисунок 2.1 – Кінематична схема станинних роликів чорнової кліті

Груповий привід обертання трьох станинних роликів здійснюється електродвигуном постійного струму (1), який через зубчасту муфту пов'язаний із середнім станинним роликом. Передача руху двом іншим роликам здійснюється через роздавальний редуктор (2) з паразитними шестернями, виконаний таким чином, щоб окружна швидкість всіх станинних роликів була однаковою (див. рисунок 2.2).

До електродвигунів підводиться повітря від системи примусової вентиляції, що працює по розімкненому циклу.

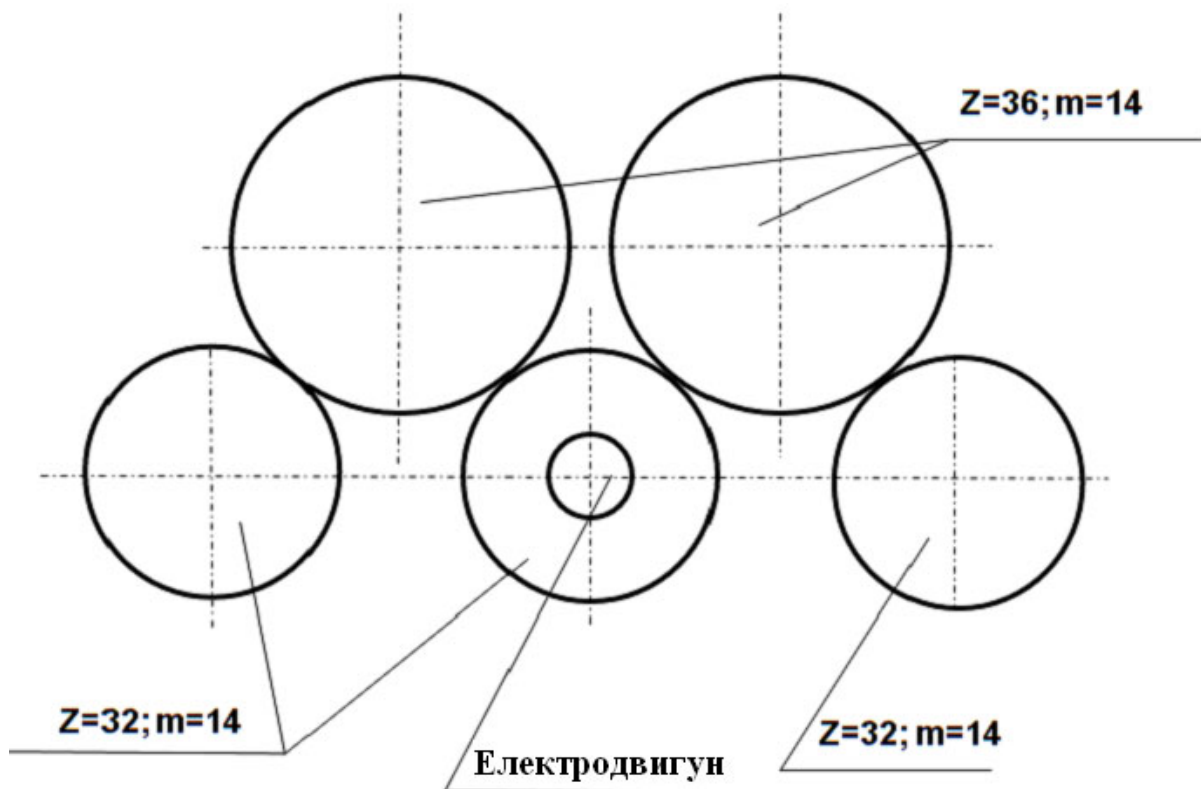


Рисунок 1.2 – Кінематична схема роздавального редуктора

Опис роботи механізму. 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.

У процесі прокатки швидкість транспортування і подачі металу станинними роликами узгоджується зі швидкістю головного приводу з

урахуванням випередження і відставання металу в осередку деформації.

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.

Приводи станинних роликів працюють в повторно-короткочасному, реверсивному режимі. Швидкість регулюється зміною величини напруги, яка живить якірні ланцюги двигунів.

Технологічні та технічні дані станинних роликів наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Вихідні технологічні і технічні дані

Найменування і розмірність технічного параметра	Значення параметра
1.1. Товщина слябу, мм	200...250...300
1.2. Ширина сляба, мм	1500...2800
1.3. Довжина сляба, мм	1600...2300
1.4. Маса сляба, кг	до 7500
2 Станинні ролики	
2.1 Діаметр бочки ролика, мм	600/400
2.2 Внутрішній діаметр підшипника ролика, мм	200
2.3 Зовнішній діаметр підшипника ролика, мм	420
2.4 Кількість роликів, шт.	3
2.5 Маса ролика:	
першого, кг	3222
другого, кг	3154
третього, кг	3122
2.6 Передаточне число редуктора, відн. од.	1
3 Технологічні дані	
3.1 Швидкість прокатки, м/с	3
3.2 Момент прокатки у кліті, кНм	3500
3.3 Зусилля прокатки в кліті, кН	40000

2.2 Вимоги до електроприводу станинних роликів

Станинні ролики працює в повторно-короткочасному режимі, при цьому число включень на годину становить 360-450 і тривалість включень ПВ = 80%.

Для забезпечення необхідних технологічних режимів роботи і високої продуктивності стану, електропривод станинних роликів повинен задовольняти основним вимогам:

- час протікання перехідних процесів при заданих значеннях динамічного струму повинно бути мінімальним;
 - забезпечувати часті пуски і гальмування;
 - забезпечувати необхідний діапазон регулювання швидкості;
 - величина прискорення не повинна залежати від швидкості, до якої розганяється двигун;
 - мати високу перевантажувальну здатність приводного двигуна по струму і моменту;
 - забезпечувати високу надійність роботи системи;
- система керування електроприводом повинна забезпечувати зручності введення керуючих впливів з боку системи автоматики при малій потужності цих впливів.

2.3 Розрахунок статичних моментів

На даний момент в якості приводного електродвигуна електроприводу станинних роликів перед чорною кліткою кварто товстолистового стану 3000 встановлено електродвигун постійного струму типу П100/1600У3 закритого виконання з примусовою вентиляцією по розімкненому циклу з паспортними даними, наведеними в табл. 2.2. Привод обертання трьох станинних роликів груповий, який через зубчасту муфту пов'язаний із середнім станинним роликом. Передача руху двом іншим роликам здійснюється через роздавальний редуктор з паразитними шестернями, виконаний таким чином, щоб окружна швидкість всіх станинних роликів була однаковою.

Двигуни оснащені імпульсними датчиками швидкості HOG 10 DN концерну Huebner Berlin – 1024 імпульсу/оборот.

Таблиця 2.2 - Паспортні дані електродвигуна П100/160У3

Найменування параметра	Чисельне значення
Номінальна потужність, кВт	$P_H = 100$
Номінальна напруга, В	$U_H = 440$
Номінальний струм, А	$I_H = 248$
Номінальна частота обертання, об/хв	$n_H = 160$
Момент інерції якоря, кг·м ²	$J_{дв} = 54,9$

За час циклу роботи станинних роликів електродвигун навантажений 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 [1-3]. Розрахунок ведеться для групового, редукторного електроприводу. Момент холостого ходу на приводному валу ролика [61, 62]:

$$M_{x.p} = \frac{G_p d_{ш} \mu_{ш}}{2i\eta_x}, \quad (2.1)$$

де G_p - вага роликів (3 шт), кг;

$d_{ш} = 0,2$ м - діаметр шийки ролика (внутрішній діаметр підшипника);

$\mu_{ш} = 0,007$ - коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання ролика під дією високих температур, металу що транспортується [62, табл. 5.3];

$i = 1$ отн. ед. - передавальне число редуктора;

η_x - ККД редуктора при холостому ході.

Вага роликів визначається за формулою:

$$G_p = g(m_1 + m_2 + m_3) = 9,81(3222 + 3154 + 3122) = 93140 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \quad (2.2)$$

де m_1, m_2, m_3 - маси відповідно 1-го, 2-го, 3-го роликів, кг;

$g = 9,81 \text{ м / с}^2$ - прискорення вільного падіння.

Оскільки при холостому ході момент на валу редуктора становить 5-10% від номінального, то рекомендується [61] зменшувати ККД приводу в два рази, тобто

$$\eta_x = 0,5\eta_H = 0,5 \cdot 0,95 = 0,475 \quad (2.3)$$

де $\eta_H = 0,95$ - ККД зубчастих редукторів [62, табл. 5.4].

З огляду на все вище зазначене, розрахуємо момент холостого ходу за формулою (2.1) з урахуванням (2.2) і (2.3)

$$M_{x,p} = \frac{93140 \cdot 0,2 \cdot 0,007}{2 \cdot 1 \cdot 0,475} = 137,3 \text{ Нм}$$

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

$$M_{x,d} = 0,07M_H = 0,07 \cdot 5968,3 = 417,7 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

де $M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{100 \cdot 10^3}{16,75} = 5968,3 \text{ Нм}$ - номінальний момент двигуна;

$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 160}{30} = 16,75 \text{ 1/с}$ - номінальна швидкість електродвигуна.

Таким чином, повний момент холостого ходу станинних роликів:

$$M_x = M_{x,p} + M_{x,d} = 137,3 + 417,7 = 555 \text{ Нм}, \quad (2.5)$$

Момент транспортування металу по роликам:

$$M_{тр} = \frac{9,81m_M \left(\mu_{ш} \frac{d_{ш}}{2} + f \right)}{i\eta_{тр}} = \frac{9,81 \cdot 7500 \left(0,007 \frac{0,2}{2} + 0,0015 \right)}{0,475} = 340,7 \text{ Нм} \quad (2.6)$$

де $m_m = m_{сл} = 7500$ кг - маса металу, яка припадає на станинний блок (прийнятий рівним максимальній вазі сляба масою 7,5 т);

$f = 0,0015$ - коефіцієнт тертя кочення гарячого металу по роликам [61, с. 88];

$\eta_{тр} \approx \eta_x = 0,5\eta_H = 0,475$, оскільки транспортування злитка по станинним роликам дає зазвичай незначне збільшення статичного навантаження на електропривод в порівнянні з навантаженням холостого ходу [61].

Повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів:

$$M_{с.т} = M_x + M_{тр} = 555 + 340 = 895,7 \text{ Нм} \quad (2.7)$$

Момент буксування, приведений до валу електродвигуна:

$$M_б = \frac{9,81m_m d_p \mu_б}{2\eta_H} = \frac{9,81 \cdot 7500 \cdot 0,5 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,95} = 5808,5 \text{ Нм} \quad (2.8)$$

де $d_p = \frac{0,4 + 0,6}{2} = 0,5$ м - діаметр ролика;

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

Повний момент статичного опору при буксуванні:

$$M_{сб} = M_x + M_б = 555 + 5808,5 = 6363,5 \text{ Нм} \quad (2.9)$$

2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень

Через буксування розкату по роликам можна 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 $F_{\text{ин}} \leq F_6$. 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 $\mu_6 = 0,15 \div 0,3$ [61, 62], 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:

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

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

$M_{\text{с.т}_i}$ - 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 обертового руху:

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

Приведення поступального руху до обертового 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

$$J_M = m_M \frac{V_M^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (2.18)$$

Підставляючи замість лінійної швидкості металу її вираз через частоту обертання електродвигуна $V_M = \frac{\omega_{дв} d_p}{2}$, 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:

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

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

Момент інерції механізму дорівнює:

$$J_{мех} = J_{дв} + J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} = 54,9 + 100,7 + 98,5 + 97,5 = 351,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

де $J_{дв} = 54,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції двигуна (див. табл. 2.1);

$$J_{p1} = m_1 \frac{d_p^2}{8} = 3222 \frac{0,5^2}{8} = 100,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 1-го ролика;}$$

$$J_{p2} = m_2 \frac{d_p^2}{8} = 3154 \frac{0,5^2}{8} = 98,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 2-го ролика;}$$

$$J_{p3} = m_3 \frac{d_p^2}{8} = 3122 \frac{0,5^2}{8} = 97,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 3-го ролика;}$$

Сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна згідно (2.16):

$$J'_{\Sigma} = 351,6 + 468,7 = 820,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

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

$$\begin{aligned} M_{\text{п.о.р}} &= (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} + M_{\text{с.т}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} J'_{\Sigma} + M_{\text{с.т}} = \\ &= \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{0,5} 820,3 + 895,7 = 10552,3 \text{ Нм} = 1,7 M_{\text{н}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для гальмування (уповільнення) вираз гранично-виправданого моменту має вигляд:

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

або

$$\begin{aligned} M_{\text{п.о.т}} &= (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} - M_{\text{с.т}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} J'_{\Sigma} - M_{\text{с.т}} \\ &= \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{0,5} 820,3 - 895,7 = 8760,8 \text{ Нм} = 1,5 M_{\text{н}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Приймаємо кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів)
 $\lambda_{\text{пт}} = 2$.

2.5 Час керування електроприводом

Виділимо наступні ділянки навантажувальної діаграми в циклі роботи електроприводу станинних роликів:

- розгін без підкату до швидкості захоплення;
- робота на холостому ході до підходу підкату;
- транспортування металу до захоплення його валками;
- розгін з металом до швидкості прокатки;
- гальмування вхолосту.

У таблиці 2.3 наведено час роботи електроприводу станинних роликів, заснований на реальних графіках завдання швидкості для станинних роликів, які формуються контролером керування АСУ ТП.

Таблиця 2.2 – Час роботи електроприводу станинних роликів перед чорною кліттю

№ проходу	Час, с						
	розгін до швидкості захоплення	холостий хід на швидкості захоплення	розгін до швидкості транспортування	рух на швидкості транспортування	Гальмування	Швидкість прокатки, м/с	Пауза перед проходом
1	0,6	3,42	0,5	0,72	0,8	1,4	3,2
2		1,02	0,53	0,91	0,83	1,4	2,1
3(к)		1,56	0,22	0,8	0,72	1,25	5,4
4		0,53	0,35	1,25	0,8	1,4	1,5
5		3,22	0,35	1,4	0,8	1,4	2,4
6		1,13	0,7	1,25	1,2	1,75	3,1
7		2,5	0,7	1,5	1,1	1,75	2,8
8		1,36	0,7	1,63	1,1	1,75	3,2
9		2,3	0,75	2,3	1,2	1,75	2,9
10		0,9	0,75	2,5	1,2	1,75	2,3
11		1,8	0,75	2,6	1,2	1,75	3,2
12		1,2	0,75	2,9	1,2	1,75	2,7
13		0	2,2	4,2	2,0	3,0	3,9
Загальний час	7,8	21,11	8,25	23,96	14,15		38,7
Машинний час	75,27					Час циклу	114

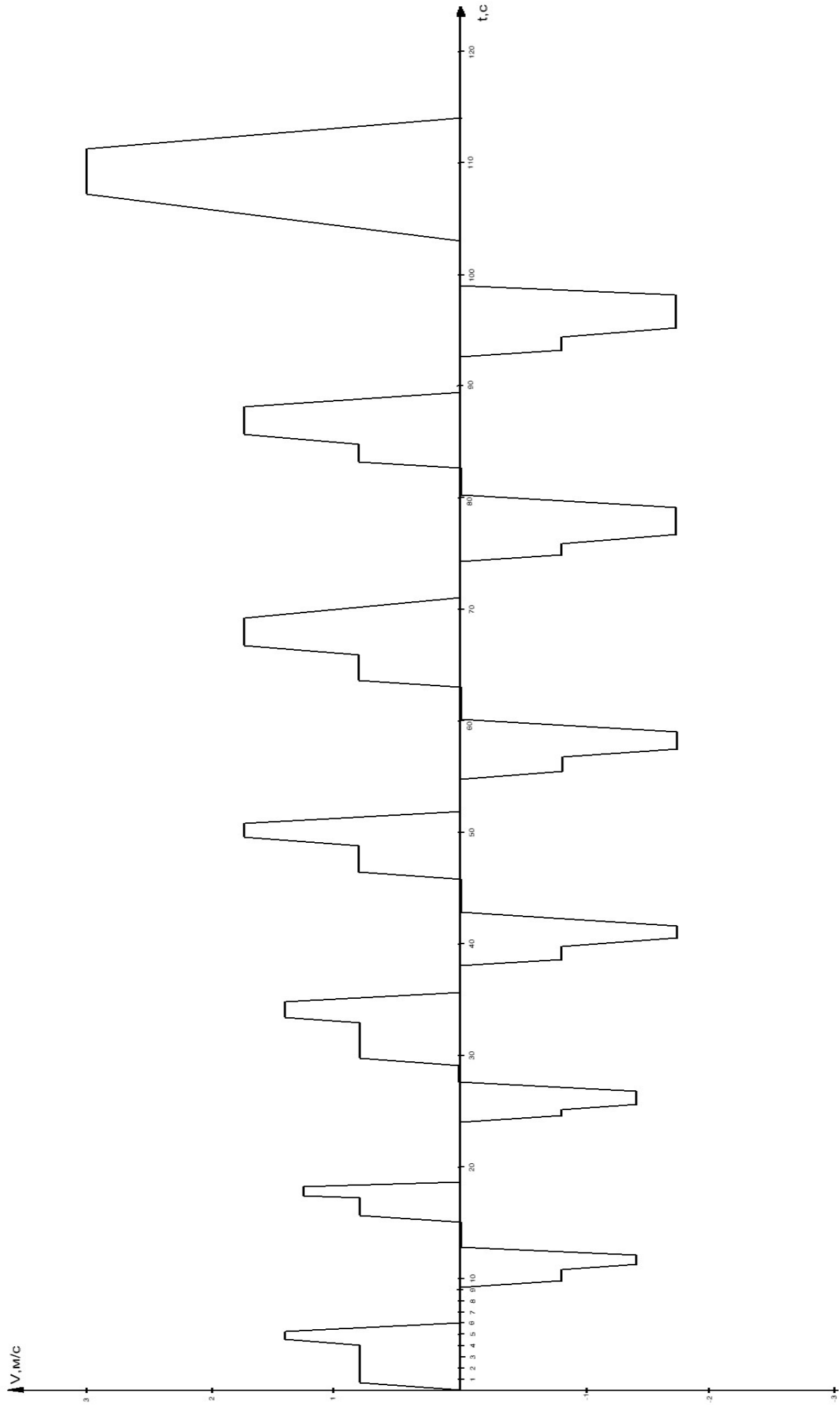


Рисунок 2.3 – Тахограми роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліттю за цикл роботи прокатного стану 31

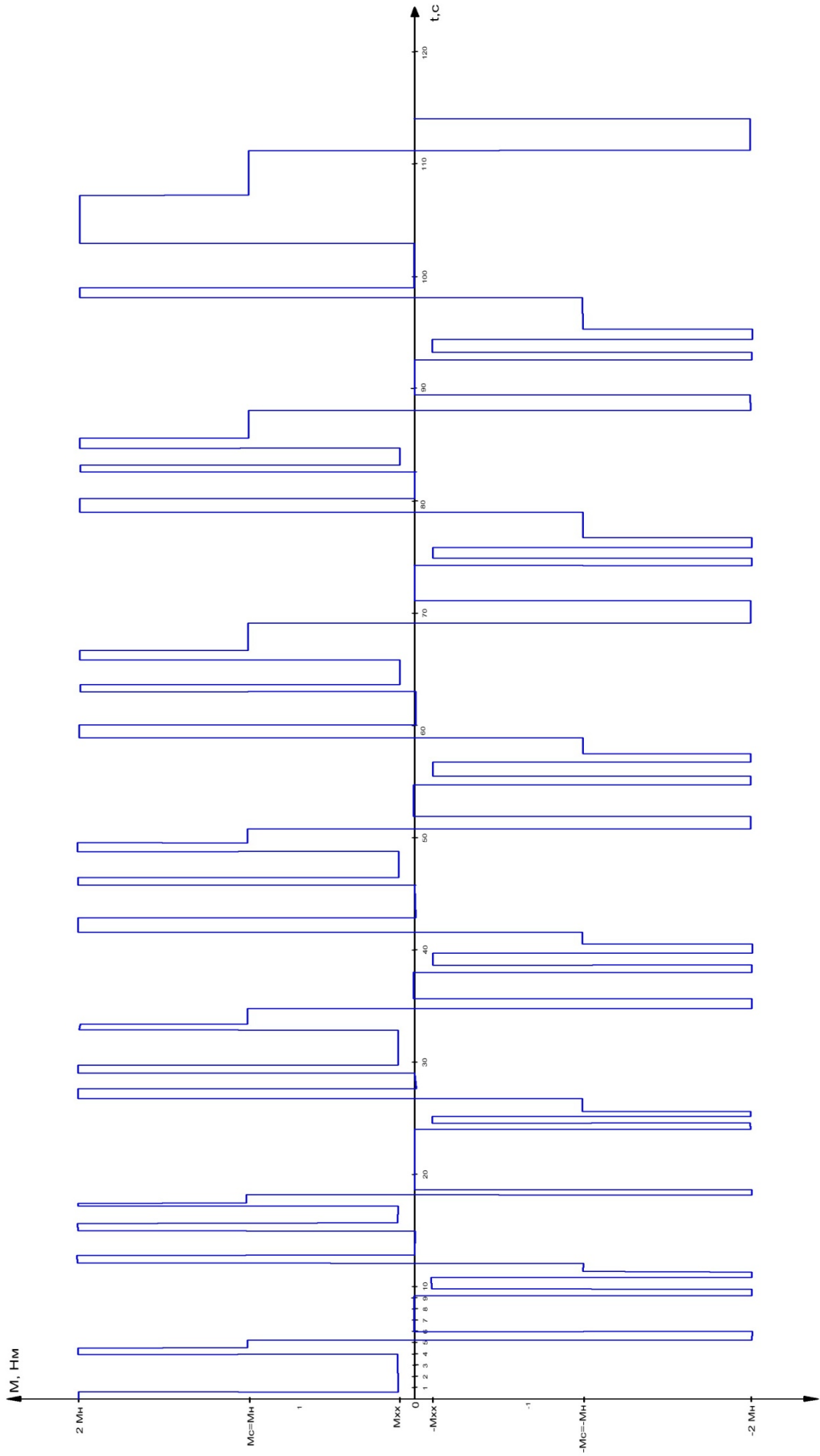


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліткою за цикл роботи стану ³²

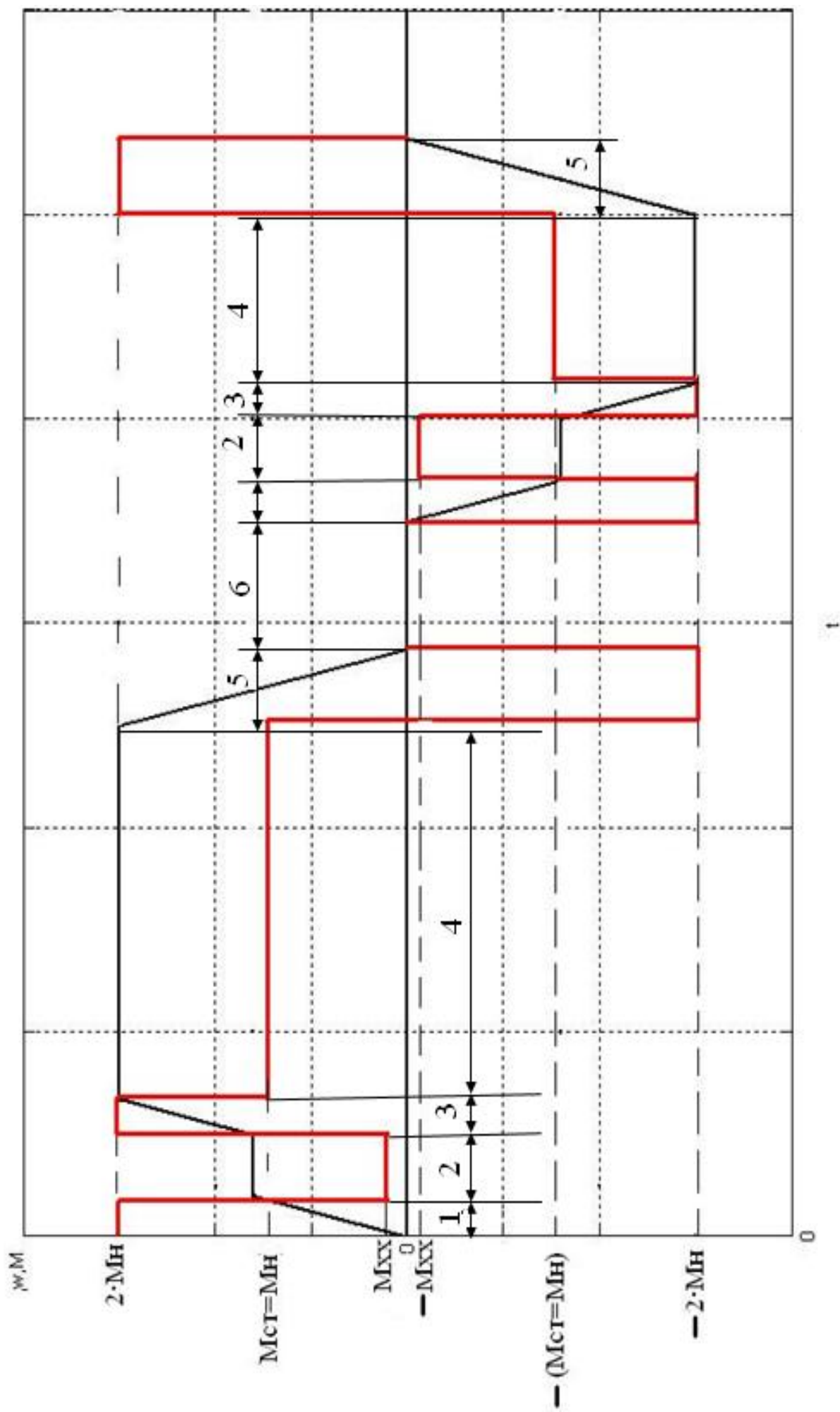


Рисунок 2.5 – Тахограма і навантажувальна діаграма роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліттю 1-2 прохід ³³

На рис. 2.3 - 2.5 наведені тахограми і навантажувальні діаграм роботи електроприводу робочого рольганга за цикл роботи прокатного стану (прокатка в чорновій кліті), а також для декількох з пропусків. Цифри над стрілками позначають час роботи на виділених ділянках діаграми. Так, 1-час пуску, 2 час розгону від швидкості захоплення до швидкості прокатки, 3 час руху на холостому ході, 4 час транспортування, 5 час гальмування, 6-час паузи перед проходом. Конкретні значення часу наведені у таблиці 2.3.

2.6 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву

На рис. 2.4 зображена навантажувальна діаграма електроприводу станинних роликів перед чорною кліттю.

Еквівалентний момент електродвигуна:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (M_{\text{пт}}^2 (t_{\text{п}} + t_{\text{т}} + t_{\text{р}}) + M_{\text{х}}^2 \cdot t_{\text{х}} + M_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{тр}})}{t_{\text{ц}} \cdot \text{ТВ}}} = \quad (2.25)$$

$$= \sqrt{\frac{2,814 \cdot 10^9}{114 \cdot 1}} = 4986,3 \text{ Нм} = 0,8 M_{\text{н}}$$

де $M_{\text{пт}}$ - середній пускотормозний момент, Нм;

$M_{\text{тр}}$ - момент транспортування, Нм;

$t_{\text{п}}$ - час пуску, с;

$t_{\text{р}}$ - час розгону від швидкості захоплення до швидкості прокатки, с;

$t_{\text{т}}$ - час гальмування, с;

$t_{\text{тр}}$ - час транспортування, с,

$t_{\text{х}}$ - час руху на холостому ході, с,

$t_{\text{ц}}$ - час циклу, с,

ТВ – тривалість включення.

Отримане розрахункове значення еквівалентного моменту показує, що прийняті значення пускового і гальмівного моментів забезпечують інтенсивне

протікання перехідних процесів при одночасній допустимому навантаженні електродвигуна по нагріванню. Завантаження електродвигуна становить 80%.

Серед усіх можливих моментів на валу двигуна найбільшим є пусковий момент електроприводу при транспортуванні металу. Таким чином, обраний електродвигун проходить і по перевантажувальній здатності (максимально допустима кратність струму якоря 2,5).

При прокатці аркушів інших типорозмірів (при підкатах більшої маси) завантаження двигуна по середньоквадратичного моменту становить 90%, що допустимо. Дещо 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 об метал виникає при виході розкату з валів кліти з більшою швидкістю через так званого «випередження». Вважаємо, що 20% -го резерву потужності двигуна досить для покриття додаткових моментів.

3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЛІНІЙНИХ ТА РЕЛЕЙНИХ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ

3.1 Вибір і обґрунтування силової частини системи електроприводу

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

Система Г-Д має гарні регульовальні властивості, порівняно невисоку питому вартість і більший термін 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 потрібне перетворення енергії (електричної в механічну й навпаки), великий рівень шуму в процесі роботи, необхідність регулярного й ретельного обслуговування.

У даний час система Г-Д має обмежене застосування у зв'язку з масовим впровадженням перетворювачів на тиристорах і транзисторах. У металургійній промисловості використовується в якості електропривода великої потужності на деяких 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 у ланцюзі навантаження, високі частоти комутації й менше істотних нелінійностей перетворювача;

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

– високий ККД, тому що втрати потужності на регулюючому елементі

ШПП незначні в порівнянні із втратами потужності у випадку безперервного регулювання;

- високий коефіцієнт потужності системи;
- високе використання двигунів за струмом через велику частоту комутації й малі пульсації струму якоря;
- низький вихідний опір перетворювача і тому більш жорсткі швидкісні й механічні характеристики двигуна;
- мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим фактором є час провідності ключа, а не величина внутрішнього опору регулюючого елемента, що має місце при безперервному регулюванні;
- малі габарити й маса;
- постійна готовність до роботи.

Разом з тим ШПП властиві й недоліки:

- імпульсний режим роботи регулюючого елемента приводить до необхідності встановлювати вихідні фільтри, що викликає інерційність процесу регулювання в замкнених системах;
- високі швидкості включення й вимикання струму в силовому ланцюзі ШПП приводять до виникнення радіоперешкод.

У теперішній час практичне застосування ШПП на напівпровідникових елементах обмежене електроприводами малої й середньої потужності.

В електроприводах середньої й великої потужності широке поширення отримала система ТП-Д. В порівнянні із системою Г-Д ця система електропривода має низку переваг:

- відсутність обертових частин, безшумність у роботі;
- більш високі швидкодія й 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 механізм більшою продуктивністю і високою якістю продукції;

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

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

- погіршення коефіцієнта потужності пропорційно $\cos\phi$ й зменшення при цьому навантажувальній здатності ТП, що особливо відчутно в приводах великої потужності;

- при глибокому регулюванні крім зменшення коефіцієнта потужності збільшується амплітуда пульсацій у кривих випрямленої напруги й струму, що може несприятливо позначитися на комутації струму приводного двигуна, викликати розриви струму й коливання швидкості обертання двигуна;

- викривлення форми напруги мережі живлення в результаті комутаційних процесів у ТП, що несприятливо позначається на роботі інших електроустановок, які одержують живлення від цієї мережі, а також на роботі самого ТП, оскільки нерідко напруга мережі використовується в якості опорної.

Особливо відзначимо, що перераховані недоліки системи ТП-Д стають вагомими тільки при великій потужності привода.

Тиристорні електроприводи (система ТП-Д) мають високі техніко-економічні показники й експлуатаційні переваги, відповідають сучасним вимогам технологічних процесів і по праву стають головним засобом керованого перетворення електричної енергії в механічну [63].

3.2 Вибір комплектного електропривода

Основними технічними даними комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм $I_{н\ ТП}$ і напруга $U_{н\ ТП}$. При роздільному живленні якірних ланцюгів номінальний струм перетворювача збігається з номінальним струмом двигуна.

Номінальна напруга перетворювача визначається номінальною напругою електродвигуна, яке менше номінальної напруги ТП, визначеного по ГОСТ 25953-83, на 5-15%, що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості

і на безпечне інвертування при зниженні напруги мережі живлення. Номінальні дані двигуна П100/160УЗ для якого проводиться вибір силового ТП наведені в таблиці 2.1.

Для встановлених електродвигунів, з каталогу вибираємо реверсивний комплектний тиристорний електропривод (ТКЕ) SIMOREG DC Master концерну Siemens шафового виконання, технічні дані якого наведені в табл. 3.1.

Однолінійна схема силової частини комплектного електроприводу та конструкція шафи SIMOREG DC MASTER приведена на рис. 3.2 - 3.2.

Таблиця 3.1 - Технічні дані перетворювача шафового виконання SIMOREG DC Master 6RM7078-6FV02

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Номінальна живляча 3х фазна напруга, В	$U_{н1\ TP} = 460$
Номінальний вхідний струм, А	$I_{н1\ TP} = 233$
Номінальна випрямлена (постійна) напруга, В	$U_{н\ TP} = 480$
Номінальна випрямлена (постійна) струм, А	$I_{н\ TP} = 280$
Номінальна потужність, кВт	$P_{н\ TP} = 134$
Номінальна напруга збудження, В	$U_{в\ TP} = 373$
Номінальний струм збудження, А	$I_{в\ TP} = 15$
Маса, кг	$m_{TP} = 200$

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 харчування ланцюга збудження одно 40А (рівні струмів залежать від номінального струму якоря).

Всі блоки SIMOREG DC MASTER забезпечені простою панеллю керування (PMU), закріпленою на дверцятах перетворювача. Панель складається з п'ятирозрядного, семисигментного 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 одноквADRANTНИХ перетворювачах ланцюг якоря живиться від повністю керованого трифазного моста, а в чотириквADRANTНИЙ 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.

With SIMOREG DC MASTER 60 A to 210 A, 575 V

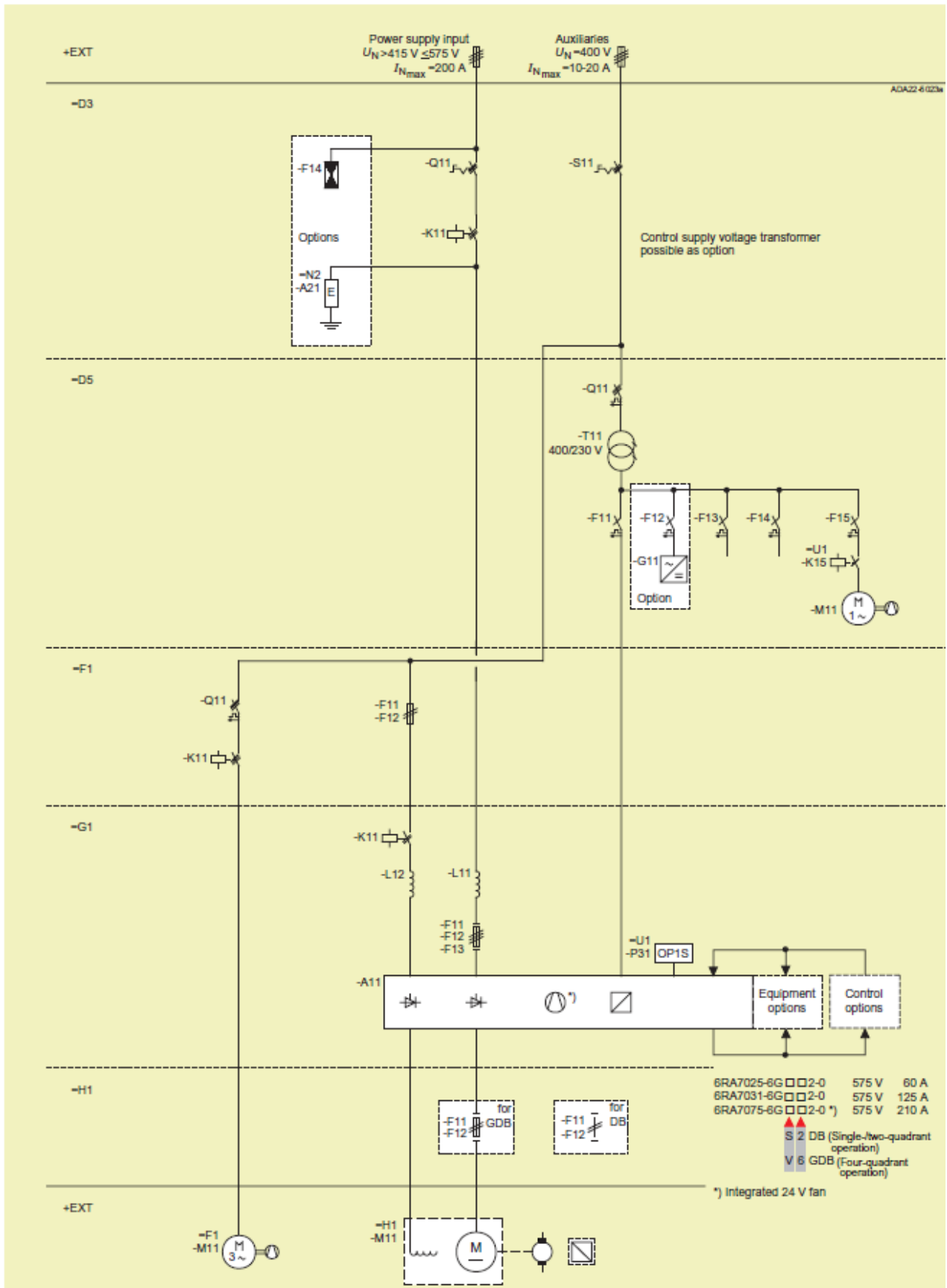


Рисунок 3.1 – Однолінійна схема силовій частини комплектного електроприводу SIMOREG DC MASTER

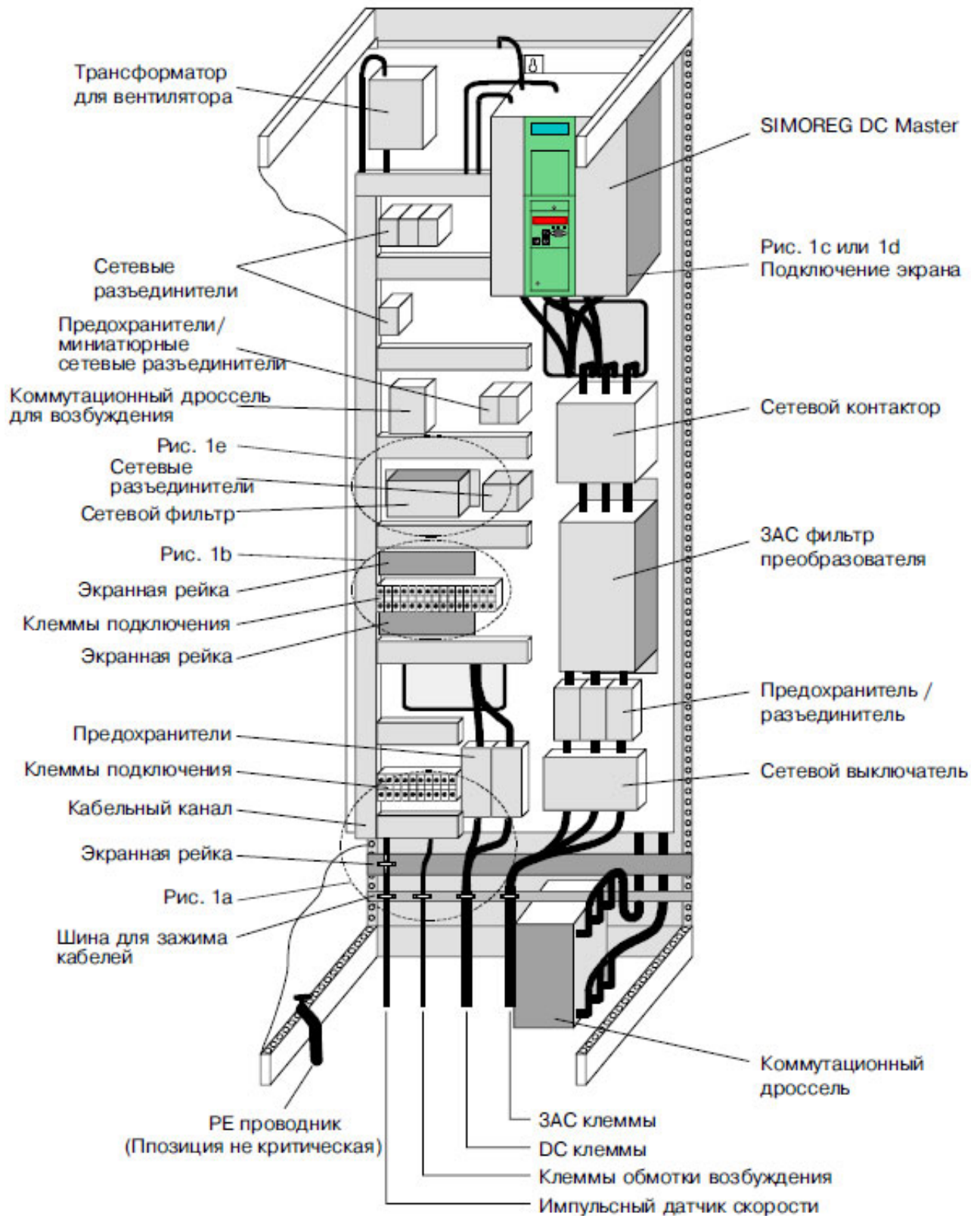


Рисунок 3.2 - Конструкция шкафа комплектного тиристорного электропривода SIMOREG DC MASTER серии 6RM70

3.3 Вибір силового трансформатора і згладжувального 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.

Трансформаторне обладнання вибирається відповідно до параметрів тиристорного перетворювача.

Для узгодження тиристорних перетворювачів (12 + 1) з мережею живлення з довідника [66, 68] обираємо силовий трансформатор ТСЗП-1000/10УЗ технічні дані, якого наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні дані силового трансформатора ТСЗП-1000 / 10УЗ виконання 5 для живлення тиристорного перетворювача

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Потужність, кВ·А	$P_{\text{тр}} = 402$
Номінальна первинна напруга, В	$U_{1 \text{ тр}} = 6000$
Номінальна вторинна напруга, В	$U_{2 \text{ тр}} = 569$
Діюче значення струму вторинної обмотки, А	$I_{2 \text{ тр}} = 408$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{\text{хх}} = 795$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{\text{кз}} = 2400$
Напруга короткого замикання, %	$U_{\text{кз}\%} = 4,7$
Струм холостого ходу, %	$I_{\text{хх}\%} = 5,2$
Маса, кг	$m_{\text{тр}} = 1700$

Оскільки пульсації струму, що протікає в якірному ланцюзі, погіршують тепловий режим електродвигуна і умови його комутації, для їх зменшення застосовується згладжувальний дросель. Зменшення пульсацій напруги на затискачах якоря при включенні дроселя пояснюється тим, що на якір подається сума випрямленої напруги мережі і ЕРС самоіндукції дроселя. Крім цього, введення реактора, що згладжує призводить до звуження зони переривчастих струмів, що, в свою чергу, призводить до збільшення жорсткості швидкісних характеристик приводу.

Індуктивність згладжувального дроселя, що включається послідовно з якорем двигуна, вибирається за умови виконання двох вимог:

- забезпечення безперервності струму якоря двигуна в певному діапазоні навантажень і частот обертання двигуна;
- обмеження амплітуди змінної складової струму якоря двигуна.

Нижче наведено розрахунок згладжувального дроселя [70, приклад 1-24, 1-27]. Значення максимально випрямленою ЕРС (напруга на виході перетворювача):

$$E_{d0} = 1,35U_{2 \text{ тр}} = 1,35 \cdot 569 = 768,15 \text{ В} \quad (3.1)$$

де 1,35 - коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2 \text{ тр}}$ - номінальна напруга на вторинній обмотці силового трансформатора, В.

Кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги:

$$\omega_1 = 2\pi f_c m_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6 = 1884,956 \text{ Гц} \quad (3.2)$$

де f_c - частота мережі живлення, Гц;

m_ϕ - число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний і повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{2 \text{ тр}}^2}{P_{\text{тр}}^2} = \frac{2400 \cdot 569^2}{(402 \cdot 10^3)^2} = 4,808 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз\%}} U_{2 \text{ тр}}}{100 I_{2 \text{ тр}} \sqrt{3}} = \frac{4,7 \cdot 569}{100 \cdot 408 \cdot \sqrt{3}} = 37,843 \cdot 10^{-3} \quad (3.4)$$

$$x_{\text{а тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = \sqrt{37,843 \cdot 10^{-3} - 4,808 \cdot 10^{-3}} = 33,035 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

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

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

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

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

Індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямля-ленного струму:

$$L_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{а тр}} \pi}{2\pi f_c} = \frac{33,035 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 105,154 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.6)$$

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

Індуктивність якоря двигуна визначається емпіричною формулою:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = 6 \frac{440}{4 \cdot 160 \cdot 248} = 16,633 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

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

$U_{\text{н}} = 440$ В - номінальна напруга електродвигуна;

$I_{\text{н}} = 248$ А - номінальний струм електродвигуна;

$2p = 4$ - число пар полюсів електродвигуна;

$n_{\text{н}} = 160$ об/хв - номінальна частота обертання електродвигуна.

Необхідна індуктивність згладжувального дроселя:

$$L_{\text{сд}} = \frac{e_{\text{н}} E_{\text{д0}}}{i_{\text{е}} \omega_1 I_{\text{н}}} - (2L_{\text{тр}} + L_{\text{дв}}) = \frac{0,24 \cdot 768,15}{0,024 \cdot 1884,956 \cdot 248} - (2 \cdot 105,154 \cdot 10^{-6} + 16,633 \cdot 10^{-3}) = -0,41 \text{ мГн} \quad (3.8)$$

де e_n - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої напруги, може бути підрахована за допомогою рівнянь [68, с. 40], або з графіка [70, с. 47 рис. 1.31]. На цьому графіку зображено залежність для трифазної схеми випрямлення в функції кута регулювання α . Приймаємо граничний кут регулювання $\alpha_{\max} = 90$ ел. град., тоді значення $e_n = 0,24$;

$E_{d0 \text{ тп}}$ - значення максимально випрямленої ЕРС (напруга на виході перетворювача), В;

i_e - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої струму. $i_e = 0,02 \div 0,05$, нижня межа береться для електроприводу середньої і великої потужності, а верхній – для електроприводу малої потужності [70, с. 46, 59];

ω_1 - кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги, Гц;

$L_{\text{тр тп}}$ - індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму, Гн;

$L_{\text{дв}}$ - індуктивність обмотки якоря електродвигуна, Гн.

Виходячи з результату формули (3.8) в установці згладжувального дроселя немає необхідності, оскільки індуктивності якоря двигуна і трансформатора досить для згладжування пульсацій, що виникають в роботі електропривода. Це істотно зменшить вартість і масогабаритні показники електроприводу.

3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електроприводу станинних роликів

Принципова схема силового ланцюга станинних роликів перед чорною кліттю наведена на рис. 3.3.

Схема підключення тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70 приведена на рис. 3.4 - 3.5.

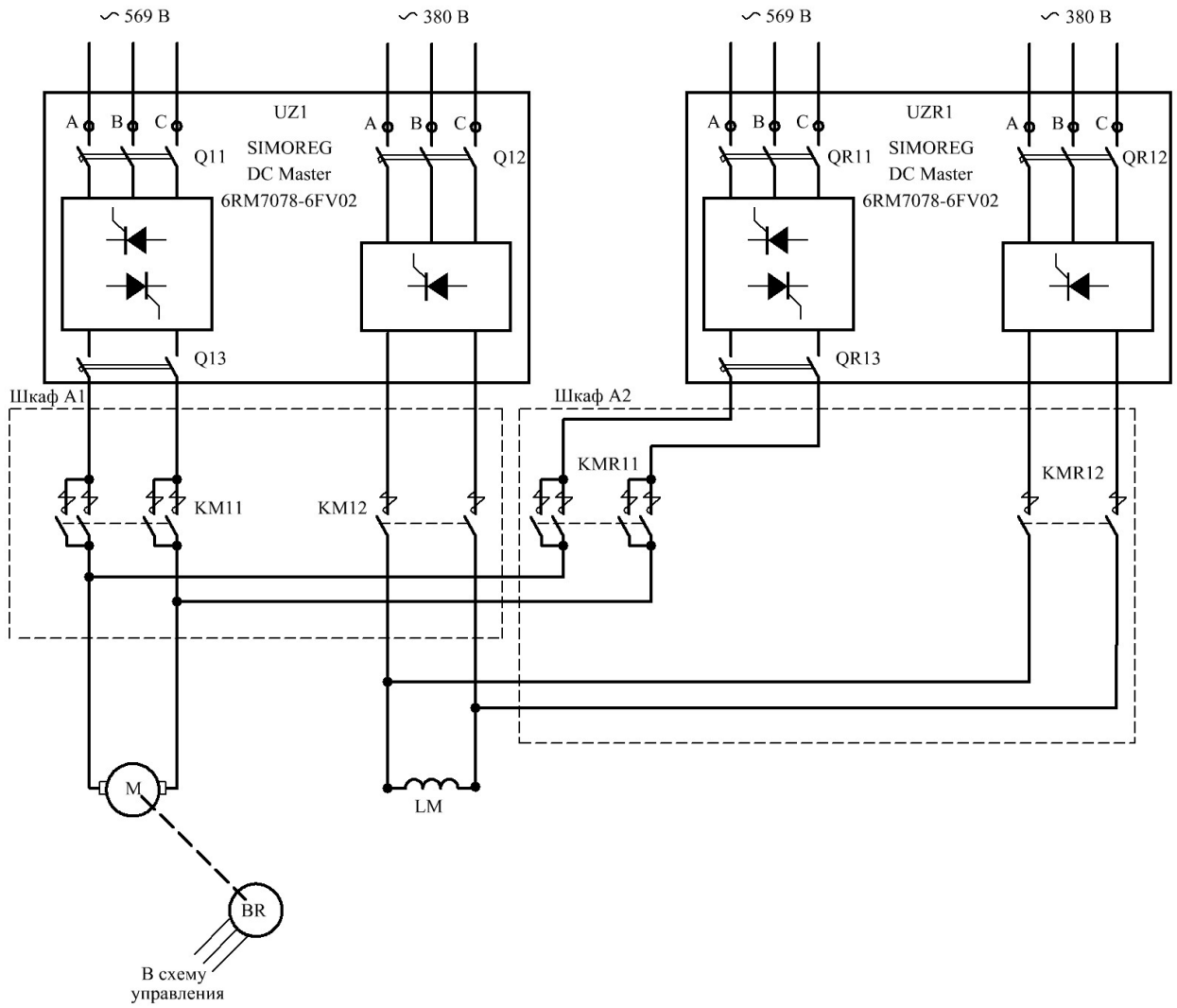


Рисунок 3.3 – Принципова схема силового ланцюга електроприводу станинних роликів перед чорнової кліттю

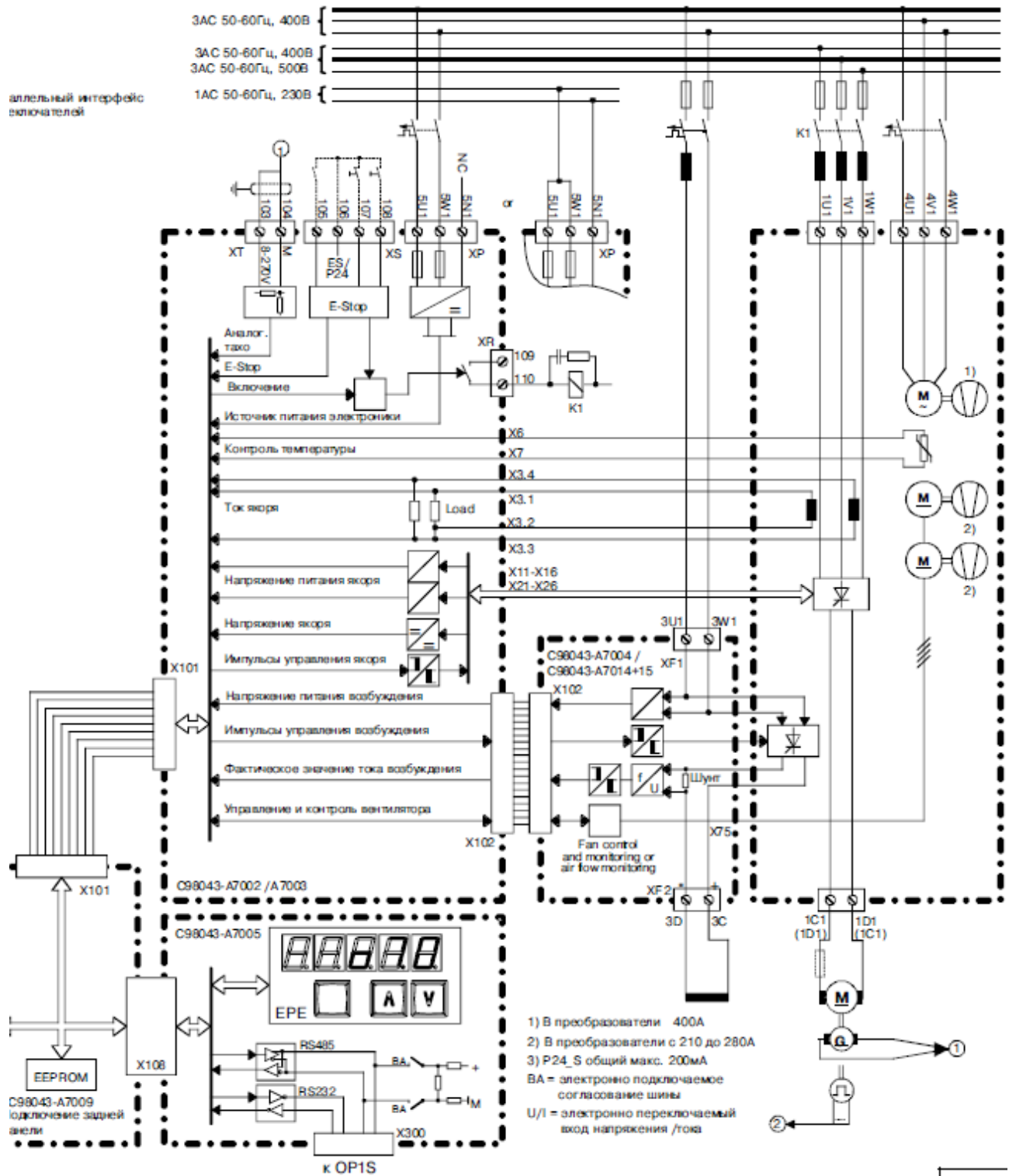


Рисунок 3.4 - Функціональна схема підключення (силова схема) тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

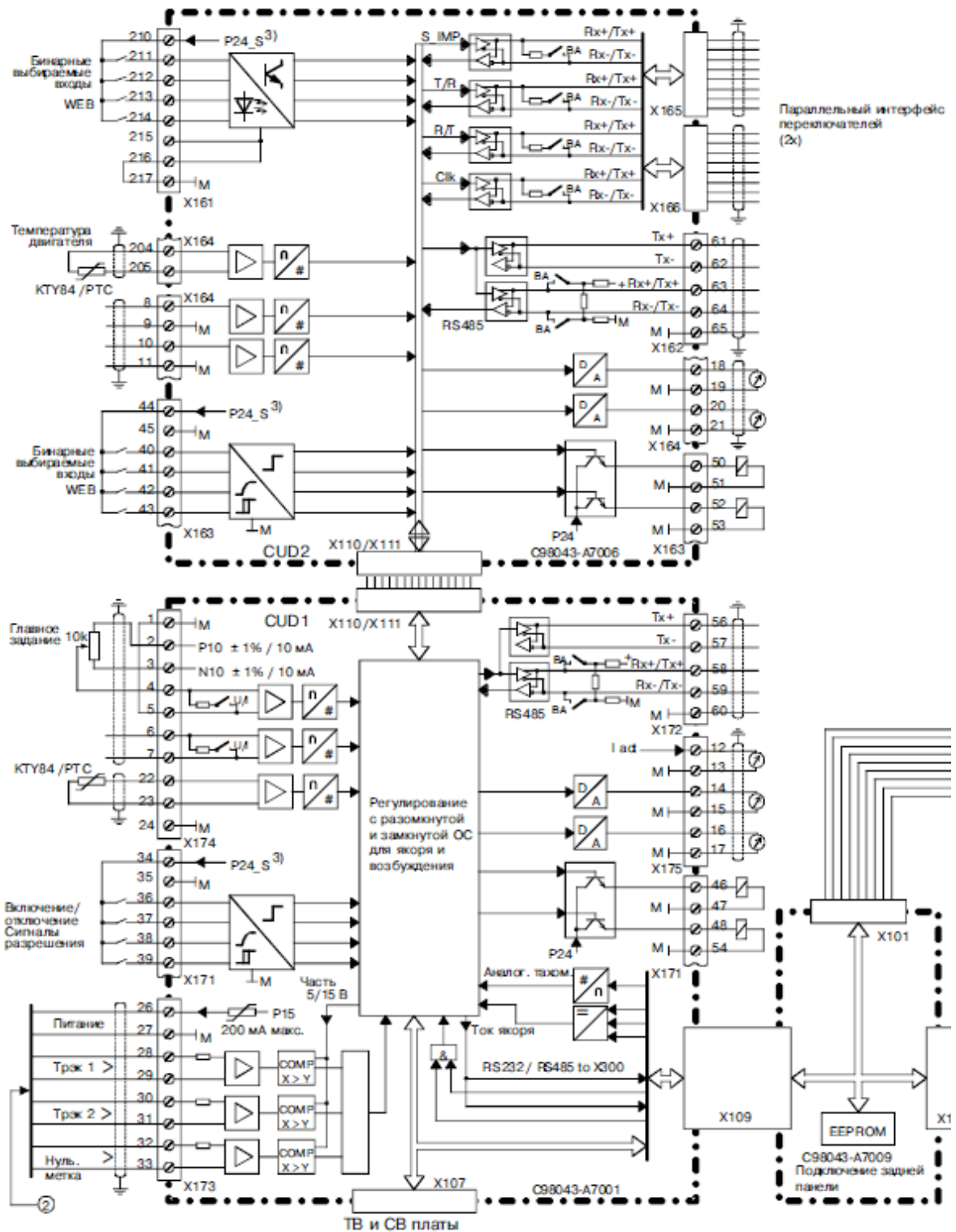


Рисунок 3.5 - Функціональна схема підключення (схема керування) тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

3.4.1 Джерела живлення електродвигунів (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

В якості резервного агрегату UZR1, для живлення електродвигунів застосований комплектний тиристорний електропривод SIMOREG DC Master SIMOREG DC Master 6RM7078-6FV02 (див. табл. 3.1). Схема перемикачів на резервний перетворювач наведена на рис. 3.2. Перемикач електродвигуна на живлення від резервного тиристорного перетворювача проводиться при відключеному живленні основних ланцюгів і зупиненому приводі.

3.5 Вимоги до системи автоматизації

Керування роботою станинних роликів - ручне і автоматичне.

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

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

Інші функції при необхідності забезпечуються розробником АСУТП. Узгодити швидкість станинних роликів зі швидкістю кліті рольгангів, що примикають.

Функції системи автоматизації

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

- збір і обробка інформації датчиків наявності металу, пірометрів, і ін.;
- зв'язок з іншими локальними системами по супроводу металу і обміну інформацією;
- зв'язок з електроприводами по шині Profibus і іншим радіальним каналам;
- ситуаційно-логічне керування комплексом;
- введення параметрів і вивід на кольорові монітори, друк протоколів (при необхідності);
- локальна діагностика несправності комплексу.

Технічні засоби, на яких створюється система 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 по трьох зонах:

- 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 станинними роликками перед і за чорною кліткою кварто здійснюється з поста керування чорною кліткою ПУЗ.

3.6 Математичний опис об'єкта керування

При синтезі системи керування затверджуються звичайні для систем електропривода допущення, лінеаризуючі 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 електропривода ухвалюються 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 у наступному. Керування ТП здійснюється дискретно, тому що після відмикання чергового тиристора зміна сигналу керування протягом деякого інтервалу часу не приводить 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 одержало назву неповної керуваності ТП.

У зв'язку із цим повне дослідження динамічних характеристик ТП є складним завданням, і на практиці застосовують різного роду спрощення. Найбільше поширення одержали два види моделей ТП: безперервна, у якій ТП представляється аперіодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{ТП}}$ і сталої часу

$\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ й імпульсна. Надалі, при синтезі САК буде використана безперервна

модель ТП.

Система регулювання обраного тиристорного перетворювача двохпроцесорна, усі регулятори (струму якоря, швидкості, е.р.с. двигуна, струму порушення й т.п.) побудовані з функціональних блоків, реалізованих програмно. Внаслідок того, що швидкодія мікропроцесорів досить висока, ресурсів, яких крім усього іншого вистачає для реалізації системи захистів і

сигналізації, здійснення моніторингу стану електропривода, діагностики збоїв і попереджень, інтерфейсу оператора й т.п., синтез системи регулювання може бути здійснений відповідно до традиційного настроювання контурів по модульному й симетричному оптимумах, 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. 3.7): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина двигуна) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативному зворотним зв'язком по е.р.с двигуна.

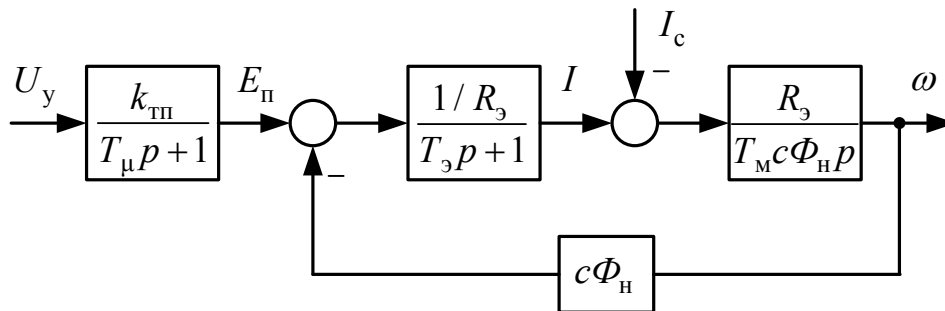


Рисунок 3.7 – Структурна схема силової частини електропривода

3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електропривода

Сумарний опір якорного ланцюга електродвигуна:

$$r_{я.дв} = \beta(r_{я} + r_{дп} + r_{к}) = 1,32(0,0533 + 0,01027 + 0,026) = 0,118 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

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

$r_{я} = 0,0533$ Ом - опір обмотки якоря (холодний) при 20°C ;

$r_{дп} = 0,01027$ Ом - опір додаткових полюсів (холодний);

$r_{к} = 0,026$ Ом - опір компенсаційної обмотки (холодний);

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_k = \frac{m_\phi \cdot x_a}{2\pi} = \frac{6 \cdot 33,035 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 31,546 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.10)$$

де $m_\phi = 6$ - число фаз випрямлення;

$x_a = 33,035$ мОм - повний опір силового трансформатора.

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

$$k_{\text{ТП}} = \frac{E_{d0}}{U_{y \text{ max}}} = \frac{768,15}{10} = 76,8 \quad (3.11)$$

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

$E_{d0} = 768,15$ В - значення максимально випрямленою ЕРС.

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_\Sigma &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_k + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,118 + 2(4,808 \cdot 10^{-3}) + 31,546 \cdot 10^{-3} + 11,8 \cdot 10^{-3} = 0,17 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $r_{\text{я.дв}} = 0,118$ Ом - активний опір якірного ланцюга двигуна;

$r_{\text{тр}} = 4,808$ мОм - активний опір силового трансформатора;

$r_k = 31,546$ мОм - комутаційний опір;

$r_{\text{ш}} = 0,1r_{\text{я.дв}} = 0,1 \cdot 0,118 = 11,8$ мОм - активний опір шин або кабелю, що

з'єднують ТП з якорем двигуна.

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$L_\Sigma = L_{\text{дв}} + 2L_{\text{тр}} = 16,633 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 105,154 \cdot 10^{-6} = 0,017 \text{ Гн} \quad (3.13)$$

Сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна:

$$J'_\Sigma = J_{\text{дв}} + J_p + J_m = 54,9 + 296,7 + 468,7 = 820,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.14)$$

де $J_{\text{дв}} = 54,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції електродвигуна (см. табл. 2.1);

$J_{\text{р}} = 296,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції роликів;

$J_{\text{м}} = 468,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції транспортованого злитка, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я.дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{440 - 248 \cdot 0,118}{16,75} = 24,5 \text{ Вс} \quad (3.15)$$

де $\omega_{\text{н}} = 16,75 \text{ 1/с}$ - номінальна швидкість електродвигуна.

Електромагнітна стала часу системи ТП-Д:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = \frac{0,017}{0,17} = 0,1 \text{ с} \quad (3.16)$$

Електромеханічна стала часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = \frac{J'_{\Sigma} R_{\text{э}}}{c\Phi_{\text{н}}^2} = \frac{820,3 \cdot 0,17}{24,5^2} = 0,23 \text{ с} \quad (3.17)$$

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

3.8 Синтез регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму будемо вважати, що електромеханічна стала часу набагато більша електромагнітної постійної часу $T_{\text{э}}$. Можна також зневажати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, вважаючи її збурюючим впливом у контурі струму.

Структурна схема контуру струму представлена на рисунку 3.8.

У якості малої сталої часу контуру струму затверджуємо малу сталу ТП $T_{\mu} = 5 \text{ мс}$. Налаштовуємо контур струму на модульний оптимум.

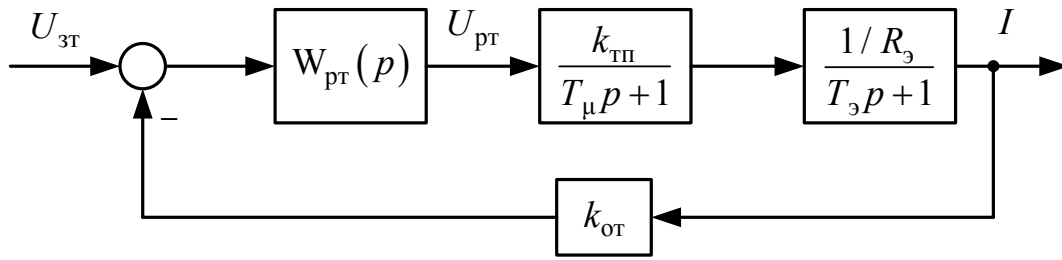


Рисунок 3.8 - Структурна схема контуру струму

Передатна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{пт}}^{\text{м}}(p) = \frac{R_{\text{э}}(T_{\text{э}}p + 1)}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}2T_{\mu}p} = \frac{R_{\text{э}}(T_{\text{э}}p + 1)}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}p} = k_{\text{птп}} + \frac{k_{\text{птИ}}}{p} \quad (3.17)$$

Пропорційна та інтегральна частина Пі-регулятора струму:

$$k_{\text{птп}} = \frac{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}} = \frac{0,17 \cdot 0,1}{76,8 \cdot 0,016 \cdot 0,01} = 1,383 \quad (3.18)$$

$$k_{\text{птИ}} = \frac{R_{\text{э}}}{k_{\text{тп}}k_{\text{от}}T_{\text{от}}} = \frac{0,17 \cdot 0,1}{76,8 \cdot 0,016 \cdot 0,01} = 13,835 \quad (3.19)$$

де $T_{\text{э}}$ – електромагнітна стала часу системи ТП-Д;

$k_{\text{тп}}$ – коефіцієнт передачі ТП по напрузі;

$k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт.мак}}}{I_{\text{мак}}} = \frac{10}{620} = 0,016$ В/А – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язка по струму;

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

$I_{\text{мак}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 248 = 620$ 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 настроюванні на модульний оптимум.

Функціональну схему контуру регулювання струму якоря, реалізовану у перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлено на рис 3.9. Розраховані величини пропорційної й інтегральної частин регулятора струму

при налагодженні електропривода необхідно встановити в параметрах P155.F і P156.F відповідно.

Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якоря двигунів використовується канал аналогового входу (клеми X173.4 і X173.5 на рис. 3.10), на який подається напруга з датчика напруги, підключеного до вимірювального шунта. Шунт необхідно встановити у якірному ланцюзі двигуна. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем A/D, нормується за величиною до 100% параметром P701.F і далі при необхідності інвертується за допомогою параметра P703, програмно фільтрується й на виході конектора K0011 виходить програмний сигнал, пропорційний реальному току.

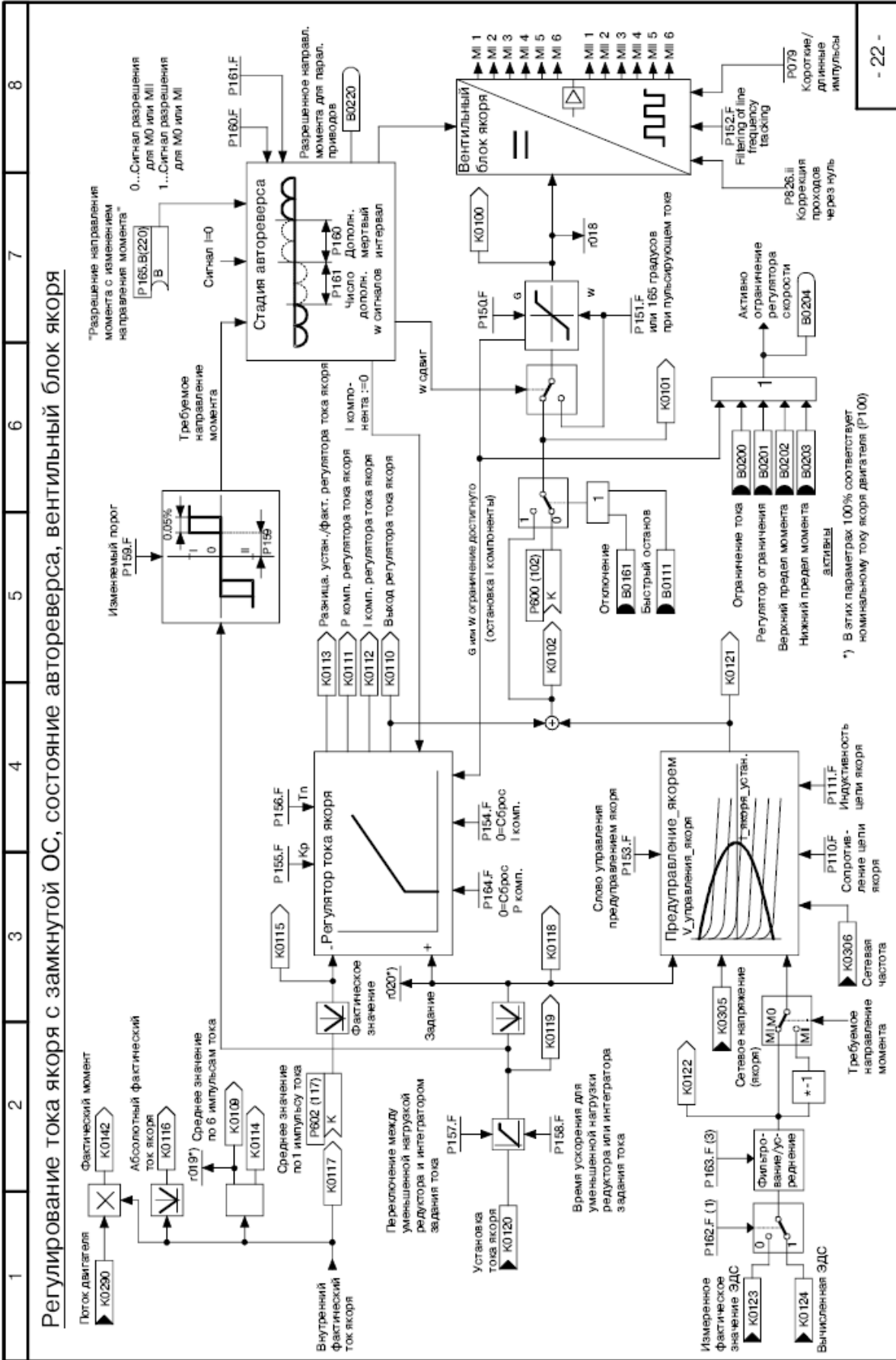


Рисунок 3.9 – Функціональна схема контуру регулювання струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

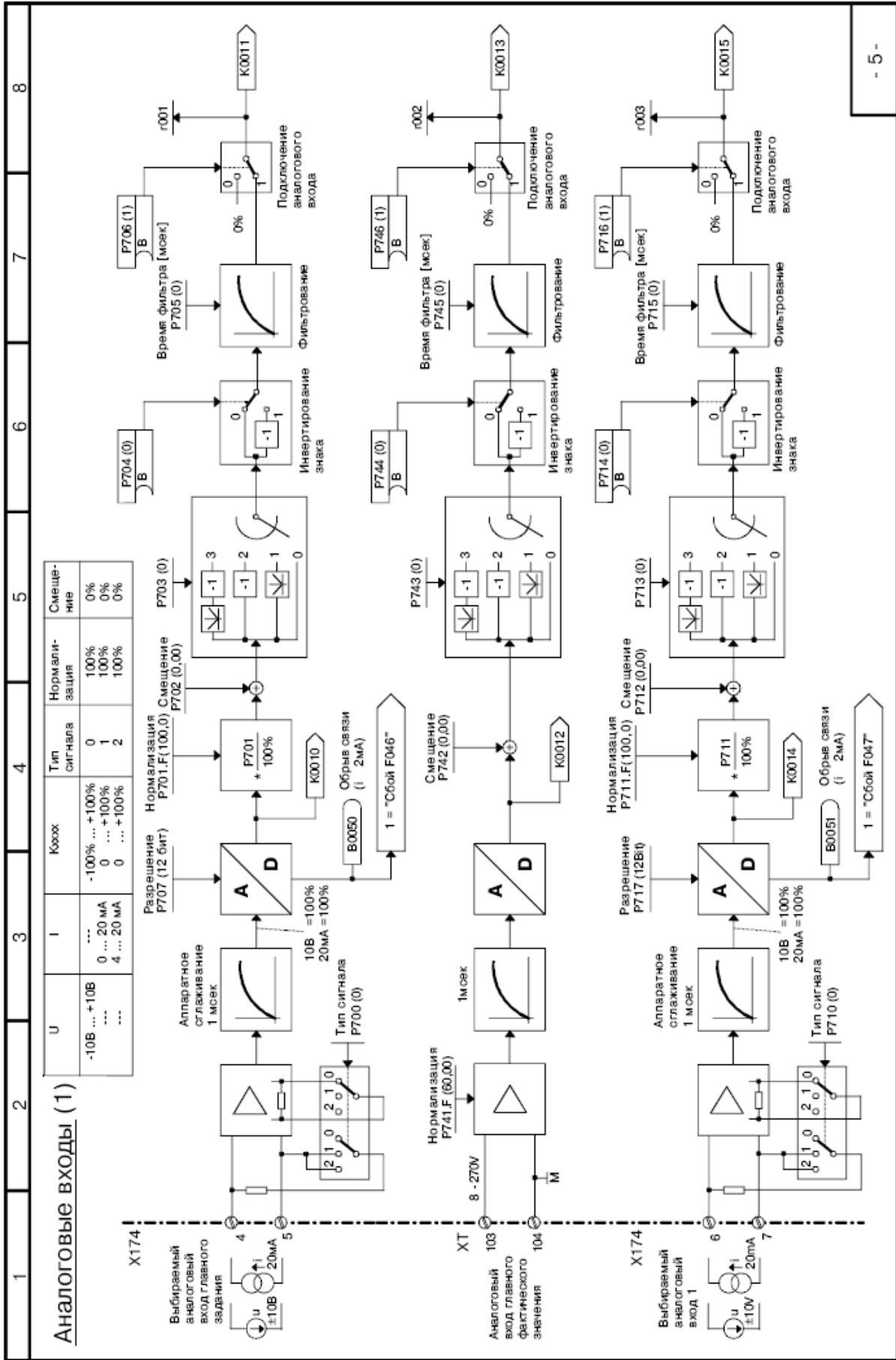


Рисунок 3.10 – Канал формирования сигнала зворотного зв'язку по струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

3.9 Синтез регулятора швидкості

Структурну схему контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки T_μ - мала стала часу, то добутком $T_{от}T_\mu$ можна зневажити) наведено на рисунку 3.11.

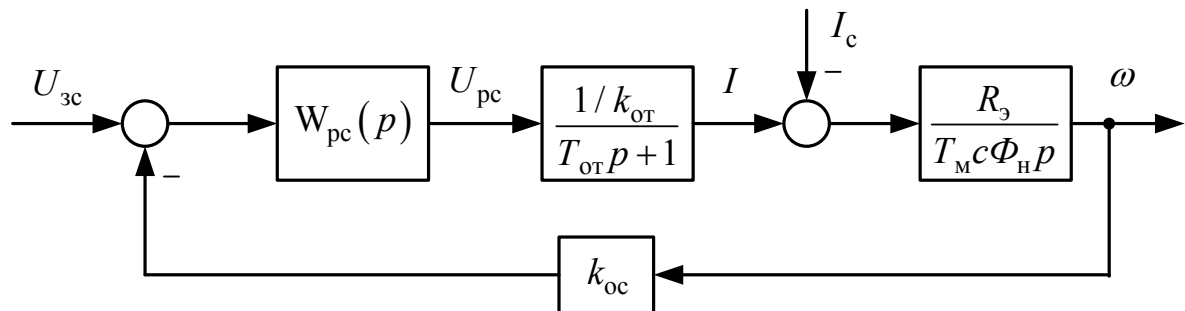


Рисунок 3.11 - Структурна схема контуру швидкості

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. У цьому випадку передатна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{pc}^c(p) = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{от}} \frac{4T_{от}p + 1}{4T_{от}p} = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} \frac{2T_{ос}p + 1}{2T_{ос}p} = k_{pc\Pi} + \frac{k_{pcИ}}{p} \quad (3.20)$$

Пропорційна та інтегральна частина ПІ-регулятора швидкості:

$$k_{pc\Pi} = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} = \frac{0,23 \cdot 24,5 \cdot 0,016}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,02} = 75,1 \quad (3.21)$$

$$k_{pcИ} = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{от}^2} = \frac{0,23 \cdot 24,5 \cdot 0,016}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 2 \cdot 0,02^2} = 1878,4 \quad (3.22)$$

де T_M – електромеханічна стала часу системи ТП-Д;

$$k_{ос} = \frac{U_{зс.max}}{\omega_{max}} = \frac{10}{16,75} = 0,6 \text{ Вс} \text{ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного}$$

зв'язку по швидкості;

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

$\omega_{\max} = \omega_H = 16,75 \text{ 1/c}$ – максимальна швидкість електродвигуна;

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

Для зниження перерегулювання швидкості при налаштуванні контурів на симетричний оптимум на його вході, встановлюємо фільтр з передавальної функцією:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} \quad (3.23)$$

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

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.12. Розраховані величини пропорційної й інтегральної частин регулятора швидкості при налагодженні електропривода 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.

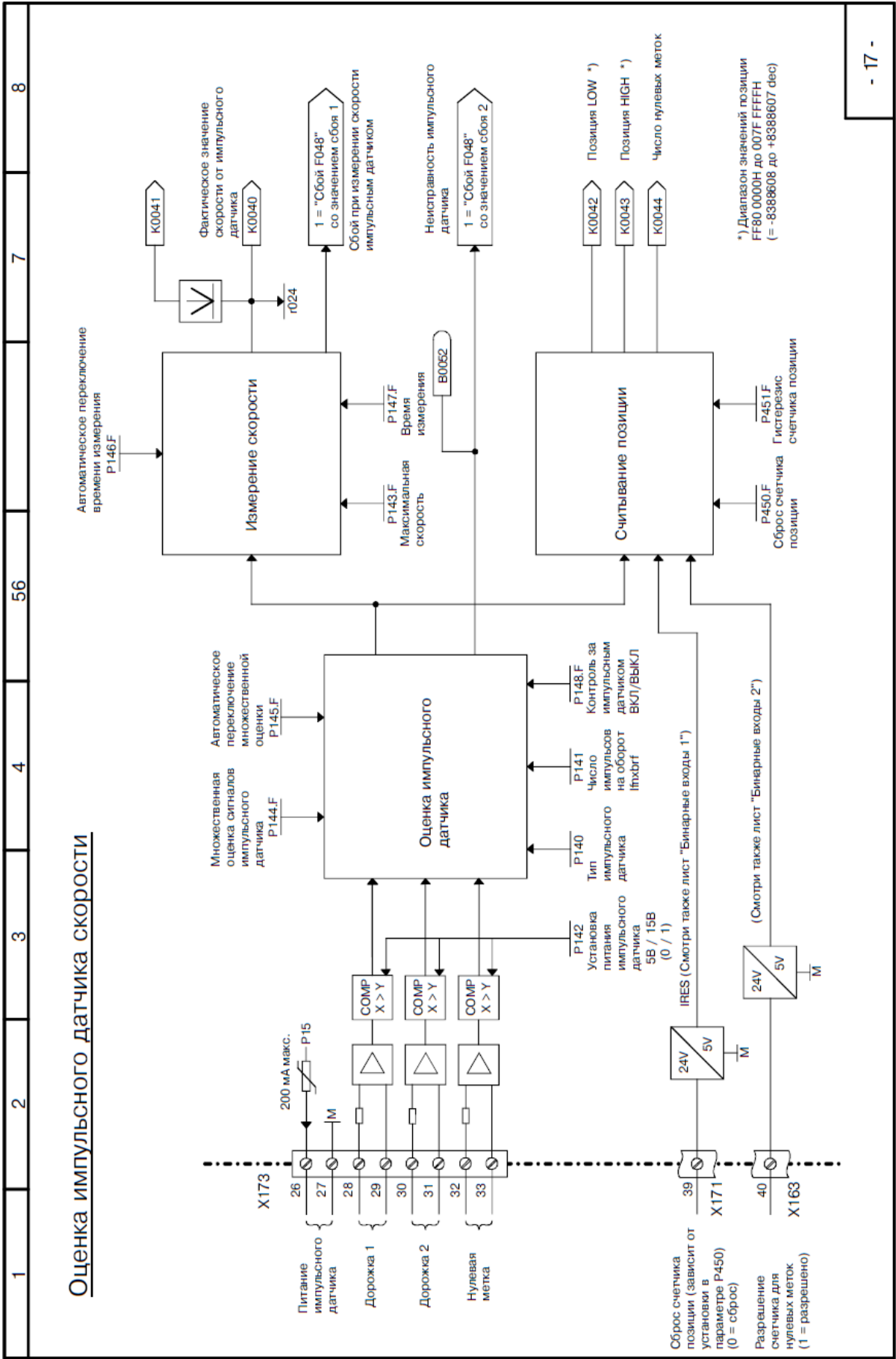


Рисунок 3.13 – Функціональна схема регулятора швидкості у перетворювачі SIMOREG DC Master

3.10 Розрахунки задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону й гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим вставки токообмеження ($I_{\max} = 2,5I_{\text{н}}$) необхідно на вході регулятора швидкості встановити задатчик інтенсивності швидкості (ЗІШ). Він перетворить східчастий сигнал завдання швидкості в лінійно мінливий сигнал у часі. Значення напруги виходу ЗІШ, що встановилося, яке подається на вхід регулятора швидкості, дорівнює вхідному сигналу. Структурна схема задатчика інтенсивності наведена на рисунку 3.14.

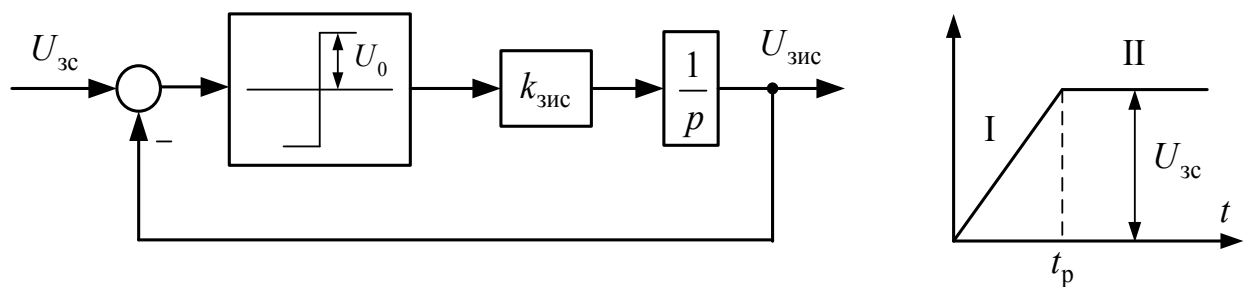


Рисунок 3.14 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідні напруги задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{I}} = U_0 k_{\text{зис}} t_p = \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{м}} c \Phi_{\text{н}}} \frac{I_{\text{дин}} U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{з.уст}}} t_p \quad (3.24)$$

II ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{II}} = U_{\text{зс}} \quad (3.25)$$

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

$\omega_{\text{з.уст}} = 13,85$ 1/с – усталена швидкість (швидкість транспортування злитка), відповідна $U_{\text{зс}}$;

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

$U_0 = 10$ В - полка релейного елемента.

Зі співвідношення (3.24) визначимо час розгону двигуна до встановленої швидкості:

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_H}{R_3} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} \text{ с} \quad (3.26)$$

Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p}, \text{ В/с} \quad (3.27)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.15.

На рисунку 3.16 наведена структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування електропривода.

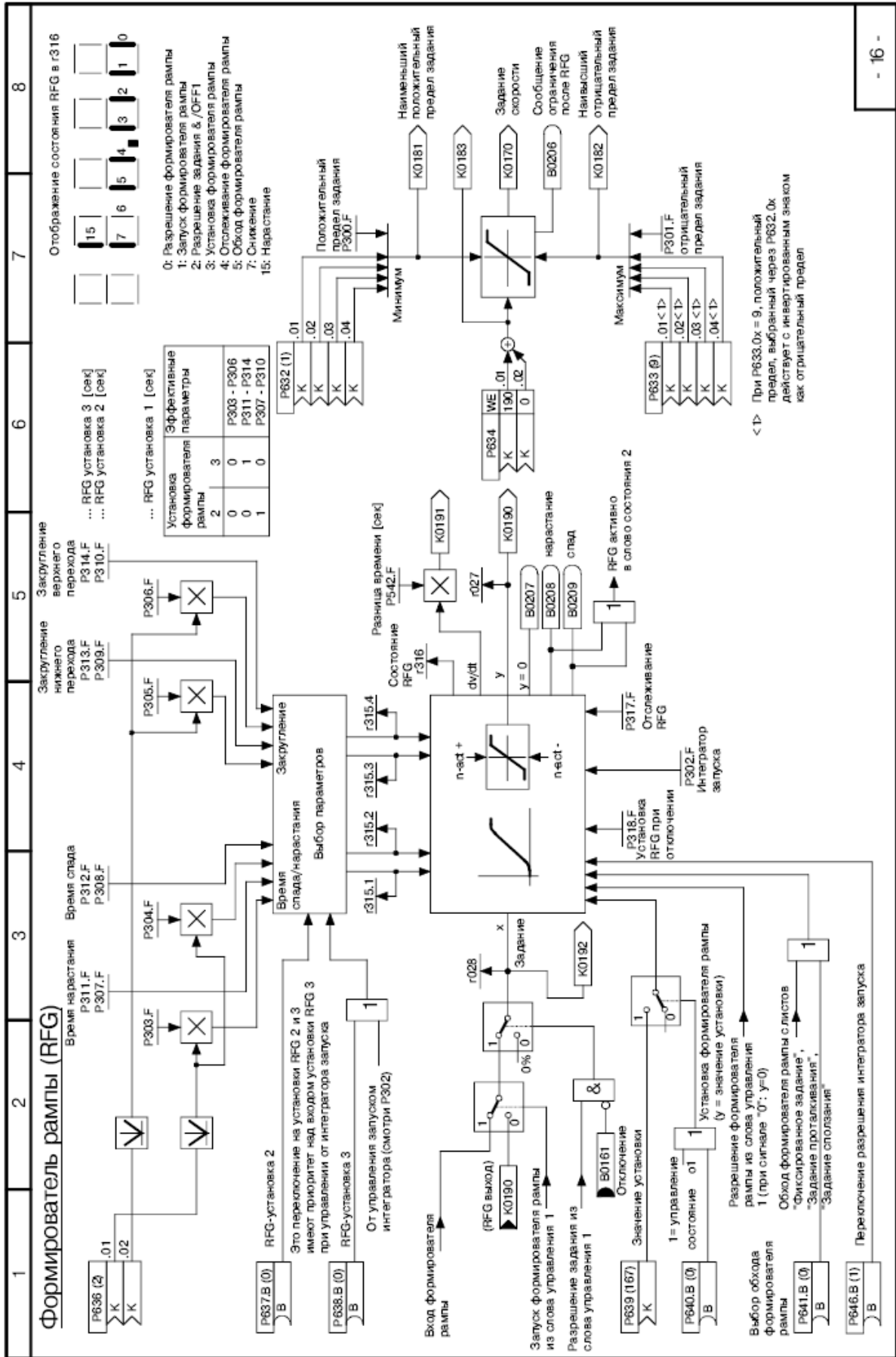


Рисунок 3.15 – Функциональна схема задачика інтенсивності в перетворювачі SIMOREG DC Master

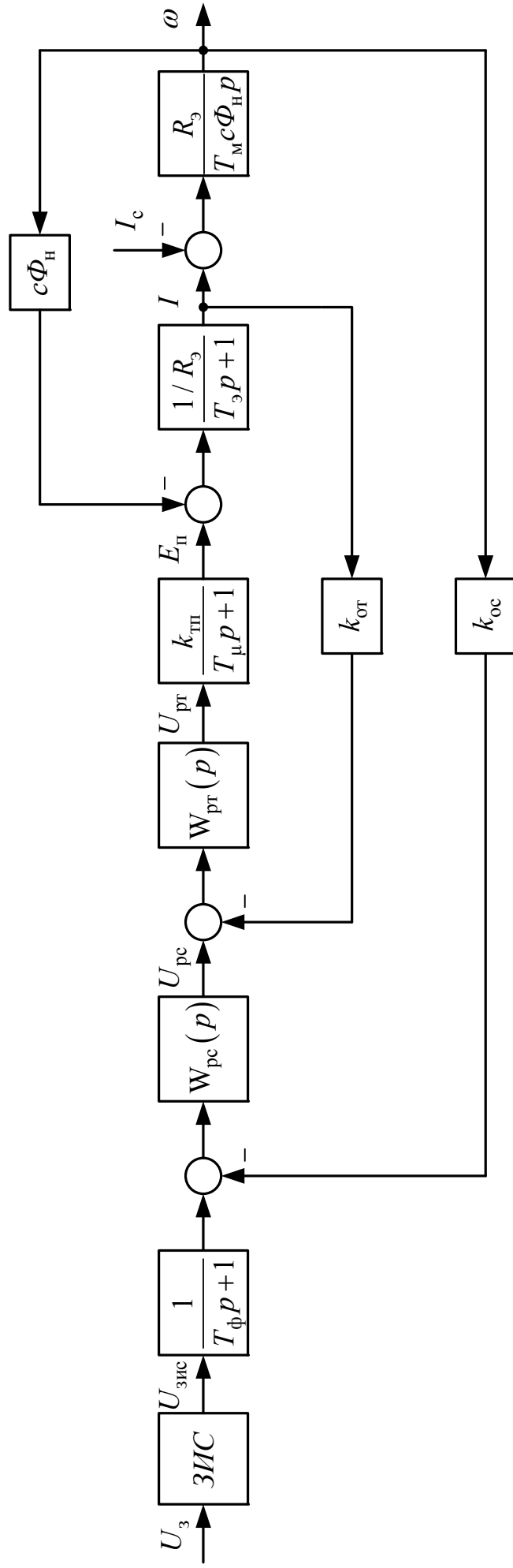


Рисунок 3.16 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

3.11 Моделювання електроприводу станинних роликів з підпорядкованою системою керування в середовищі Matlab/Simulink

Цифрове моделювання розрахованої системи здійснюється в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводом ножиців, що має у своєму составі ПІ-регулятор струму, ПІ-регулятор швидкості й задатчик інтенсивності швидкості наведена на рис. 3.17. Внутрішні структури підсистем (Subsystem) типових вузлів схеми наведені на рис. 3.18 - 3.19.

При реалізації регуляторів струму й швидкості в цифровій моделі враховувалося їхнє насичення. Наприклад, при побудові моделі ПІ-регулятора недостатньо обмежити тільки лише 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. Із цієї причини використання стандартного блоку PID-controller, представленого в бібліотеці Simulink Extras/Additional Lincer неприпустимо. Моделі регуляторів коректно враховують поріг насичення регулятора $U_{y.max} = 10$ В (див. рис. 3.20).

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 при номінальних параметрах об'єкта керування, так і при їхній варіації наведено на рис. 3.21 - 3.00.

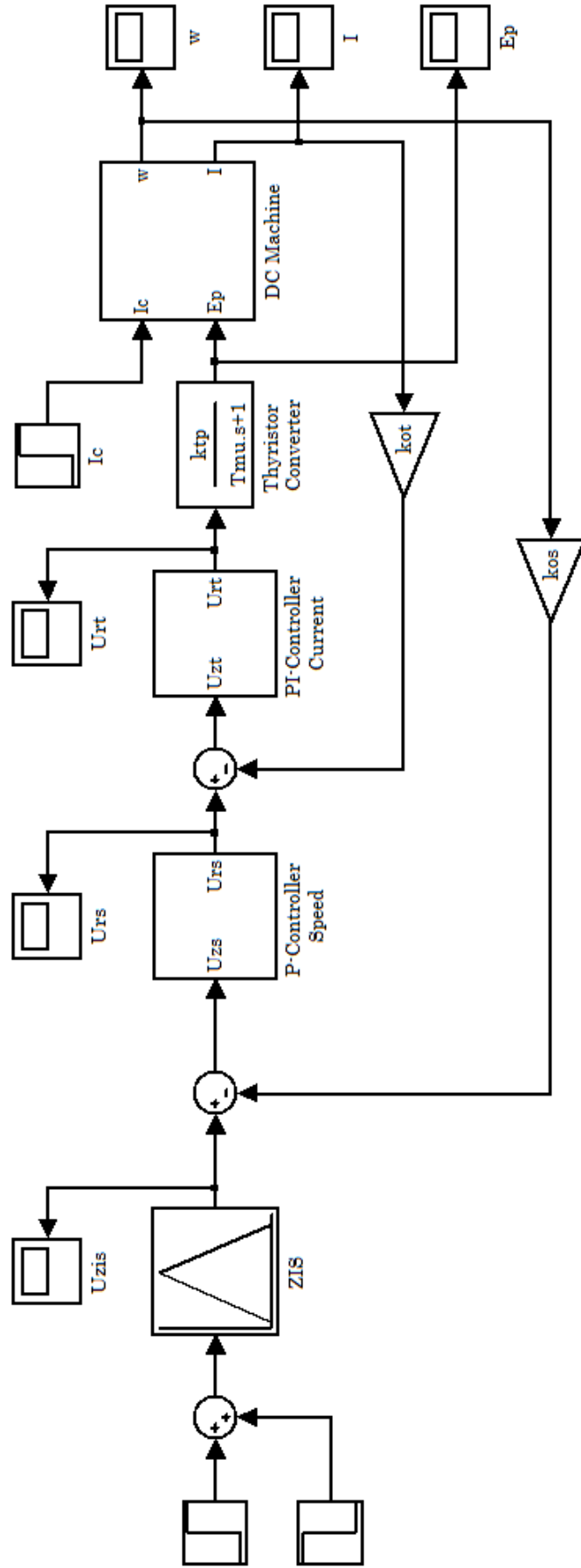


Рисунок 3.17 – Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування

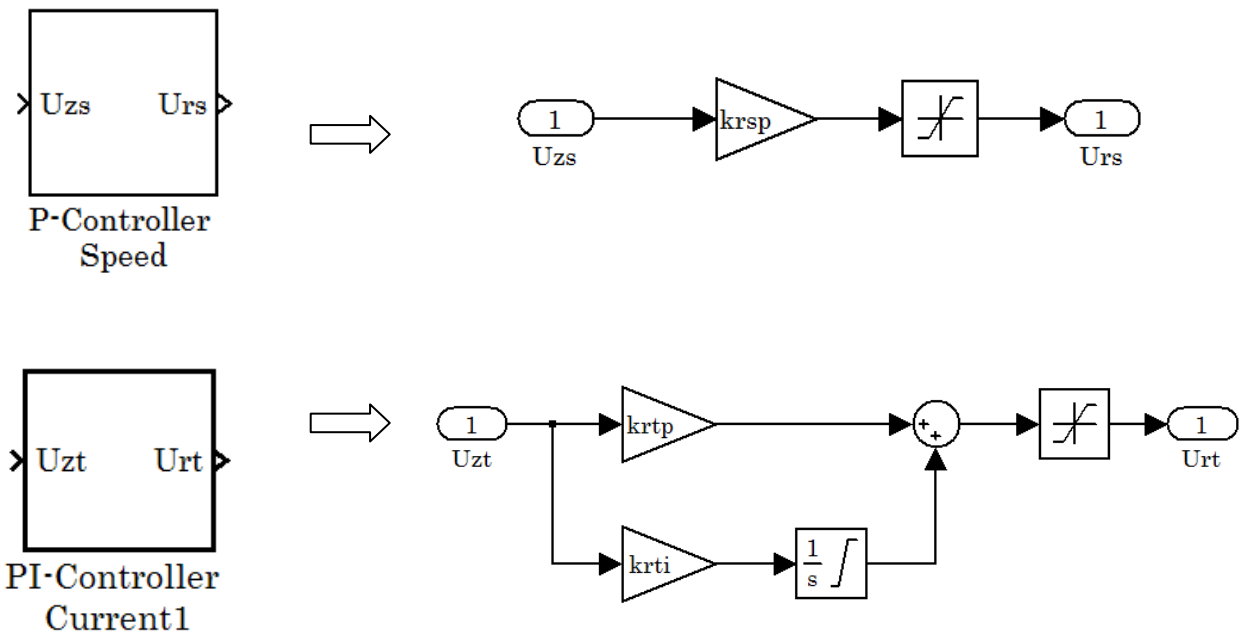


Рисунок 3.18 – Підсистема «ПІ-регулятор» струму (PI-controller Current) і швидкості (P-Controller Speed), що враховує поріг насичення регулятора

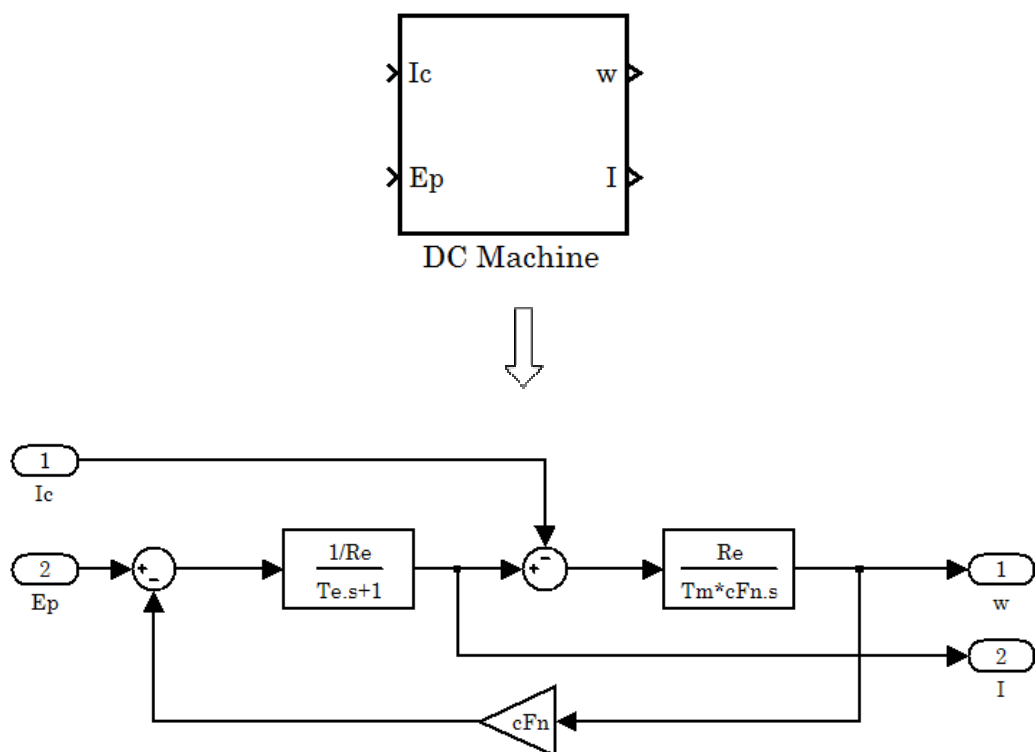


Рисунок 3.19 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

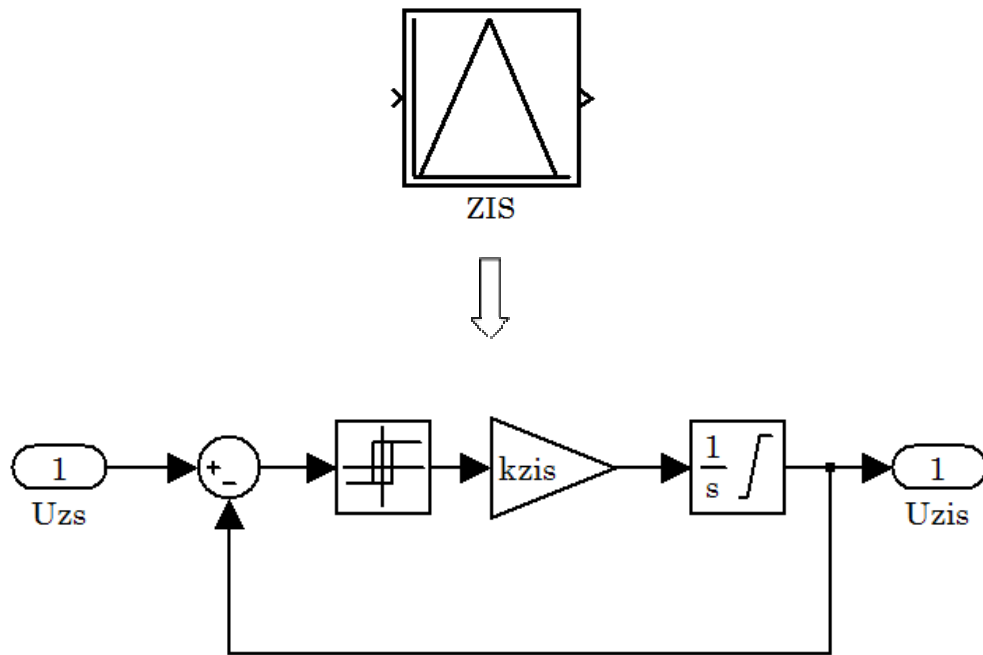


Рисунок 3.20 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), що реалізує раціональну динаміку

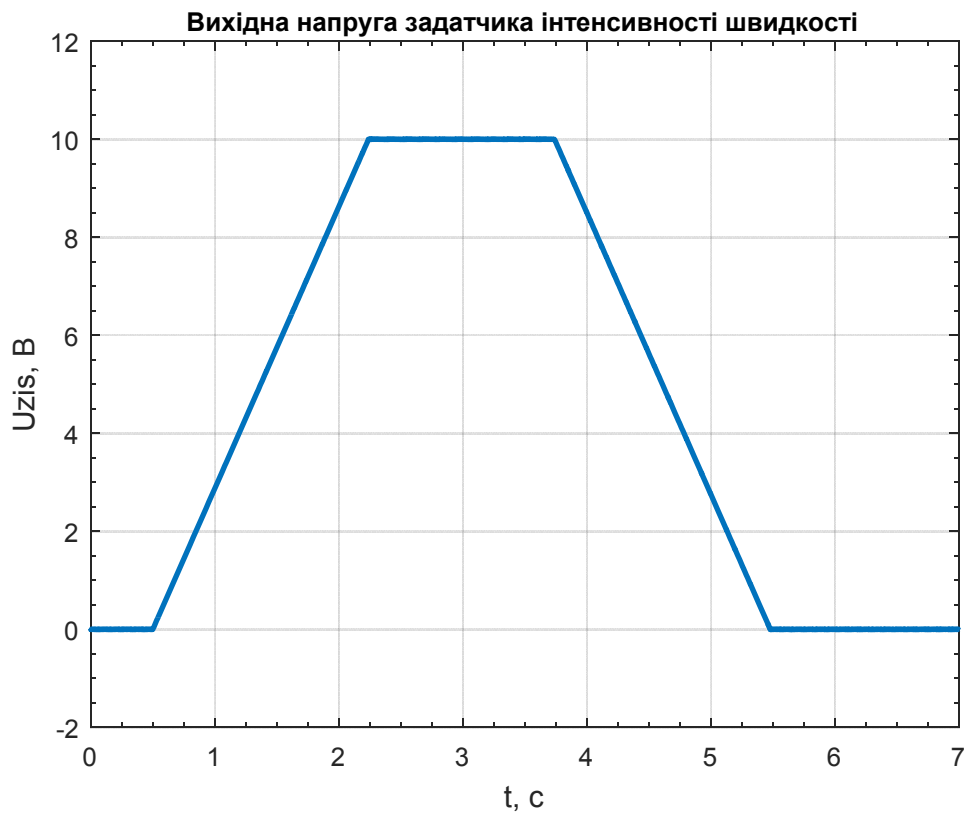


Рисунок 3.21 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості

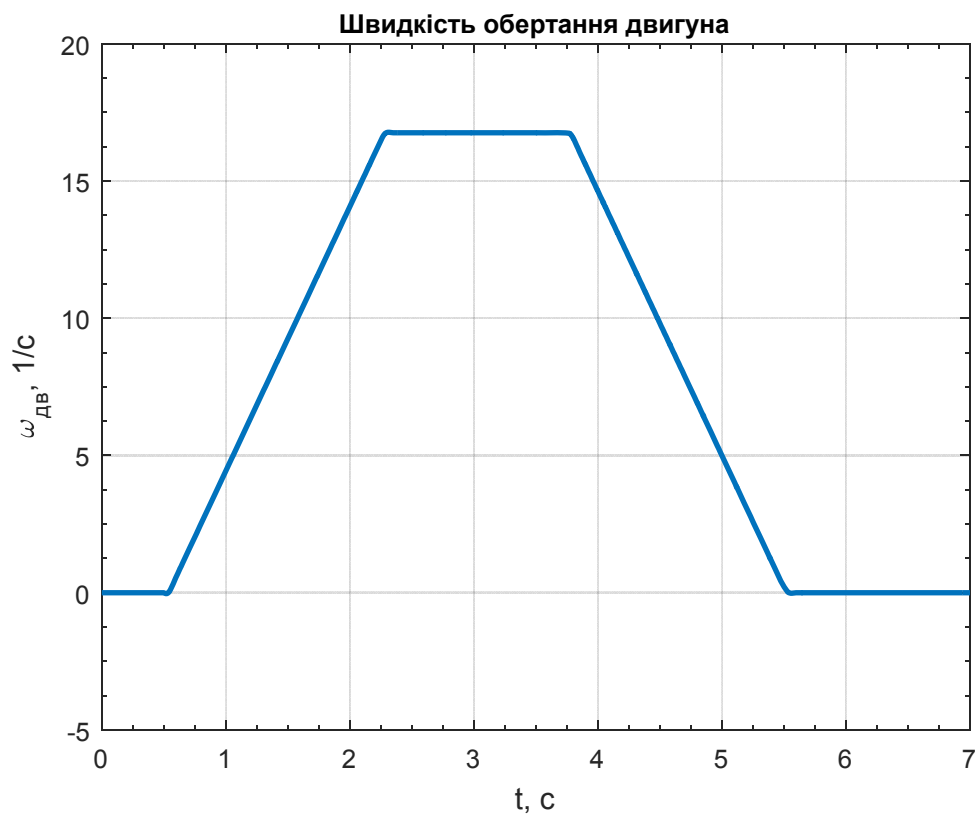


Рисунок 3.22 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ($I_c = 0,4I_H$)

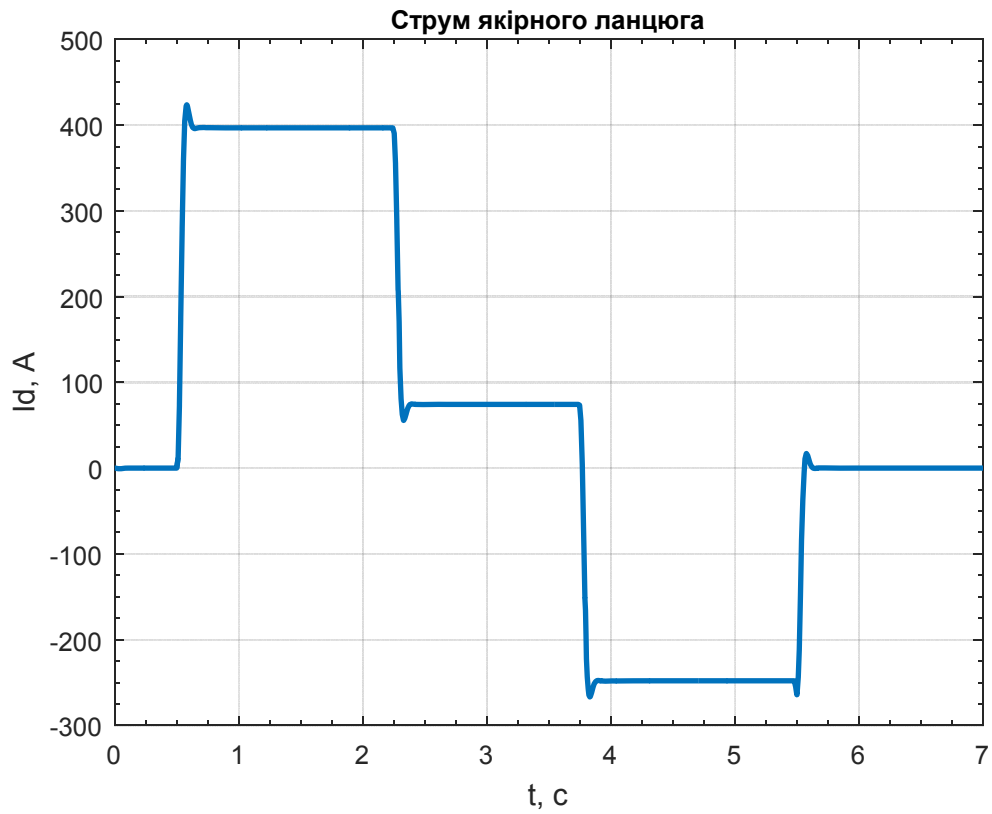


Рисунок 3.23 – Графік перехідного процесу струму якоря ($I_c = 0,3I_H$)

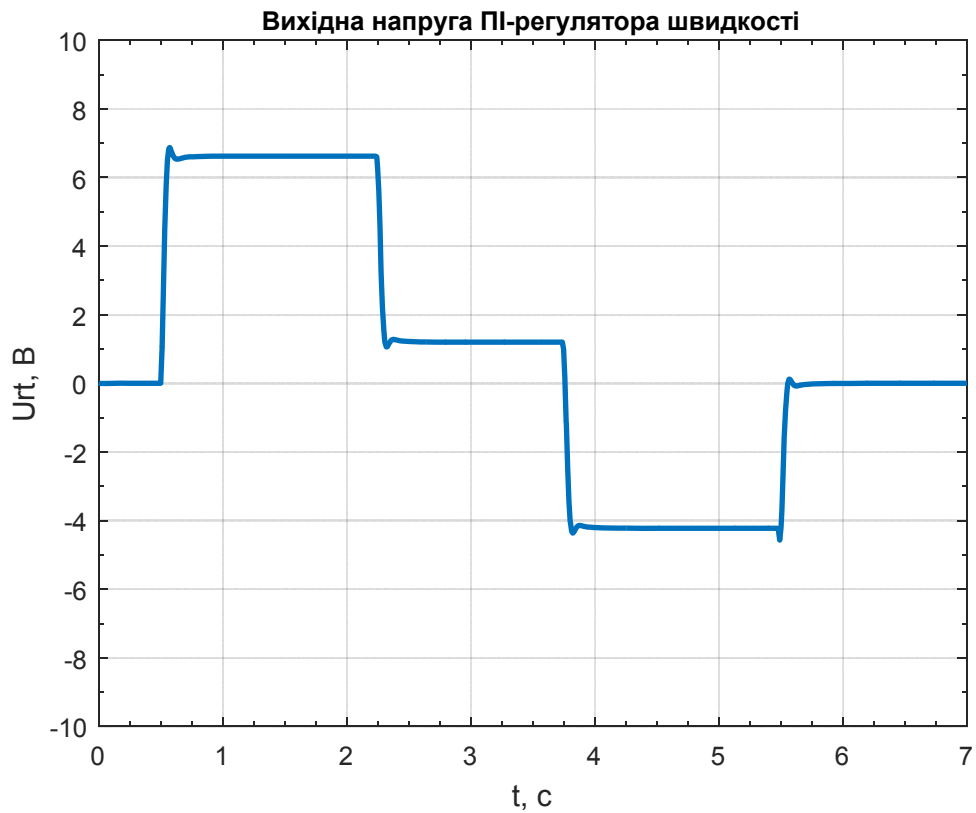


Рисунок 3.24 – Графік перехідного процесу напруги ПІ-регулятора швидкості ($I_c = 0,3I_H$)

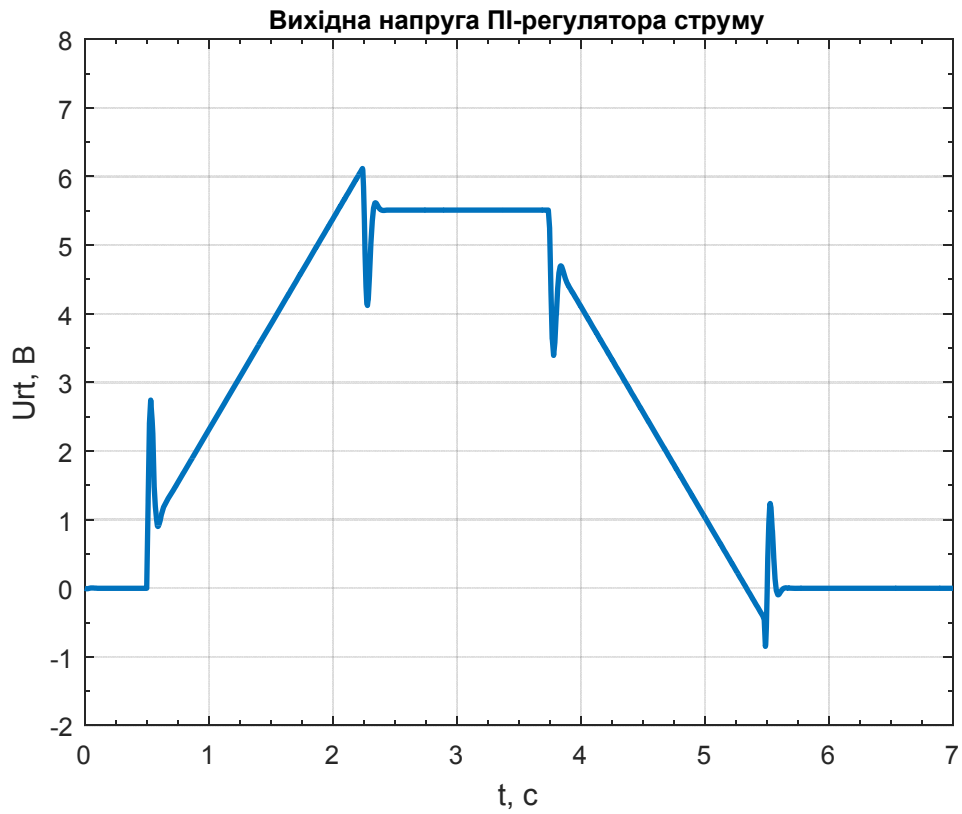


Рисунок 3.25 – Графік перехідного процесу напруги
ПІ-регулятора струму ($I_c = 0,3I_H$)

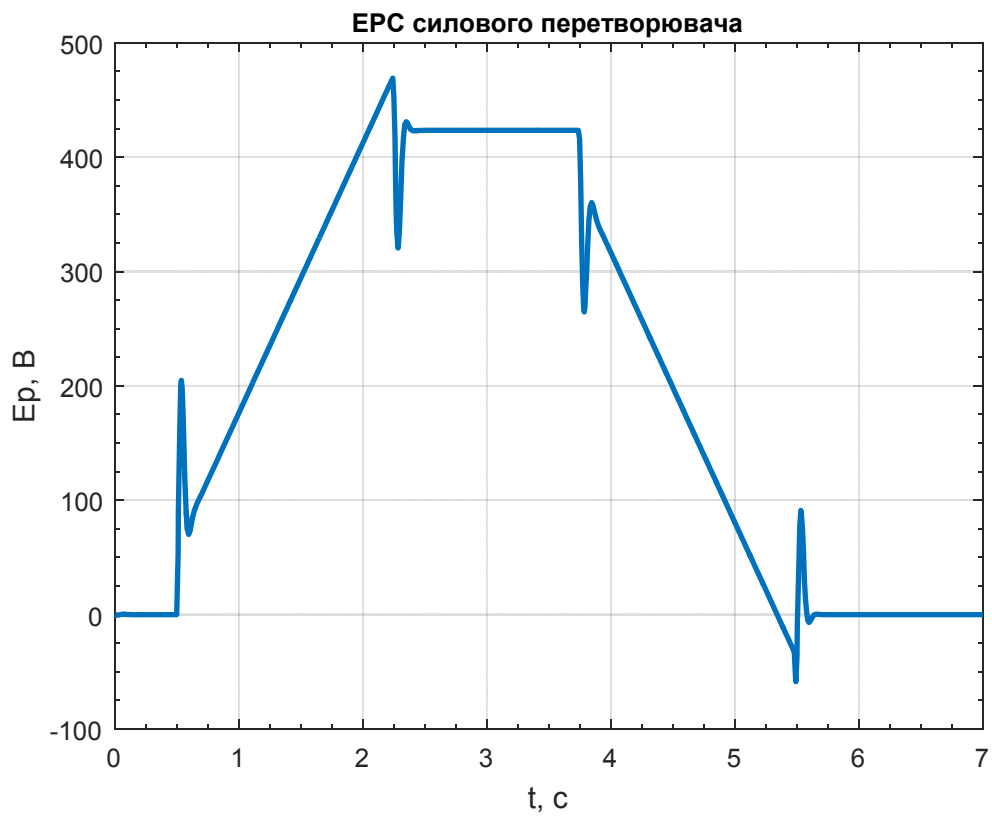


Рисунок 3.26 – Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного
перетворювача ($I_c = 0,3I_H$)

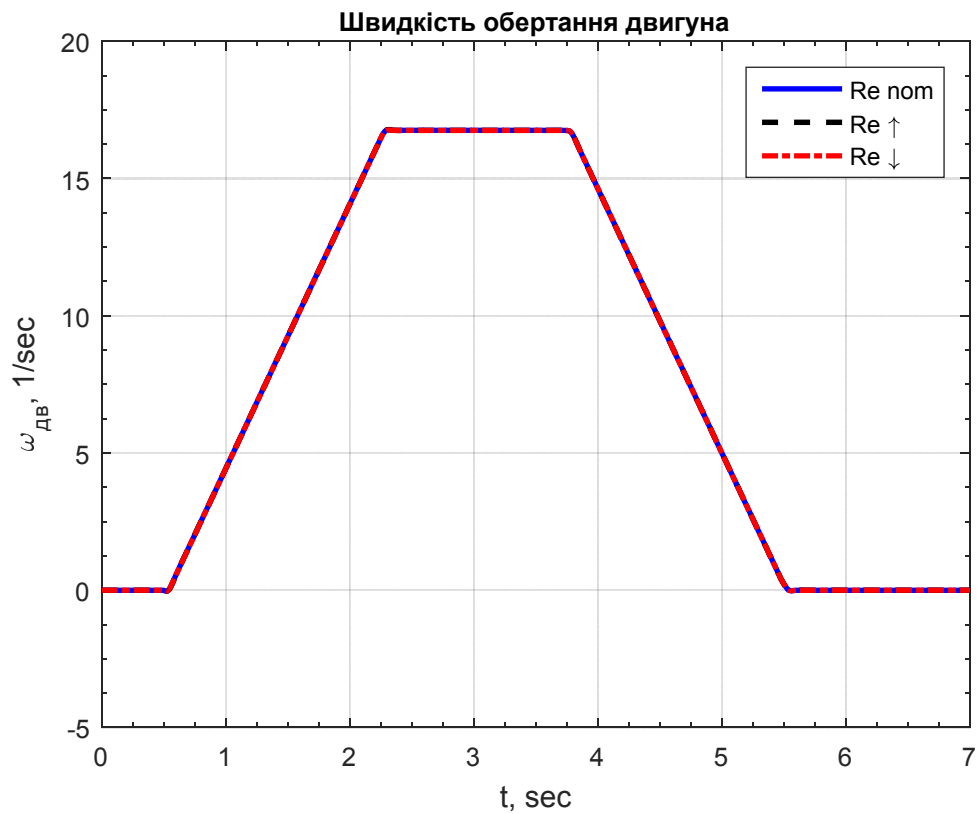


Рисунок 3.27 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні R_s в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

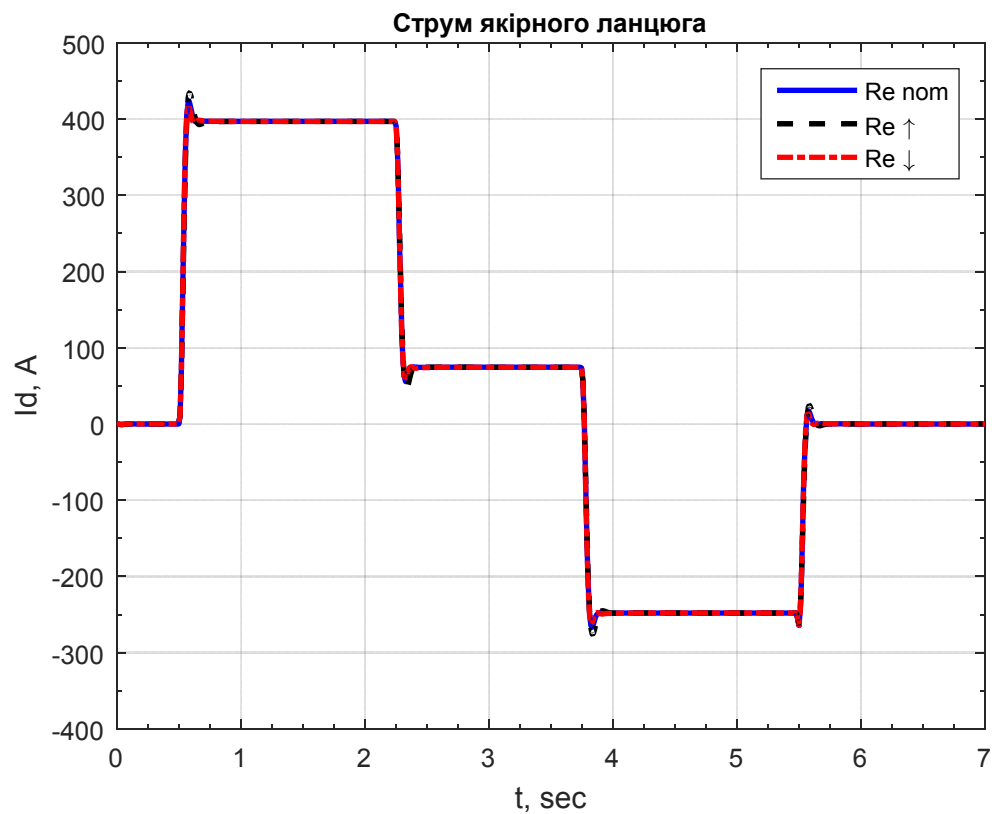


Рисунок 3.28 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні R_s в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

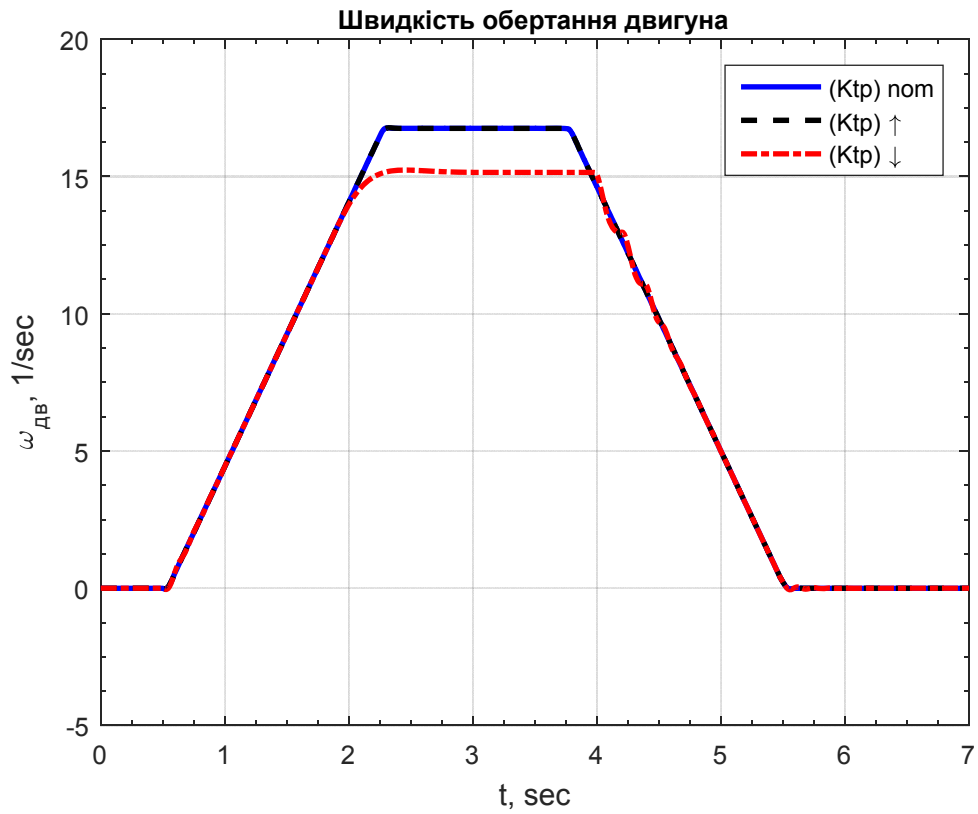


Рисунок 3.29 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні k_{tr} в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

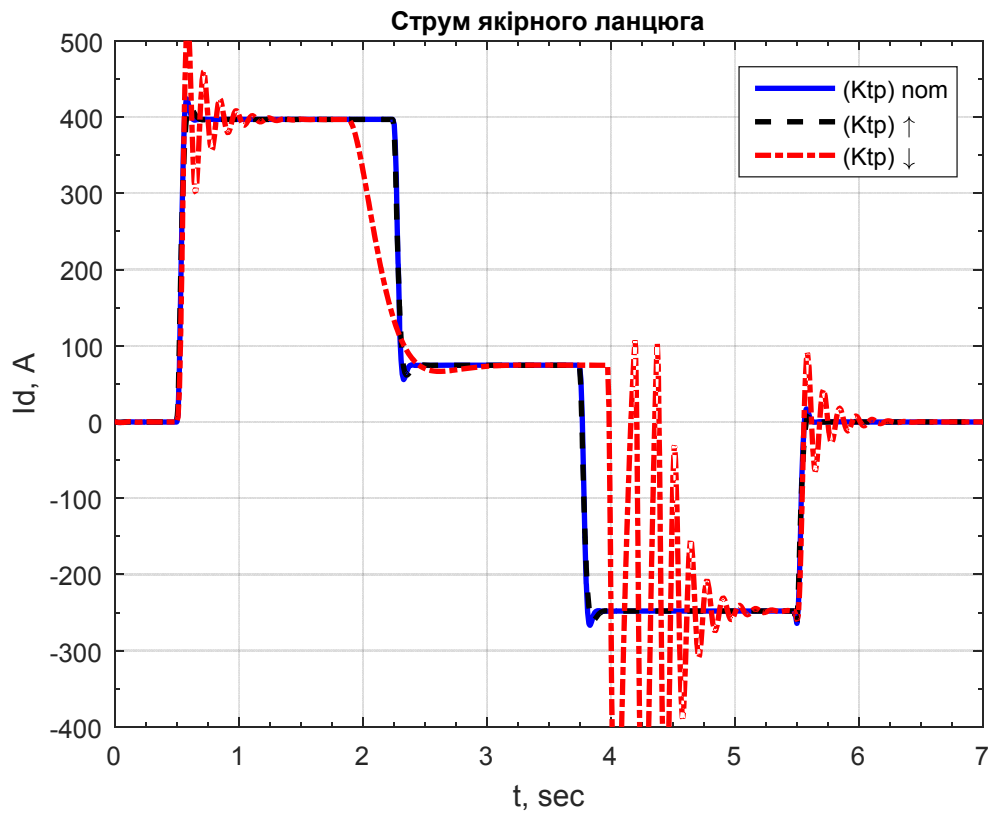


Рисунок 3.30 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні k_{tr} в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

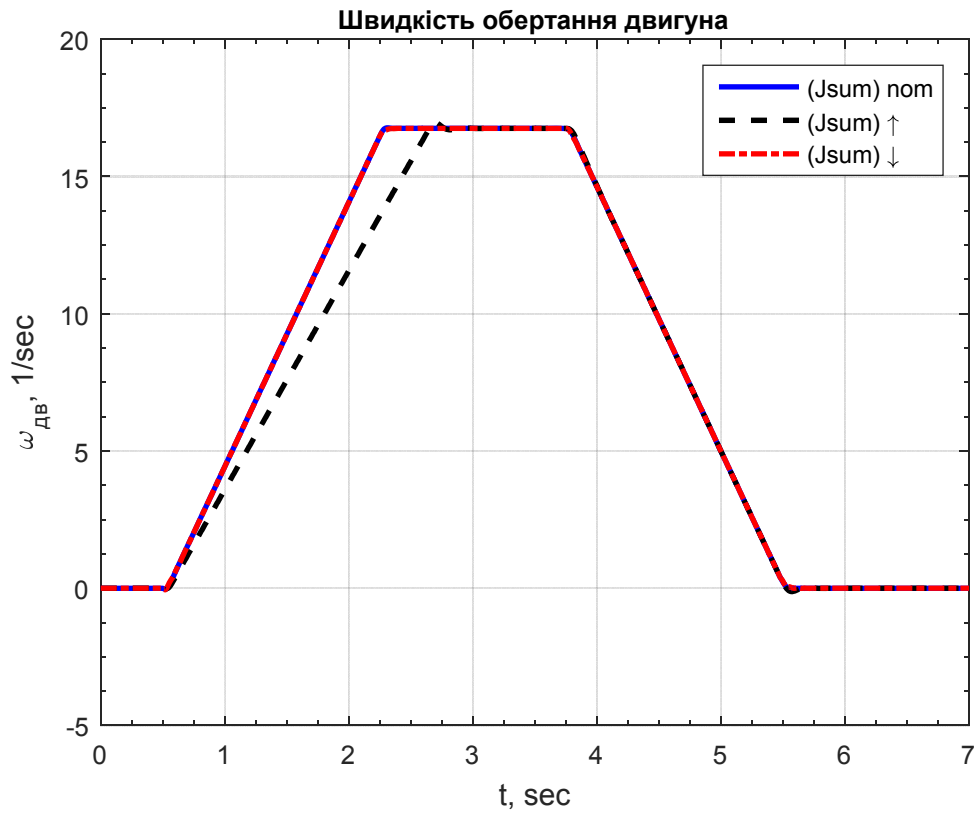


Рисунок 3.31 – Графіки переходного процесу швидкості обертання двигуна при зміні J'_{Σ} в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

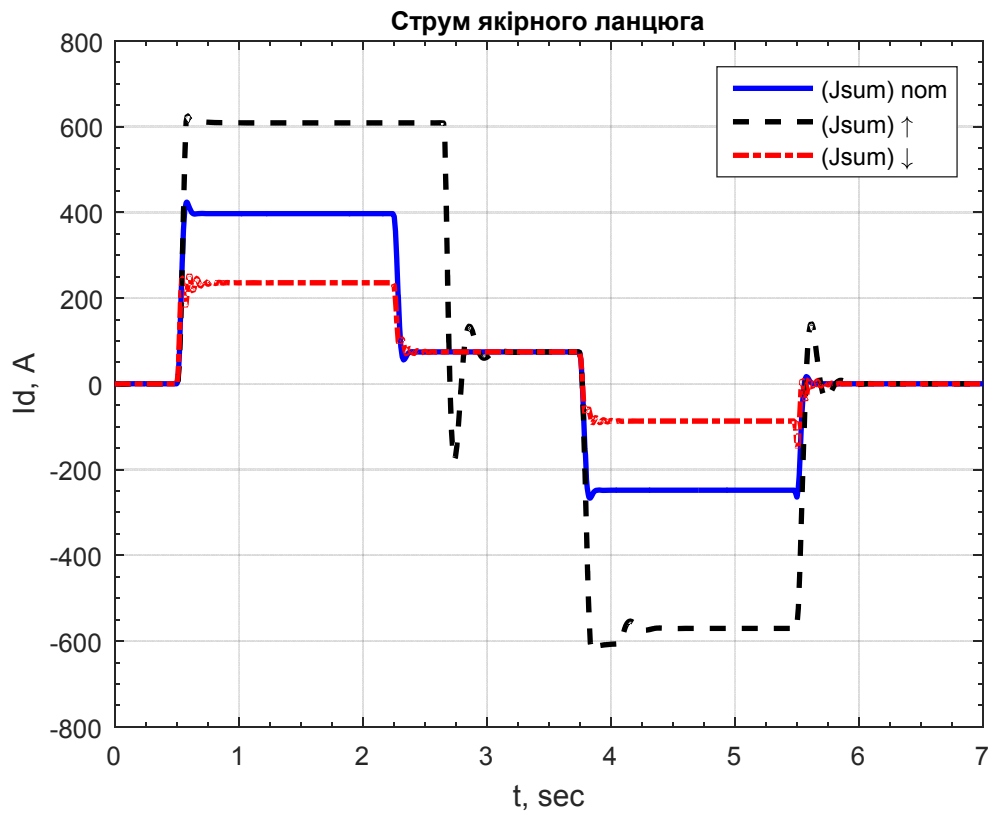


Рисунок 3.32 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні J'_{Σ} в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$)

4 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОЇ 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 Загальні положення синтезу системи методом аналітичного конструювання регуляторів

В основі метода аналітичного конструювання регуляторів (АКР) лежать інтегральні квадратичні критерії якості. Завдання АКР полягає в тому, що для об'єкта, рух якого описується системою лінійних диференціальних рівнянь.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.1)$$

де всі координати X_i і управління U задані у відносних одиницях, необхідно синтезувати алгоритм управління, який надає мінімум функціоналу якості

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l dt, \quad (3.2)$$

де $\eta_i = X_i - X_i^*$

У векторній формі:

$$\dot{X} = AX + BU;$$

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n (\bar{\eta}, K \bar{\eta}) dt. \quad (3.3)$$

Перетворимо початкову систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\eta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n; \quad (3.4)$$

$$\dot{\eta} = A\eta + BU.$$

Завдання вирішується методом динамічного програмування. Напишемо рівняння Беллмана:

$$\min_U \left[\sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \eta_i} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U \right) \right] = 0. \quad (3.5)$$

Оскільки не всі оптимальні керування можуть виявитися стійкими, використання функції Ляпунова V в якості опції Беллмана f одночасно забезпечить стійкість системи.

Функція Ляпунова для будь-яких лінійних систем:

$$V = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \eta_i \eta_j$$

у векторній формі:

$$\mathbf{V} = (\vec{\eta}, \mathbf{A}\vec{\eta}).$$

Тоді керування визначається за формулою:

$$U = -\text{sign} \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial V}{\partial \eta_i}. \quad (3.6)$$

Для синтезу алгоритму керування досить знайти потрібні коефіцієнти функції Ляпунова A_{ij} ($A_{ij} = A_{ji}$). Визначити A_{ij} можна, вирішивши матричне рівняння Барбашина:

$$\mathbf{C}\mathbf{A}_V = -\mathbf{K},$$

$$\begin{bmatrix} C_{(11,11)} & C_{(12,11)} & \dots & C_{(ij,11)} & \dots & C_{(nn,11)} \\ C_{(11,12)} & C_{(12,12)} & \dots & C_{(ij,12)} & \dots & C_{(nn,12)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,kl)} & C_{(12,kl)} & \dots & C_{(ij,kl)} & \dots & C_{(nn,kl)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,nn)} & C_{(12,nn)} & \dots & C_{(ij,nn)} & \dots & C_{(nn,nn)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ \dots \\ \dots \\ A_{nn} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} \\ 2K_{12} \\ \dots \\ \dots \\ K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

де C - матриця Барбашина, елементи якої розраховуються по наступних правилах:

$$C_{(ij,kl)} = \begin{cases} 0 & , \text{если } i \neq k, j \neq l \\ a_{jl} & , \text{если } i = k, j \neq l \\ a_{ii} + a_{jj} & , \text{если } i = k, j = l, i \neq j \\ a_{ii} & , \text{если } i = k = j = l; \end{cases} \quad (3.8)$$

де A_V - вектор коефіцієнтів функції Ляпунова;

K - вектор коефіцієнтів критерію якості.

4.2 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат

Структурна схема об'єкта керування регулятора струму (РТ) приведена на рис.4.1.

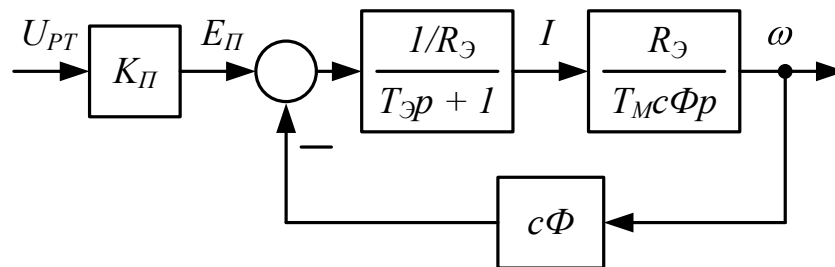


Рисунок 4.1 - Структурна схема об'єкта керування РТ

Математичний опис об'єкта керування РТ має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{I} = -\frac{1}{T_\Theta} I - \frac{c\Phi}{R_\Theta T_\Theta} \omega + \frac{K_{PI}}{R_\Theta T_\Theta} U_{PT} \\ \dot{\omega} = \frac{R_\Theta}{T_M c\Phi} I. \end{cases} \quad (3.9)$$

Наводимо керовані координати і напруга до відносним одиницям

$$X_1 = \frac{I}{I_M}; \quad X_2 = \frac{\omega}{\omega_M}; \quad U = \frac{U_{PT}}{U_M}, \quad (3.10)$$

де I_M, ω_M, U_M – максимальні значення величин, які слід прийняти

$$I_M = 2,5I_H; \quad \omega_M = \omega_H; \quad U_M = 10B.$$

У відносних одиницях маємо:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -\frac{I}{T_{\mathcal{E}}} X_1 - \frac{c\Phi\omega_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} X_2 + \frac{K_{II}U_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} U \\ \dot{X}_2 = \frac{R_{\mathcal{E}}I_M}{T_M c\Phi\omega_M} X_1. \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\eta_1 = X_1 - X_1^*; \quad \eta_2 = X_2 - X_2^*, \quad (3.12)$$

де X_1^* , X_2^* - бажані траєкторії руху керованих координат.

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2 + b_1U \\ \dot{\eta}_2 = a_{21}\eta_1, \end{cases} \quad (3.13)$$

де

$$a_{11} = -\frac{1}{T_{\mathcal{E}}};$$

$$a_{12} = -\frac{c\Phi\omega_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M};$$

$$b_1 = \frac{K_{II}U_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M};$$

$$a_{21} = \frac{R_{\mathcal{E}}I_M}{T_M c\Phi\omega_M}.$$

Для зменшення трудомісткості виконання розрахунку коефіцієнтів системи (3.13) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою системи Matlab, у якій було розроблені програмні коди (m-файли).

Функція Ляпунова для системи другого порядку

$$V = A_{11}\eta_1^2 + 2A_{12}\eta_1\eta_2 + A_{22}\eta_2^2. \quad (3.14)$$

Критерій якості

$$J(U) = \int_0^{\infty} (k_{11}\eta_1^2 + 2k_{12}\eta_1\eta_2 + k_{22}\eta_2^2) dt. \quad (3.15)$$

Алгоритм управління РТ має вигляд:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \text{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (3.16)$$

Коефіцієнти функції Ляпунова A_{11} , A_{12} знаходимо з рівняння Барбашина:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} \\ 2k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

При синтезі РТ вважаємо, що $k_{11} = 1$, $k_{12} = k_{22} = 0$.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Звідси знаходимо потрібні коефіцієнти:

$$A_{11} = \frac{\begin{vmatrix} -1 & a_{21} & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{-(-a_{12}a_{21})}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = -\frac{1}{a_{11}};$$

$$A_{12} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & -1 & 0 \\ a_{12} & 0 & a_{21} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{0}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = 0.$$

Отримуємо алгоритм керування РТ:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[-\frac{1}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) \right] = U_M \text{sign} [X_1^* - X_1] \quad (3.19)$$

4.3 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат

Об'єкт керування регулятора швидкості (РС) також як і при синтезі РТ описується системою рівнянь виду (3.1) за винятком того, що функцією, яка керує, є напруга РС U_{PC} .

Алгоритм управління РС

$$U_{PC} = -U_M \operatorname{sign} \left[b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \operatorname{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (3.20)$$

коефіцієнти A_{11} , A_{12} знаходимо, вирішуючи рівняння виду (3.2), в якому підставимо наступні значення коефіцієнтів критерію якості:

$$k_{11} = k_{12} = 0, \quad k_{22} = 1.$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

звідки знаходимо

$$A_{11} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{21} \\ -1 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{-a_{21}^2}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = \frac{a_{21}}{a_{11}a_{12}} ; ;$$

$$A_{12} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{12} & 0 & a_{21} \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{a_{11}a_{21}}{a_{11}(-a_{12}a_{21})}.$$

$$\begin{aligned}
U_{PC} &= -U_M \text{sign} \left[\frac{a_{21}}{a_{11}a_{12}} (X_1 - X_1^*) - \frac{1}{a_{12}} (X_2 - X_2^*) \right] = \\
&= U_M \text{sign} \left[\frac{a_{21}}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) - X_2 + X_2^* \right] = \\
&= U_M \text{sign} \left[X_2^* - X_2 - \frac{R_\Omega I_M T_\Omega}{T_M c \Phi \omega_M} (X_1 - X_1^*) \right] = \\
&= U_M \text{sign} \left[X_2^* - X_2 - k_{\omega i} (X_1 - X_1^*) \right],
\end{aligned} \tag{3.22}$$

де $U_M = 10B$, $k_{\omega i} = \frac{R_\Omega I_M T_\Omega}{T_M c \Phi \omega_M}$.

Структурні схеми релейної системи з контролем природних фазових координат приведена на рисунку 4.2.

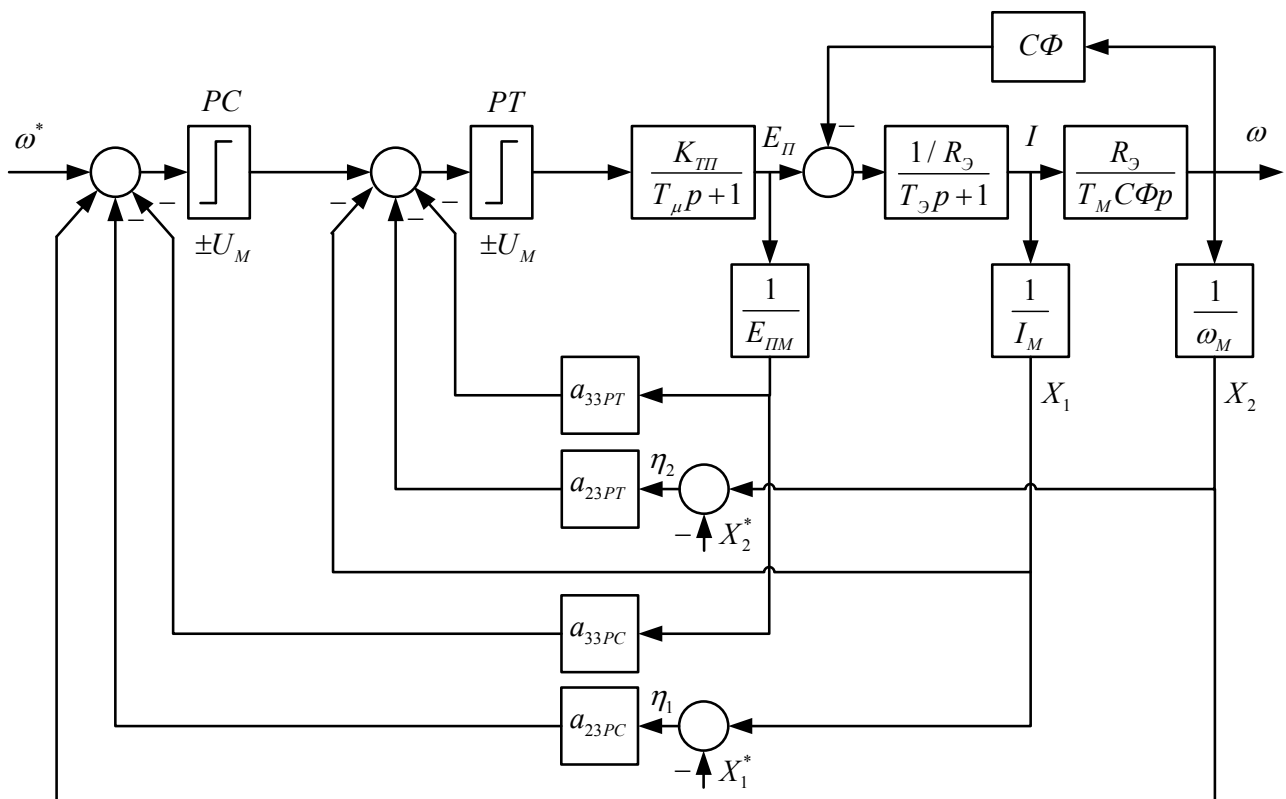


Рисунок 4.2 – Структурна схема релейної системи з контролем природних фазових координат

4.4 Математичне моделювання електроприводу станинних роликів з релейною системою керування в середовищі 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 рисунках 3.3 - 3.5. Робота релейної системи досліджувалася за такою самою програмою як і класична система підпорядкованого регулювання. З графіків перехідних процесів (рис. 3.6 – 3.15) 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.

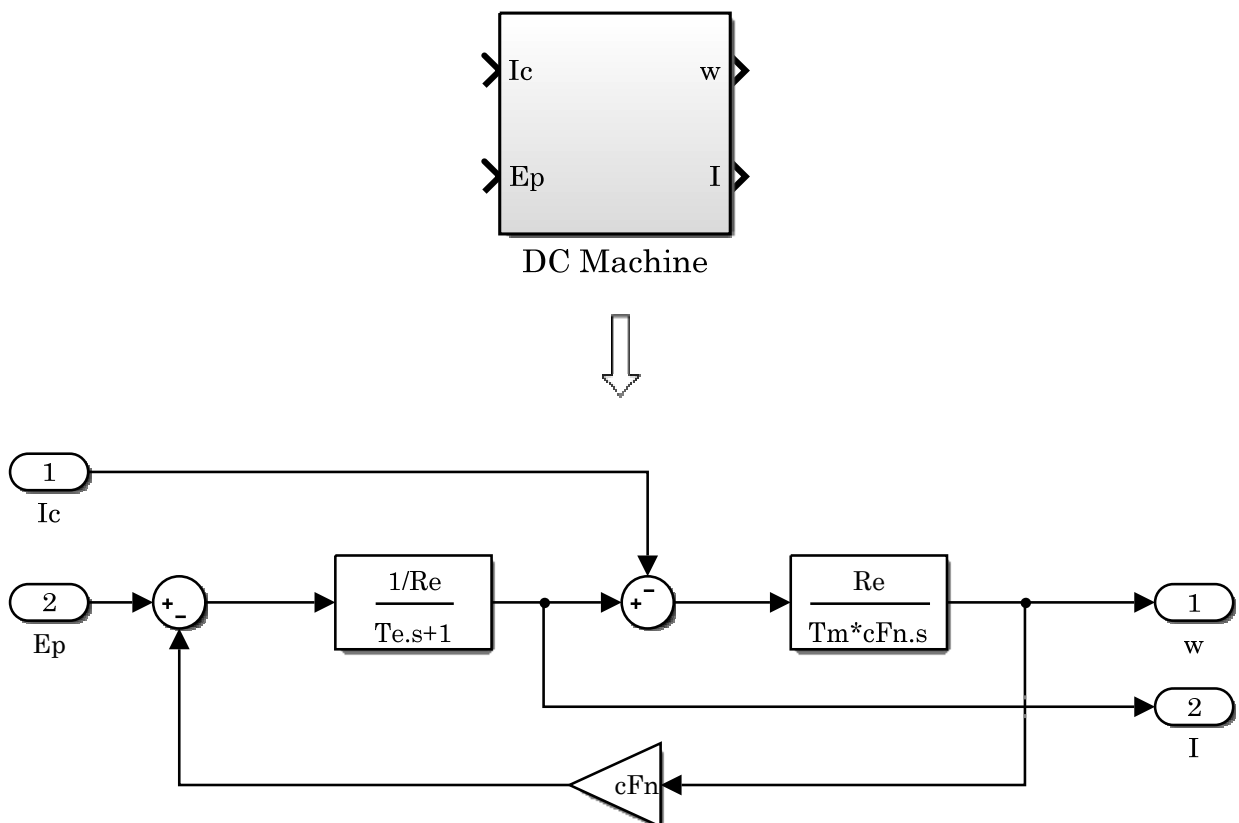


Рисунок 4.3 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

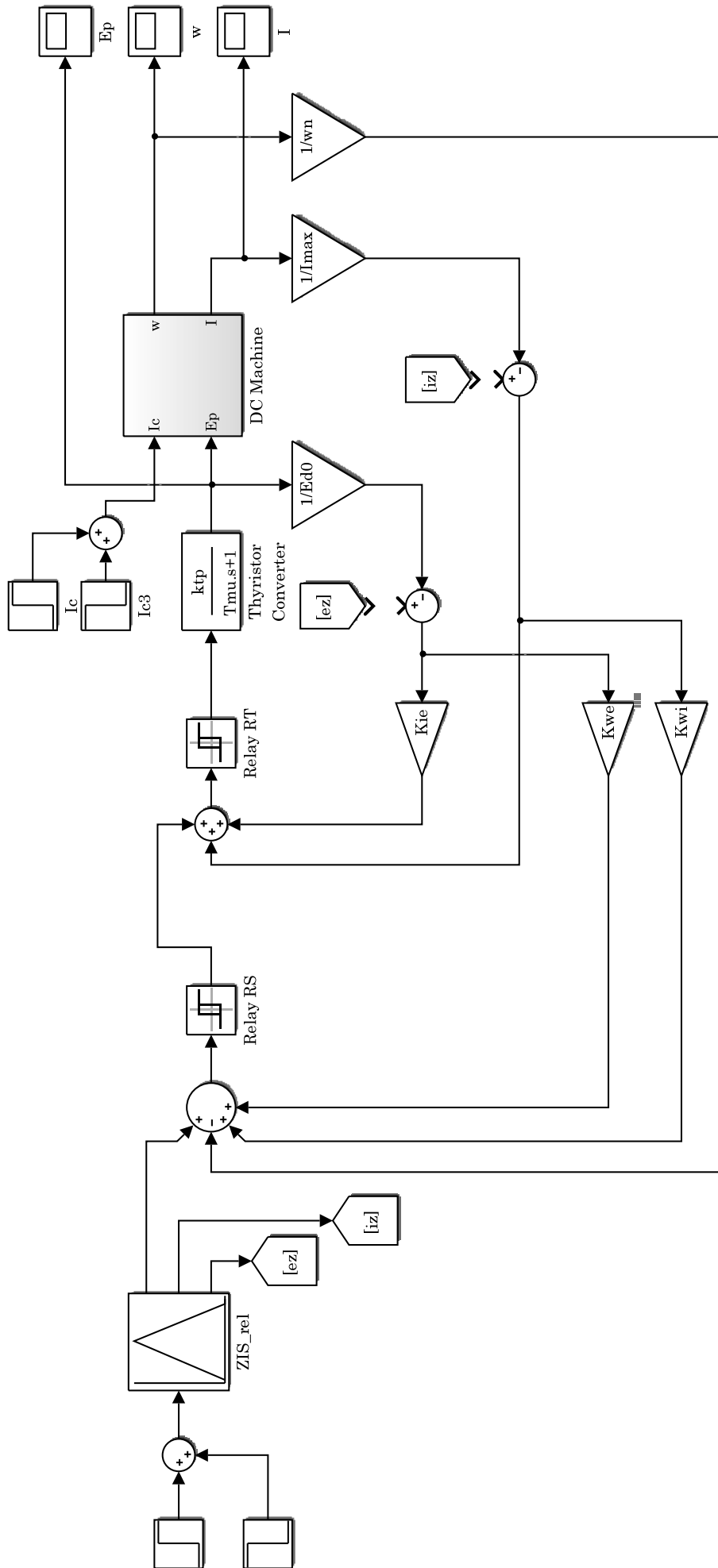


Рисунок 4.4 – Simulink-модель релейной системы керування електроприводом

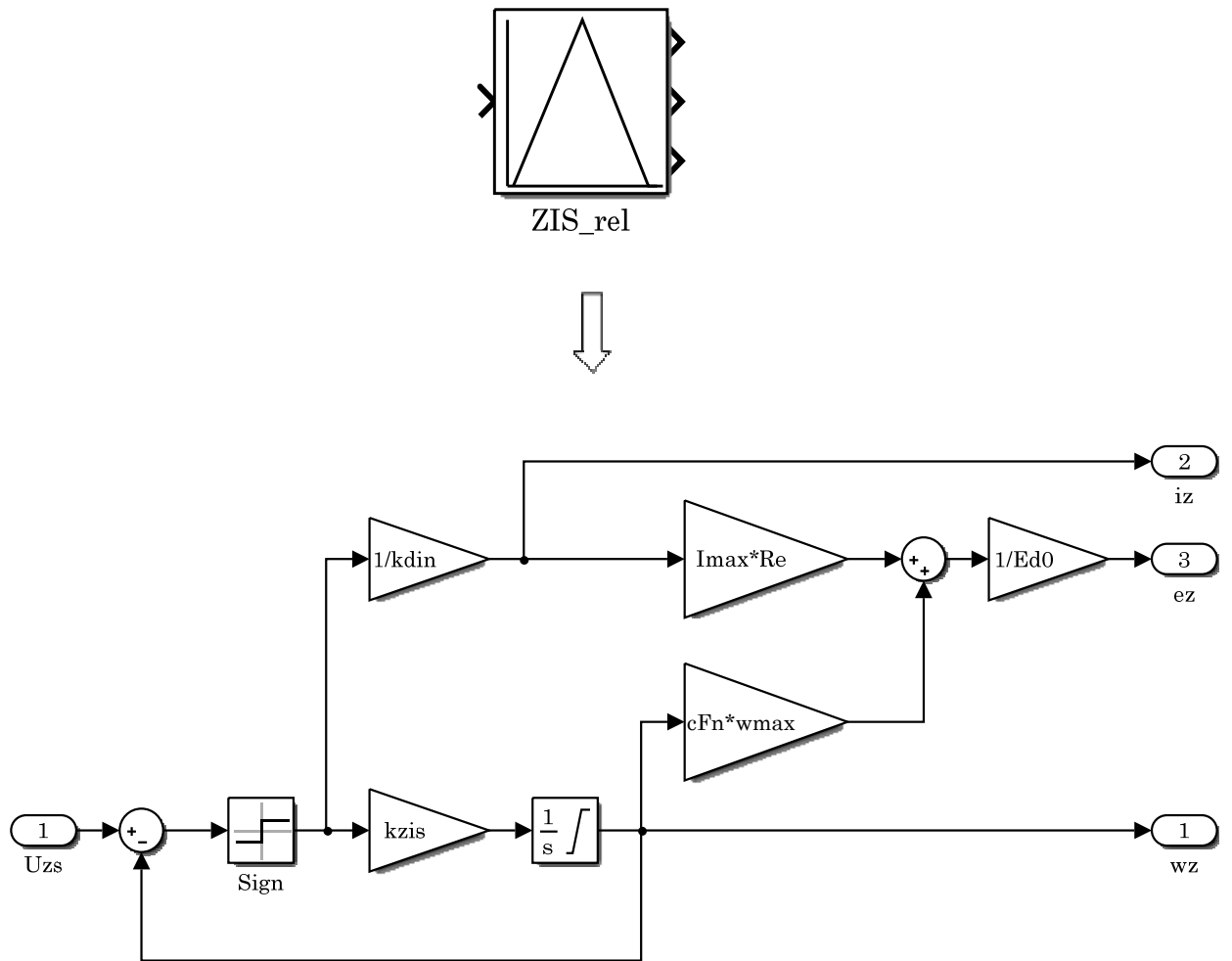


Рисунок 4.5 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS_rel), що реалізує раціональну динаміку

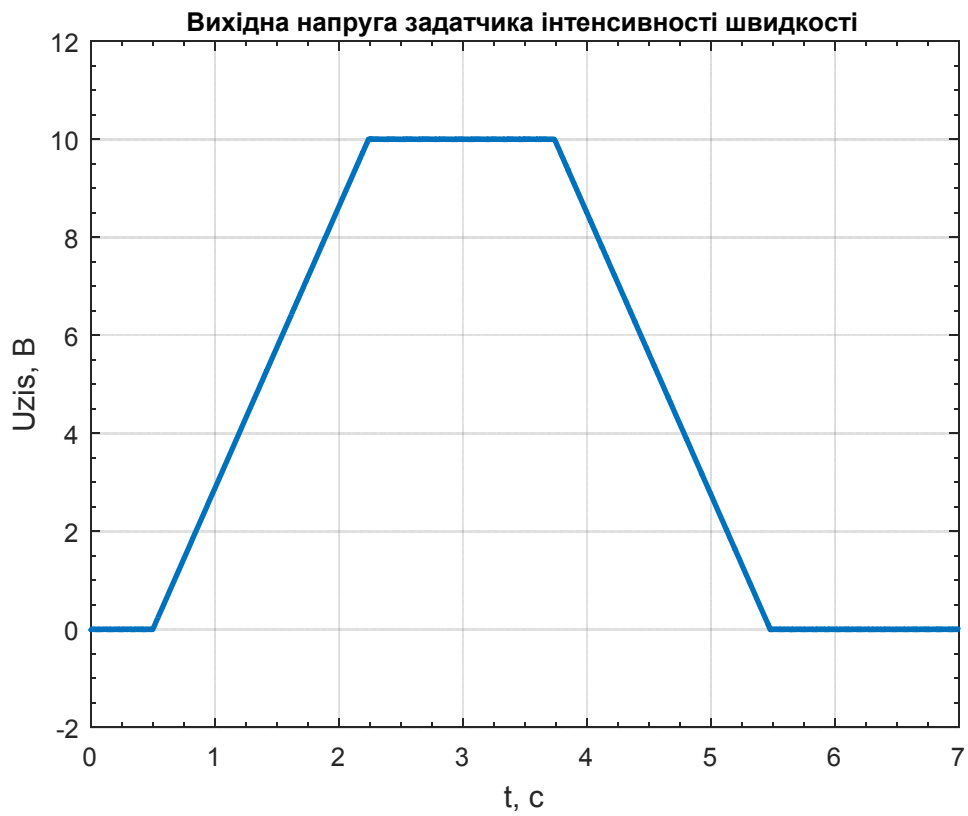


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості в релейній системі

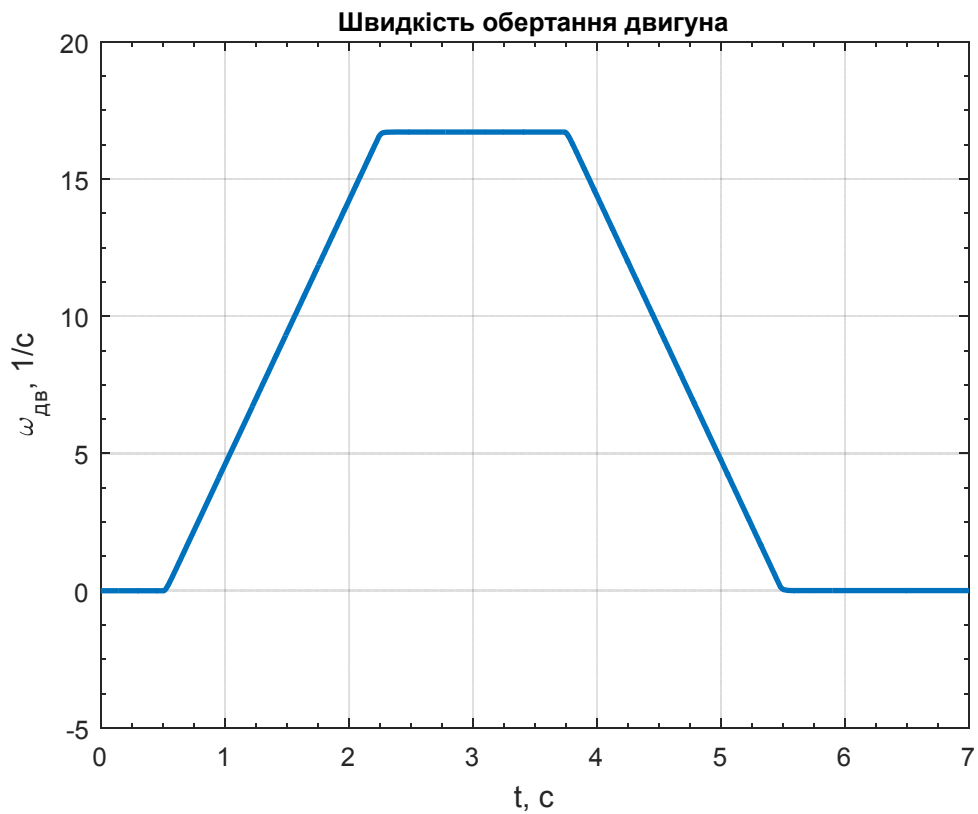


Рисунок 4.7 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

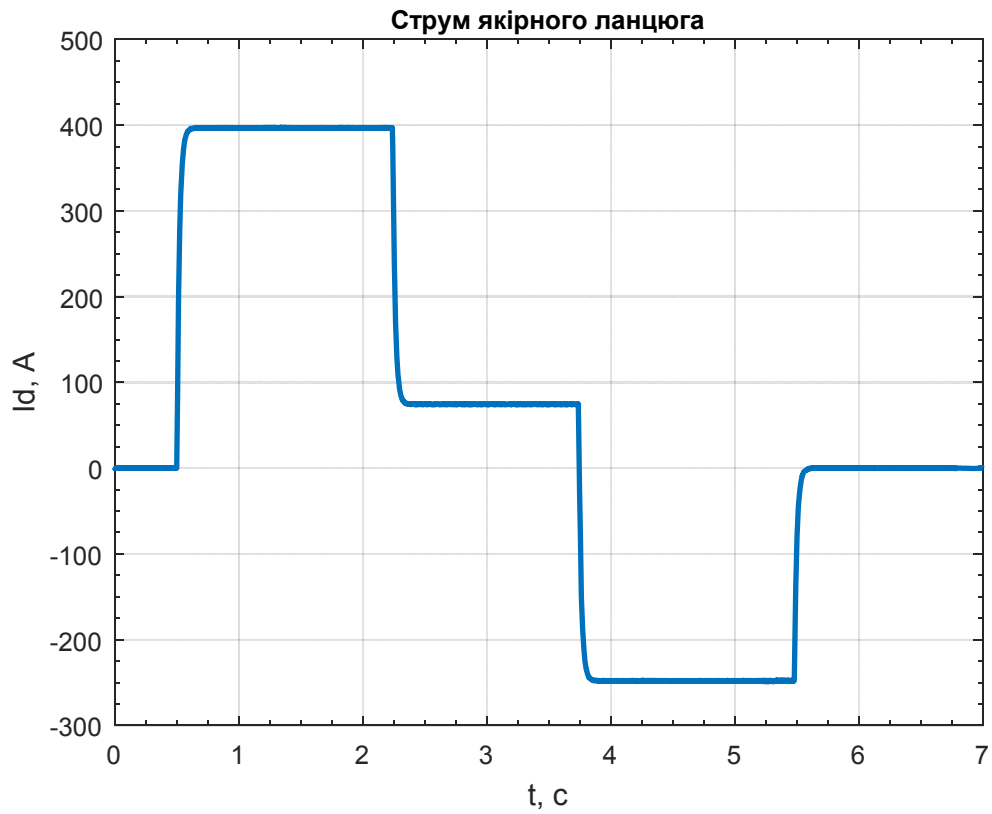


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу струму якоря ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

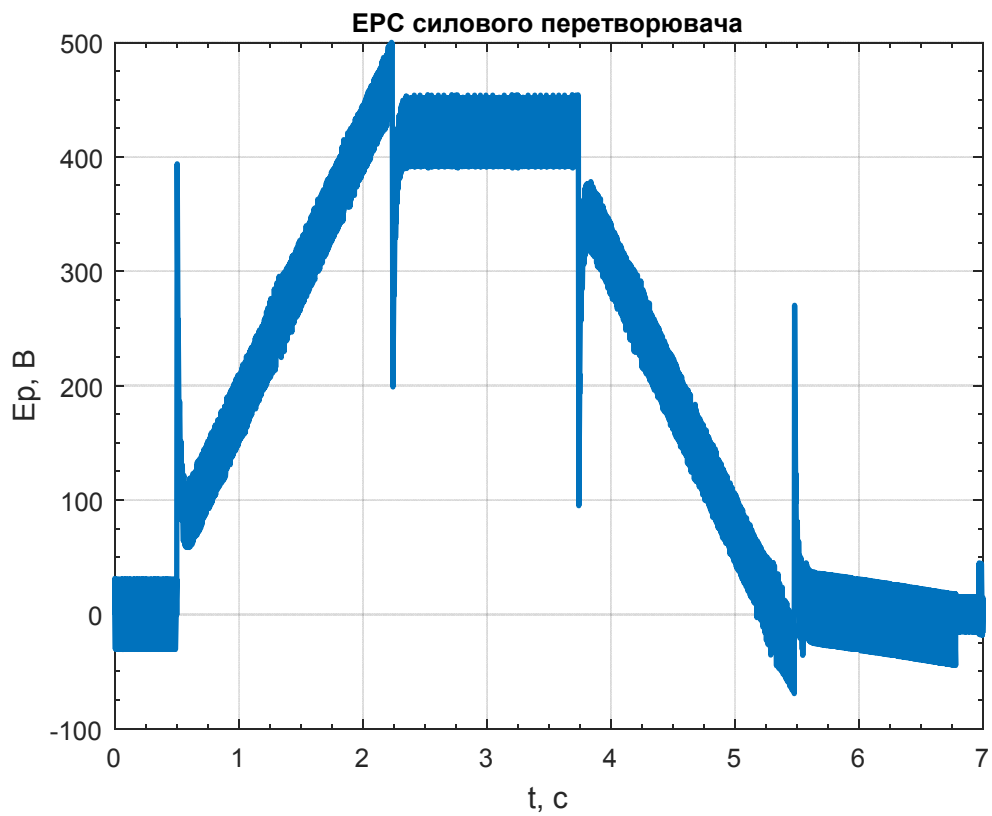


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного перетворювача ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

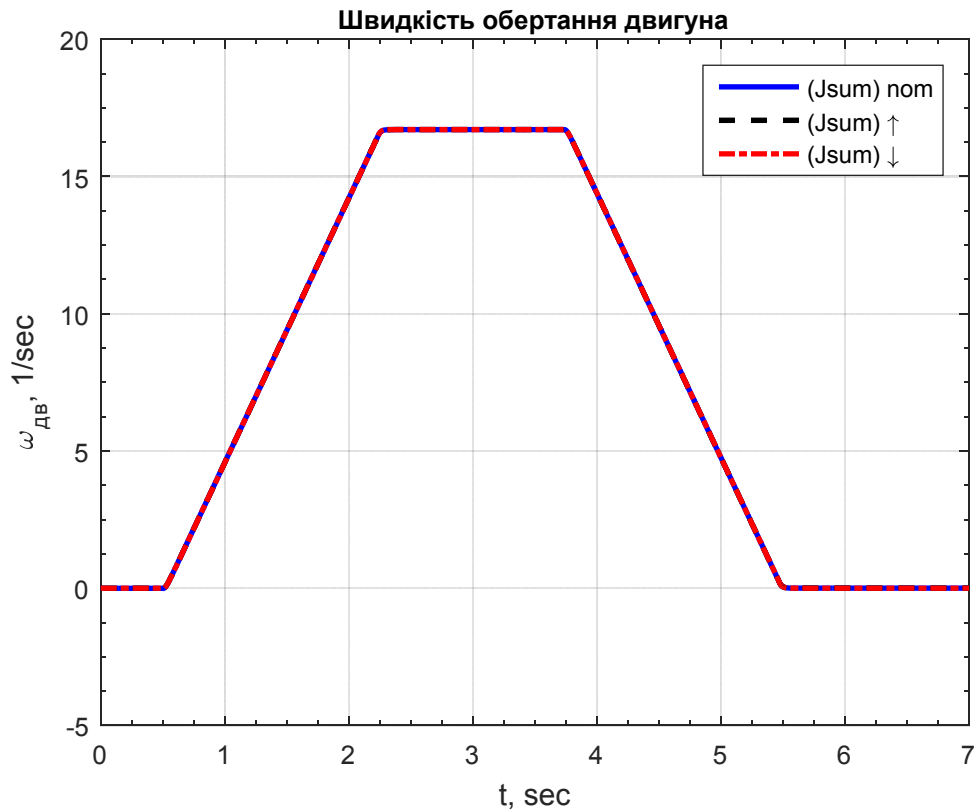


Рисунок 4.10 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні R_s в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

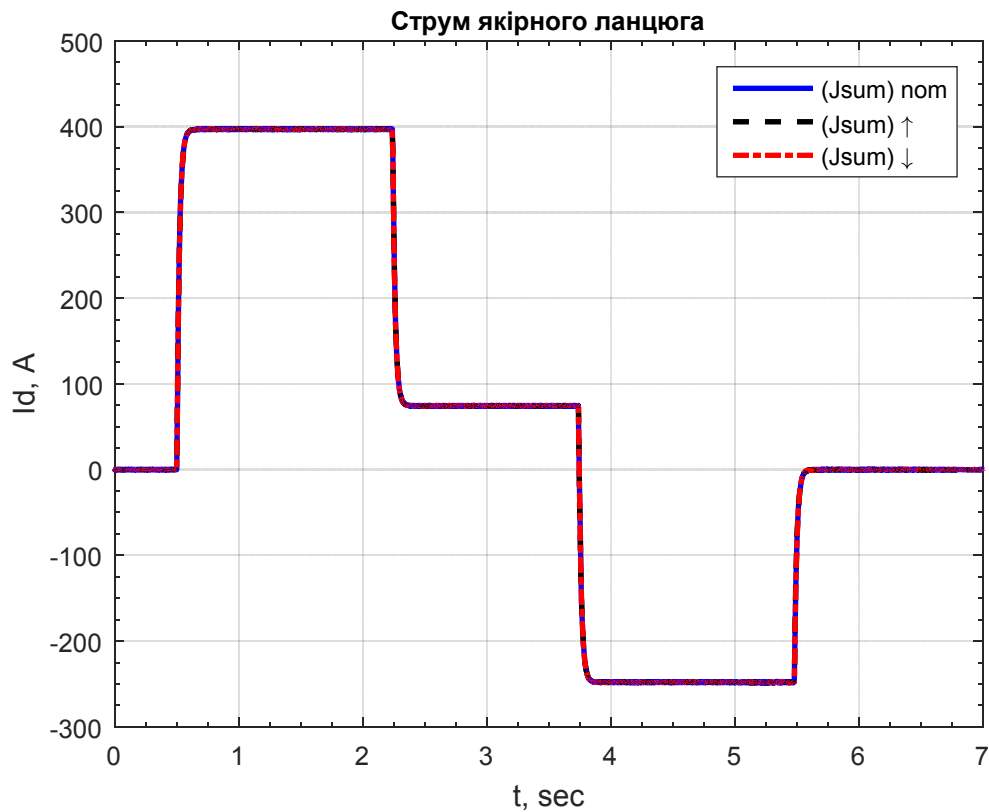


Рисунок 4.11 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні R_s в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

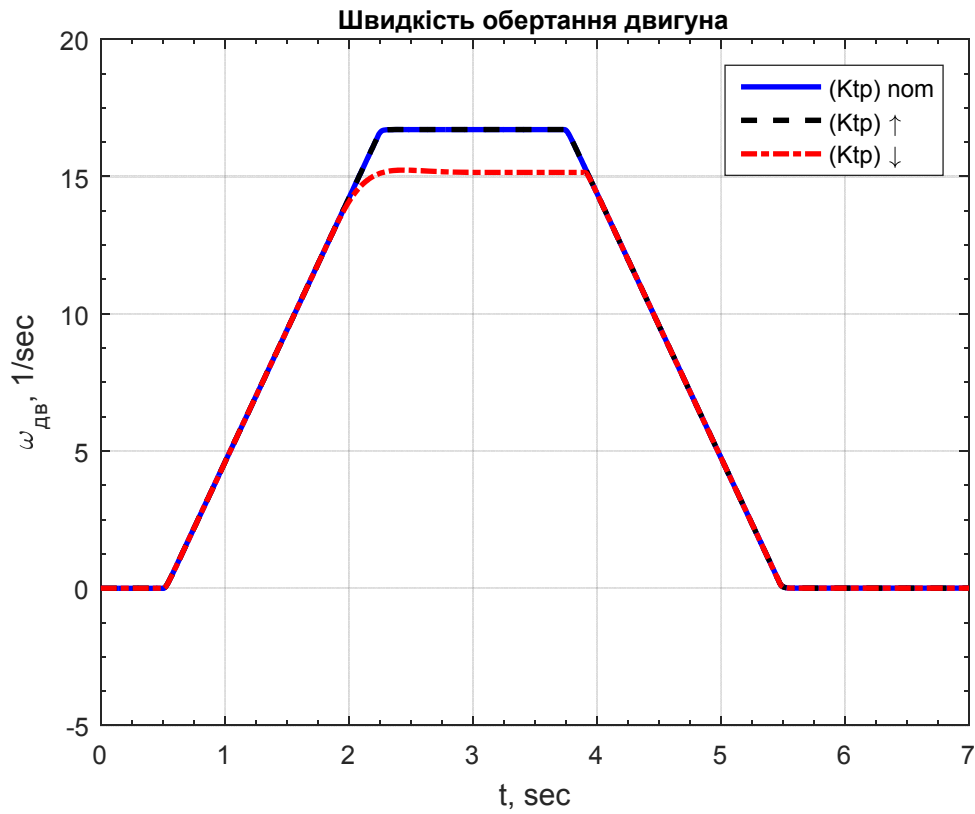


Рисунок 4.12 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні $k_{\text{п}}$ в 2 рази ($I_{\text{c}} = 0,3I_{\text{н}}$) в релейній системі

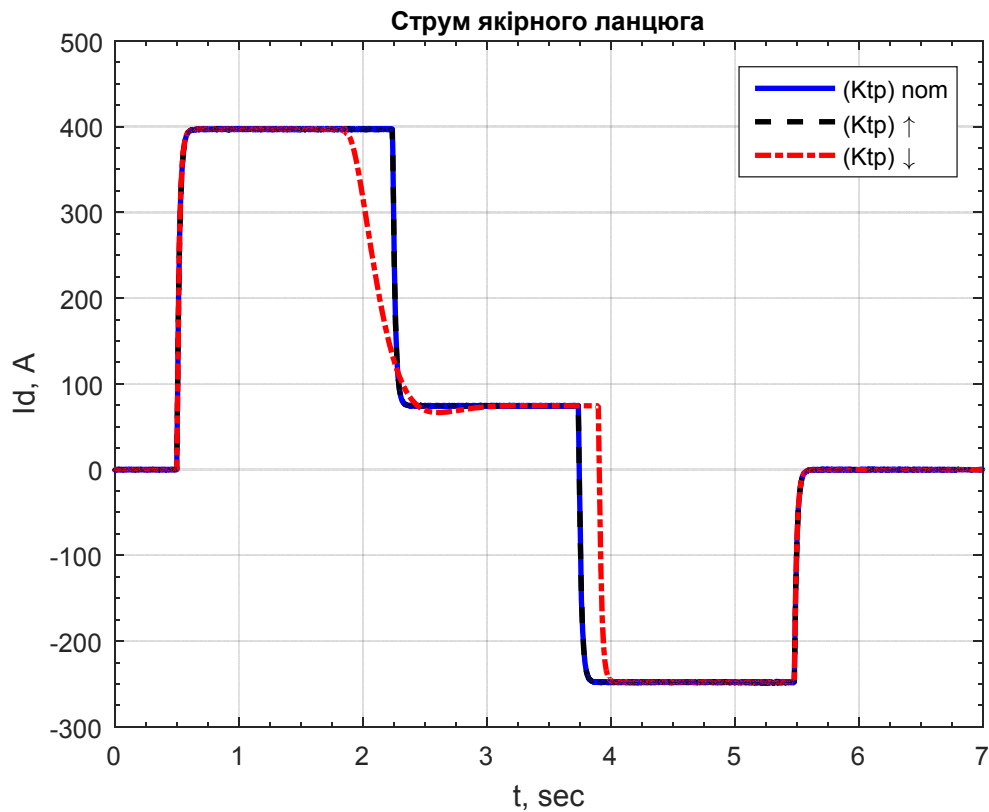


Рисунок 4.13 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні $k_{\text{п}}$ в 2 рази ($I_{\text{c}} = 0,3I_{\text{н}}$) в релейній системі

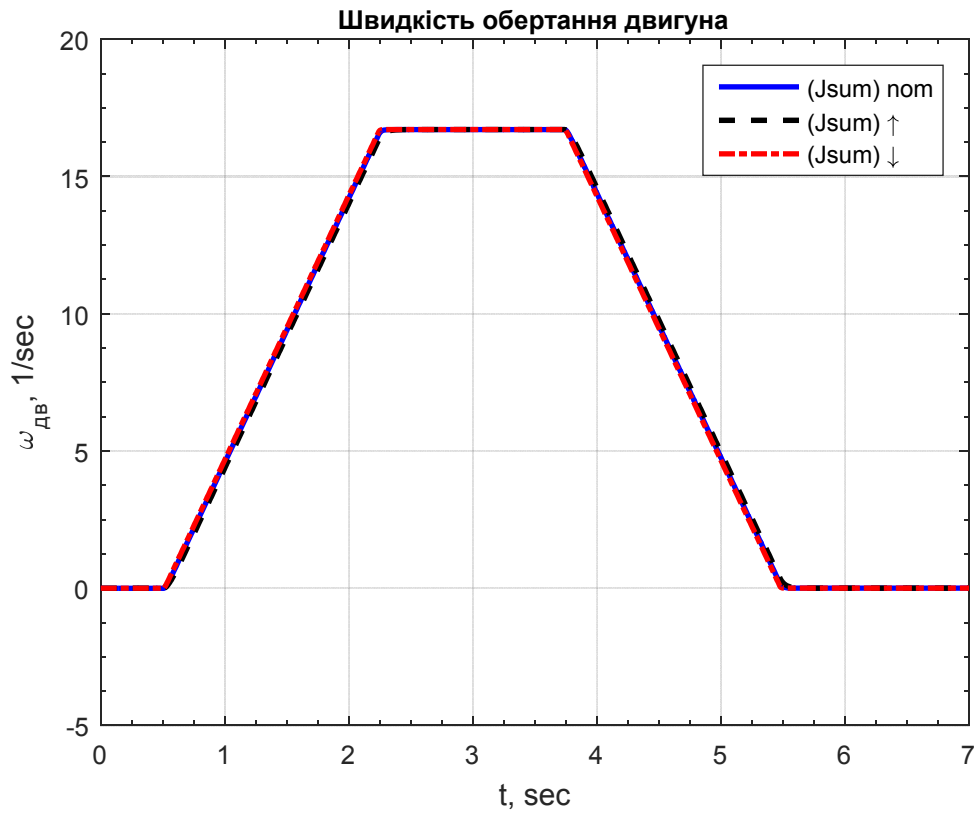


Рисунок 4.14 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні J'_Σ в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

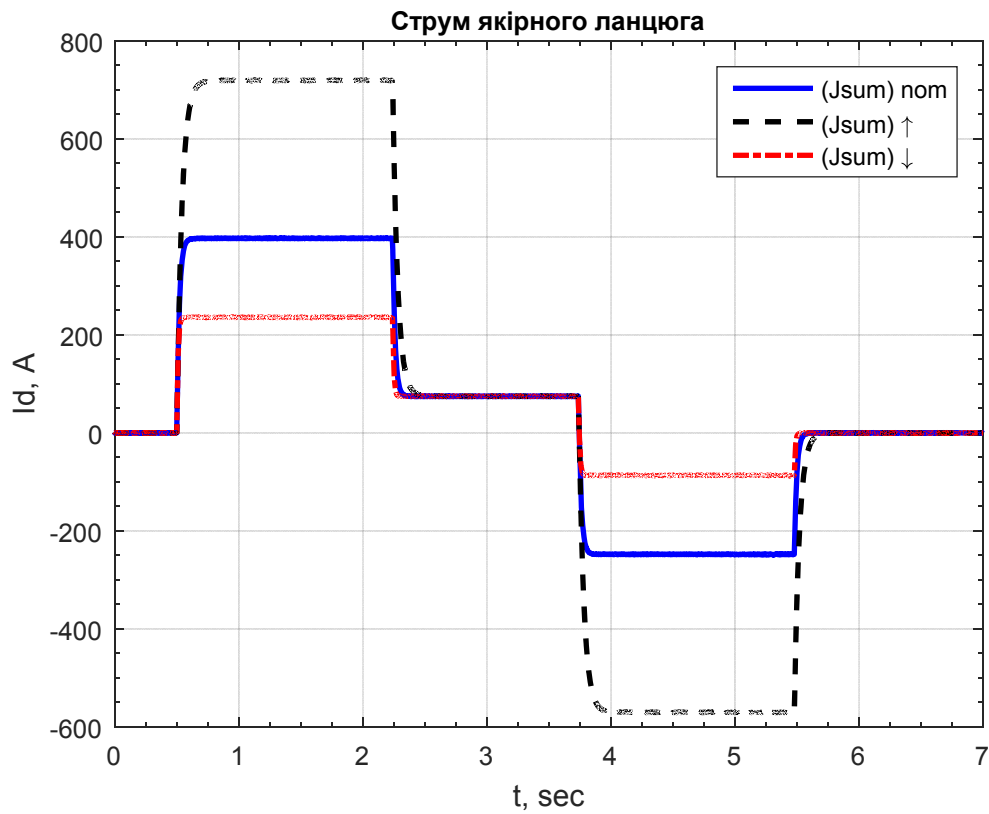


Рисунок 4.15 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні J'_Σ в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

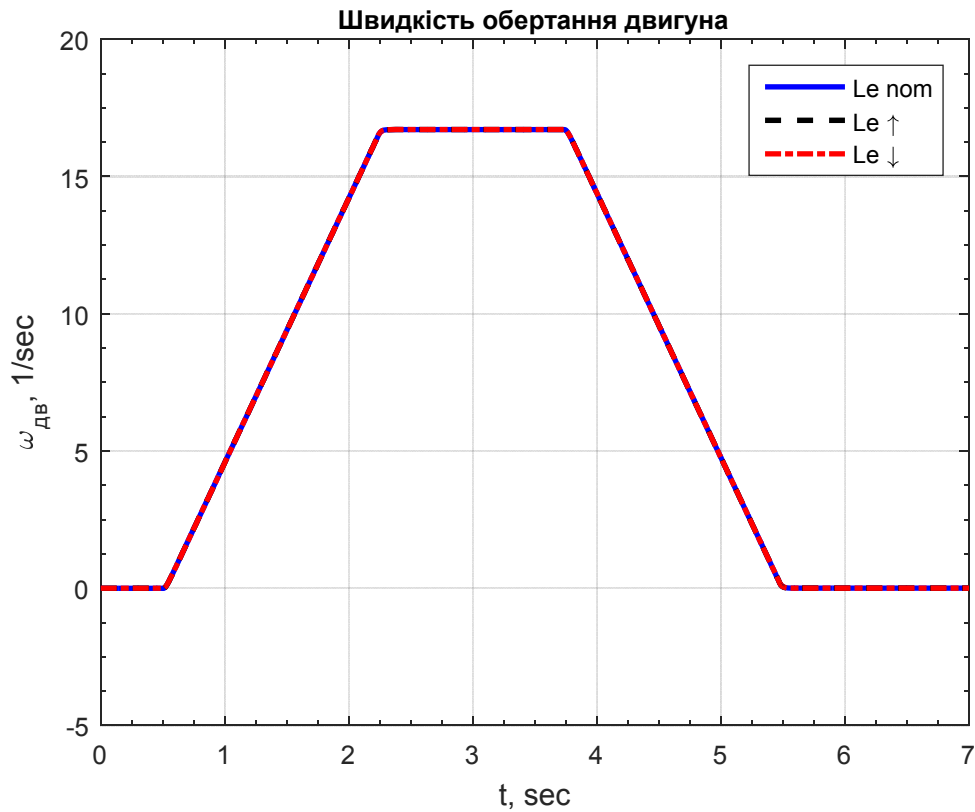


Рисунок 4.16 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні L_3 в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

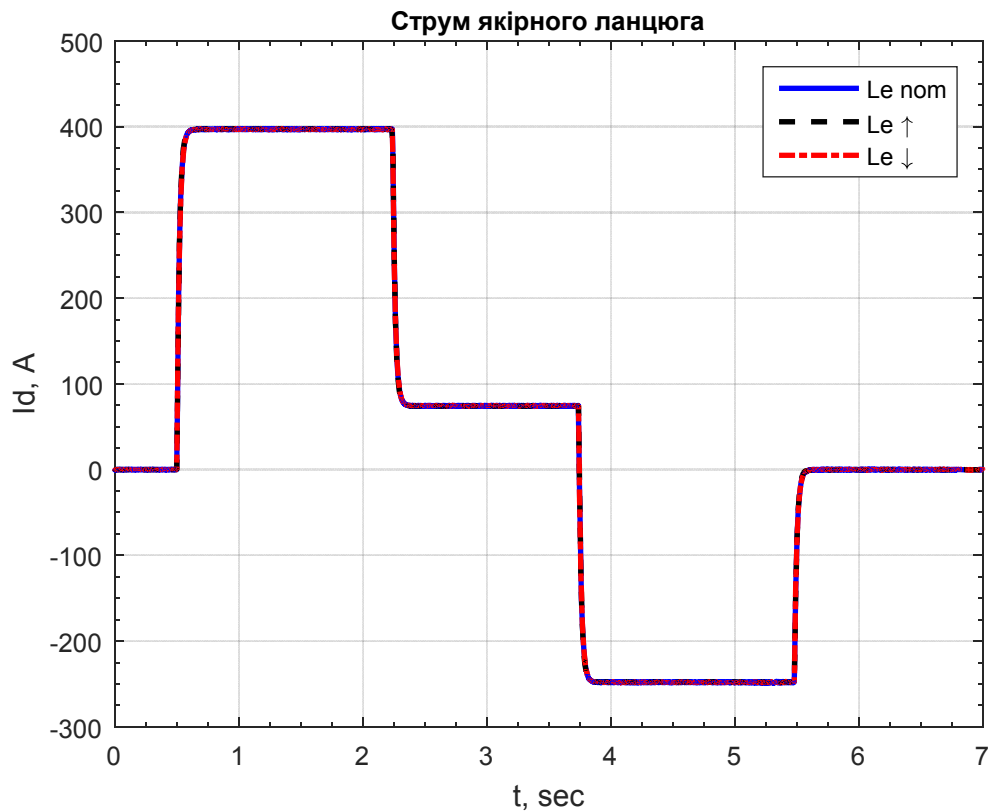


Рисунок 4.17 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні L_3 в 2 рази ($I_c = 0,3I_H$) в релейній системі

4.5 Принципи управління підприємствами на основі обліку енергоспоживання

Проблема енергетичної безпеки України висуває перед підприємствами серйозні завдання по комплексному обліку енергоносіїв в управлінні технологічними процесами. У кращому випадку переважна більшість підприємств мають розрізнені автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) і системи комерційного обліку енергоносіїв. При створенні АСУТП до останнього часу наріжним каменем ставилося забезпечення випуску необхідної кількості і якості товарної продукції.

Сучасні автоматизовані системи управління підприємствами (АСУП) будуються за ієрархічним принципом і містять кілька рівнів, тому що промислові підприємства є складними об'єктами управління, які вимагають високого ступеня автоматизації устаткування, координації управління численними функціонально пов'язаними і територіально рознесеними системами і установками при необхідності реалізації для них підвищених вимог до якості управління.

Основними вимогами до сучасної АСУП є:

- «Дисплейний» спосіб контролю і управління
- Використання екрану колективного користування
- Високий рівень автоматизації
- Впровадження цифрових керуючих систем безпеки
- Мікропроцесорні засоби нижнього рівня
- Поглиблена діагностика обладнання та АСУТП.

Автоматизація управлінням підприємством здійснюється шляхом створення інтегрованої, ієрархічної, децентралізованої системи. Інтеграція визначається необхідністю спільного вирішення різнорідних за призначенням, способам реалізації та функціонування комплексів задач управління технологічними та організаційними процесами як на рівні агрегату, так і на рівні підприємства. Ієрархія визначається рівнем функцій (підприємства,

переділу, цеху, технологічної установки), розв'язуваних відповідною частиною керуючої системи. Децентралізація визначається, з одного боку орієнтацією елементів керуючих систем на автоматизацію локальних підсистем, з іншого - необхідністю розподілу функцій контролю і управління на різних рівнях з метою підвищення надійності системи і безпеки експлуатації.

Визначення зв'язків в АСУП, які дозволять оптимізувати енергоспоживання і використання електричної енергії підприємств.

Існуючі системи управління характеризуються рівнем ієрархії, і можуть бути умовно розділені на системи низького, середнього і високого рівня.

Системи низького рівня управління енергоспоживанням можуть виконувати функції:

- комерційного обліку енергоносіїв;
- технічного обліку, аж до агрегатного рівня;
- моніторингу якості енергоносіїв;
- телемеханіки та диспетчерського управління;
- моніторингу та управління енергоспоживанням;
- управління технологічним обладнанням.

Згідно вимог «Правил користування електричною енергією» на підприємствах з встановленою потужністю понад 150 кВА необхідно мати систему комерційного обліку електроенергії. Аналогічні вимоги пред'являються і до інших енергоносіїв.

Як правило, підприємствам пропонується наступний набір властивостей, якими буде володіти система комерційного обліку енергоносіїв:

- відображення поточних показань лічильників і реєстрація їх значень за певні проміжки часу;
- розрахунок і відображення споживаної потужності в задані інтервали часу по каналах, по групам обліку, а також сумарної споживаної енергії;
- визначення максимальних значень потужності в пікові (ранкові та вечірні) інтервали;
- підрахунок кількості енергії, споживаної в кожен тарифний інтервал доби;

- зберігання вищевказаних значень і відображення їх за викликом на моніторі,
- розрахунок добових, місячних, квартальних і річних витрат енергоносіїв за заданими групами обліку і сумарно по підприємству;
- видача необхідних форм звітної документації для внутрішнього використання, а також для фінансових розрахунків з постачальниками і споживачами енергії.

При цьому система комерційного обліку виконує чисто статистичні функції. Її дані використовуються з великою дискретністю і прийняття рішень на їх підставі здійснюється з запізненням.

Всі інші підсистеми в більшості випадків також не використовують і не передають інформацію в родинні підсистеми, що призводить до запізненого прийняття рішення персоналом і підсилює вплив персоналу на показники виробництва.

Розглянемо наступний приклад. Пристрої й апаратура телемеханіки справили перемикання в системі електропостачання підприємства і живити агрегат через обвідний вимикач. При цьому на окремих приєднаннях помилково зафіксується генерація активної потужності, якщо система обліку не отримає дані про проведені перемикання. Персонал витратить додатковий час на пошук невідповідності, чого не відбулося б в разі своєчасного отримання даних про перебудову розрахункової схеми. Аналогічно, при наявності даних системи контролю за режимами роботи електроустаткування можна формувати графіки ремонту і обслуговування, контролювати роботу устаткування системи технічного обліку. Можлива така ситуація, коли від одного приєднання харчуються кілька споживачів електричної енергії, оснащених локальними системами управління, один з яких може виконувати компенсацію реактивної потужності (синхронна машина або асинхронний двигун з фазним ротором, включений за схемою машини подвійного живлення). Якщо система технічного обліку або моніторингу якості електроенергії, зареєструє споживання реактивної потужності на загальному приєднанні, система аналізу

енергетичної ефективності підприємства вважатиме, що такий режим призведе до додаткових втрат в мережах підприємства, перевірить завантаження споживача який може компенсувати реактивну потужність і в разі його недозавантаження видасть завдання, на генерацію реактивної потужності. Це дозволить забезпечити циркуляцію реактивної потужності в межах одного приєднання і знизити втрати в мережах підприємства.

Пропонується системи низького рівня управління енергоспоживанням, що функціонують в режимі «реального» часу, об'єднати в загальну інформаційну мережу для обміну інформацією і отримання сигналів від підсистем АСУП, які виконують функції:

- оперативного планування і диспетчеризації процесів;
- фінансового аналізу витрат на виконання процесів;
- оперативне перепланування с урахуванням реального поточного стану виробництва;

- перевірки достовірності інформації;
- забезпечення інформації про поточний стан агрегатів;
- реєстрації режимів роботи обладнання і формування ремонтних заходів;
- прогнозування обсягів споживання енергоносіїв;
- визначення оптимальних режимів роботи обладнання.

Включення в АСУП зв'язків, які забезпечать отримання інформацію про стан і енергоспоживанні виробничих об'єктів, дозволить:

- підвищити енергетичну ефективність виробництва;
- надати персоналу достовірну оперативну інформацію про стан об'єктів;
- здійснити функції централізованого диспетчерського телеуправління агрегатами;

- автоматично виявляти аварійні і аварійні ситуації, гарантовано сповіщати про них;

- не допускати помилкових дій персоналу при дистанційному управлінні агрегатами за рахунок програмної обробки правильності формування команд дистанційного керування, помехозащищенної передачі їх до об'єктів і автоматичного контролю змін стану відповідних керованих агрегатів;

- отримати інформаційну підтримку при розслідуванні нештатних ситуацій, виконати аналіз загальних тенденцій і експлуатаційних характеристик об'єктів на тривалих тимчасових інтервалах;

- принципово удосконалити технології прийняття рішень фахівцями - технологами на основі

оперативного дистанційного доступу до достовірних поточними даними та електронних архівів;

- створити інформаційну основу і програмно-технічну платформу для побудови надалі підсистем активного управління і стабілізації найбільш значущих параметрів агрегатів, підсистем запобігання аварійних ситуацій, експертних систем - порадників диспетчера.

4.6 Дослідження динаміки і енергетичних показників електропривода з векторним керуванням методом віртуального моделювання

Одним з основних напрямків розвитку енергетики України в даний час є заміна старих енергоємних технологій новішими і економічними. Тому все більш актуальними стають питання оцінки ефективності роботи встановленого обладнання і доцільності вибору нового. Так як силовий електропривод є головним споживачем в енергосистемі і його енергетичні показники служать основним критерієм оцінки ефективності роботи, то все більшу увагу дослідників і інженерів привертає застосування прикладних пакетів комп'ютерних програм, які дозволяють на різних етапах вирішити досить складну проблему комплексного аналізу режимів роботи різних систем електроприводу.

Матеріал присвячений дослідженню частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням, який рекомендується сьогодні до застосування для великої групи машин і механізмів в різних областях промисловості. Перевагами векторного управління є: точна відпрацювання заданої швидкості з компенсацією ковзання, збереження необхідної величини моменту при малих частотах, плавність роботи двигуна і

швидка реакція на скачки навантаження внаслідок високої динаміки регулювання.

Математичний опис систем електроприводу з векторним керуванням, наведене в роботах [74, 75], дуже громіздко і реалізація на його основі структурних схем і моделей без істотних спрощень скрутна. Більш зручним є використання віртуальних моделей, які спеціально призначені для дослідження електромагнітних процесів і енергетичних характеристик електромеханічних систем практично будь-якої складності.

Пропоновані дослідження системи електроприводу змінного струму є продовженням і розвитком матеріалу, викладеного в роботах [76, 77]. При синтезі віртуальної моделі використані інструментальні кошти однієї з останніх версій системи комп'ютерного моделювання MATLAB, яка доповнена спеціальними блоками і демонстраційними прикладами, що стосуються безпосередньо систем електроприводу. Принципи побудови і дослідження окремих блоків віртуальних моделей викладені в роботах [78, 79], а систем керування електроприводами - в монографії [80].

Віртуальна модель асинхронного електроприводу з векторним керуванням зображена на рис. 4.18.

Порти A, B і C є висновками обмотки статора машини, порт Tm призначений для подачі моменту опору руху. На вихідному порту m формується векторний сигнал, що складається з струмів, потоків і напруг статора і ротора в нерухомій і обертається системах координат, електромагнітного моменту, швидкості обертання валу, а також його кутового положення. Для зручності вилучення змінних машини з вектора в бібліотеці SimPowerSystems передбачений блок Machines Measurement Demux.

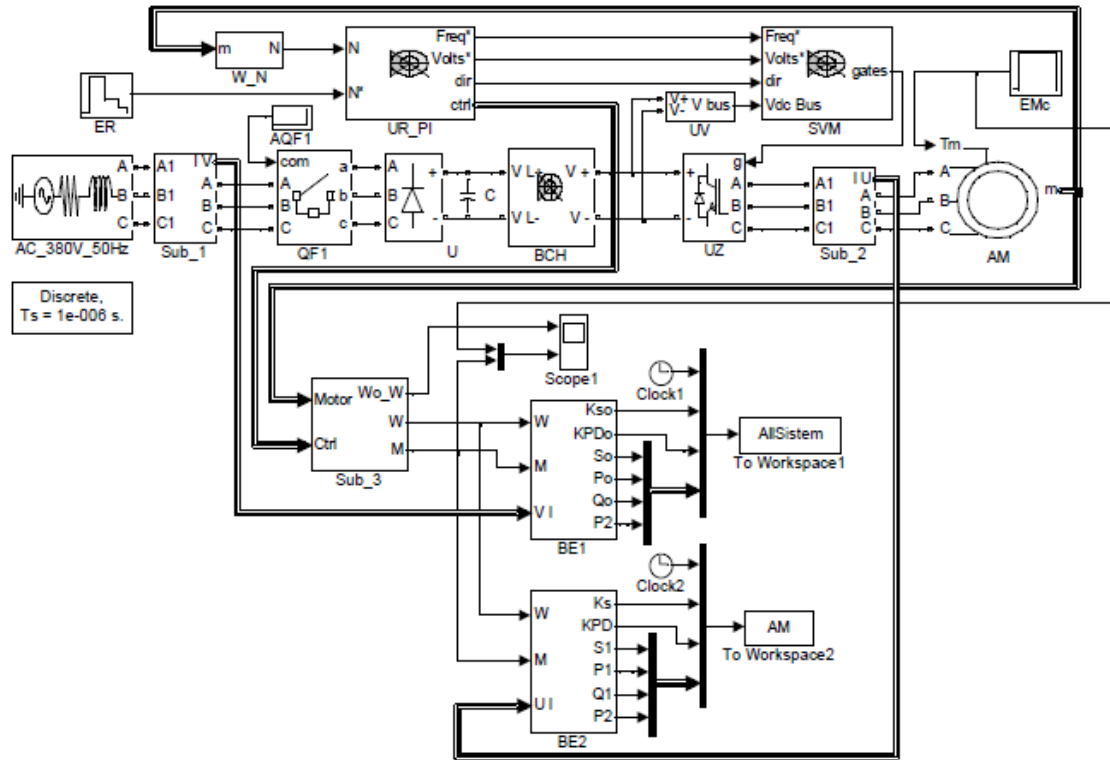


Рисунок 4.18 - Віртуальна модель частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Силовий канал електроприводу зібраний на базі віртуальних блоків пакета розширення SimPowerSystem і містить наступні основні елементи:

AC_380V_50Hz - живить мережу трифазного напруги змінного струму;

QF1 - трифазний автоматичний вимикач з блоком управління AQF1, який видає команди на вкл. / Вискл. ;

U - 3-фазний некерований випрямляч на діодах, що створює проміжну ланцюг постійного струму;

C - конденсаторний фільтр, який забезпечує роботу випрямляча як джерела напруги;

UZ - трифазний автономний інвертор напруги на IGBT-модулях;

AM - асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором.

Модель асинхронної машини включає в себе електричну частину, представлену моделлю простору станів четвертого порядку і модель механічної частини у вигляді системи другого порядку. Всі електричні змінні і параметри машини приведені до статора.

Вихідні рівняння електричної частини машини записані для двофазної системи координат (осі d_q) і мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} - \omega \phi_{ds}; & V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \phi_{qs}; \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \phi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \phi'_{dr}; & V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \phi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \phi'_{qr}; \\
 T_e &= 1,5(\phi_{ds} i_{ds} - \phi_{qs} i_{ds}),
 \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
 \phi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}; & \phi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}; & \phi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}; \\
 \phi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}; & L_s &= L_{ls} + L_m; & L'_r &= L'_{lr} + L_m.
 \end{aligned}$$

Механічна частина машини описується двома рівняннями

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (T_e - F\omega - T_m), \quad \frac{d}{dt} \theta = \omega.$$

Позначення в рівняннях асинхронної машини:

R_s, L_{ls} - опір і індуктивність розсіювання статора;

R'_r, L_{lr} - опір і індуктивність розсіювання ротора;

L_m - індуктивність ланцюга намагнічування;

L_s, L'_r - повні індуктивності статора і ротора;

V_{qs}, i_{qs} - проекції напруги і струму статора на вісь q;

V'_{qr}, i'_{qr} - проекції напруги і струму ротора на вісь q;

V_{ds}, i_{ds} - проекції напруги і струму статора на вісь d;

V'_{dr}, i'_{dr} - проекції напруги і струму ротора на вісь d;

ϕ_{ds}, ϕ_{qs} - проекції потокозчеплення статора на осі d і q;

ϕ'_{dr}, ϕ'_{qr} - проекції потокозчеплення ротора на осі d і q;

ω - кутова швидкість ротора;

θ - кутовий становище ротора;

J - момент інерції ротора;

T_e - електромагнітний момент двигуна;

T_m - статичний момент навантаження; F - коефіцієнт тертя.

У вікно завдання параметрів віртуального блоку асинхронної машини заносяться наступні дані:

Тип ротора (Rotor type). Значення параметра вибирається зі списку:

- Squirrel-Cage - короткозамкнений ротор;
- Wound - фазний ротор.

Система координат (Reference frame). Значення параметра вибирається зі списку:

- Rotor - нерухома щодо ротора;
- Stationary - нерухома щодо статора;
- Synchronous - обертається разом з полем.

Номинальна потужність P_n (ВА), діюча лінійна напруга U_n (В) і номінальна частота f_n (Гц).

Опір R_s (Ом) і індуктивність L_s (Гн) статора.

Опір R_r' (Ом) індуктивність L_r' (Гн) ротора, наведені до обмотці статора.

Взаємна індуктивність L_m (Гн).

Момент інерції J ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$), коефіцієнт тертя F ($\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$) і число пар полюсів p .

Початкові умови задаються у вигляді вектора, кожен елемент якого має наступні значення:

- s - ковзання;
- θ - фаза (град.);
- i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} - початкові значення струмів статора (А);
- ϕ_A , ϕ_B , ϕ_C - початкові фази струмів статора (град.).

При моделюванні використані паспортні дані електродвигуна з короткозамкненим ротором типу 4АН280S6: номінальна потужність - 90 кВт; номінальна швидкість - 978 об / хв; номінальна напруга - 380 В; номінальний ККД - 0,925; номінальний коефіцієнт потужності - 0,89; число пар полюсів - 3.

Управляюче-інформаційний канал електроприводу реалізований за допомогою блоків основного пакета Simulink.

За структурою система управління виконана одноконтурной з одним цифровим ПІ-регулятором швидкості UR_PI і негативним зворотним зв'язком за швидкістю. Сигнали заданих швидкостей видаються блоком ER, а значення пасивного моменту навантаження формує блок EMc. Через блок W_N масштабується сигнал фактичної швидкості. Безпосередньо векторне управління забезпечує структура блоку SVM, на входи якого подаються сигнали від регулятора швидкості, а через датчик напруги UV надходить

інформація про величині випрямленої напруги. Вихідний сигнал блоку SVM є керуючим для вентилів автономного інвертора UZ.

Для реалізації гальмівних режимів призначений спеціальний блок ВСН, що має гальмівний резистор, на якому виділяється енергія при динамічному гальмуванні. Частота комутації резистора забезпечується пропорційним регулятором через IGBT-ключ.

Підсистема Sub_3 виділяє сигнали заданої і фактичної швидкостей, а також електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження.

Задається швидкісна діаграма роботи моделі відповідає наступним алгоритмом:

- 0 $t \leq 1$ с - пауза перед запуском;
- 1 $t \leq 3$ с - розгін електроприводу до максимальної швидкості ω_{\max} ;
- 3 $t \leq 4$ с - рух зі сталою максимальною швидкістю ω_{\max} ;
- 4 $t \leq 5$ с - уповільнення електроприводу до половинної швидкості $\omega_{\max}/2$;
- 5 $t \leq 6.4$ с - рух зі сталою швидкістю $\omega_{\max} / 2$;
- 6.4 $t \leq 7.2$ с - уповільнення електроприводу до швидкості $\omega_{\max} / 9$;
- 7.2 $t \leq 7.8$ с - рух зі сталою швидкістю $\omega_{\max} / 9$;
- 7.8 <math>t < 8</math> с - гальмування електроприводу до повної зупинки;
- 8 <math>t < 9</math> з - пауза після зупинки;
- t = 9 с - закінчення моделювання.

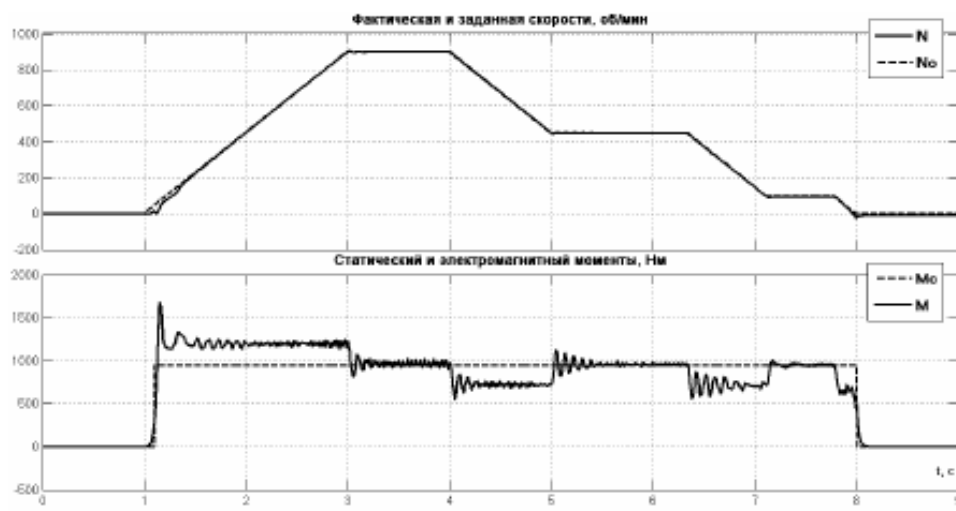


Рисунок 4.19 - Швидкісні і навантажувальні діаграми асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Динамічні процеси, що протікають в даній системі електроприводу контролюються осцилографом Scope1. На рис. 4.19 представлені швидкісні (фактична і задана швидкості) і навантажувальні (момент навантаження і електромагнітний момент) діаграми роботи системи електроприводу за аналізований період моделювання.

Отримана швидкісна діаграма показує високу точність відпрацювання заданої швидкості у всьому діапазоні регулювання, крім початкової ділянки розгону, що пов'язано з необхідністю подолання пасивного моменту навантаження.

Діаграма моментів ілюструє постійний характер навантаження, а також виконання основного рівняння руху електроприводу при згасаючих коливаннях на ділянках запуску і гальмування. Наявність коливань в кривій моменту зумовлюється самою структурою системи управління, в якій відсутній канал регулювання струму (моменту). Така структура пропонується в даний час на ринку України практично всіма провідними фірмами виробниками електротехнічної продукції.

Спільне розгляд швидкісний діаграми і діаграми моментів дозволяє визначити руховий режим роботи системи електроприводу (знаки кутової швидкості і моменту збігаються).

До основних енергетичних характеристик електроприводу зазвичай відносять робочі характеристики. Це залежності активної, реактивної і повної споживаної потужності від потужності навантаження на валу двигуна:

$$P, Q, S = f(P_2).$$

Ці характеристики дозволяють визначити ще два важливих показники: коефіцієнт корисної дії (КРД) - $\eta = P_2 / P$ і коефіцієнт потужності (Кs) - $\cos\varphi = P / S$.

Основні енергетичні показники для системи електроприводу в цілому і для двигуна окремо визначаються відповідно підсистемами $BE1$ і $BE2$ згідно сигналам, що подаються блоками Sub_1 і Sub_2 . На входи $BE1$ і $BE2$ подаються також сигнали фактичної кутової швидкості ω і моменту двигуна M для обчислення корисної потужності на валу двигуна $P_2 = M\omega$.

Підсистеми *Sub_1* і *Sub_2* представляють собою комплект датчиків, які видають інформацію про миттєвих значеннях струмів і напруг в кожній фазі відповідно на вході всієї системи і безпосередньо в обмотці статора двигуна.

Основним елементом підсистем *BE1* і *BE2* є блок *Active & Reactive Power*, який з трифазної системи фазних напруг і струмів виділяє активну P і реактивну Q складову потужності, а потім визначається і повна потужність S .

Енергетичні показники протягом періоду моделювання фіксуються в робочому просторі системи *MATLAB* за допомогою блоків *To Workspace 1* (для всієї системи в цілому) і *To Workspace 2* (для двигуна).

На рис. 3 показані тимчасові діаграми зміни повної потужності і її складових за модельований період для системи в цілому і для двигуна окремо.

Діаграма потужностей всієї системи (рис. 3, а) наочно відображає динаміку зміни повної потужності і її складових, а також характерних ділянок швидкісної діаграми. При цьому споживання реактивної потужності незначно, тому криві повної і активної потужностей практично збігаються.

З діаграми потужностей двигуна (рис. 4.20, б) видно процес зростання споживання реактивної складової, що призводить до збільшення споживання повної потужності. При цьому активна складова фактично залишається незмінною.

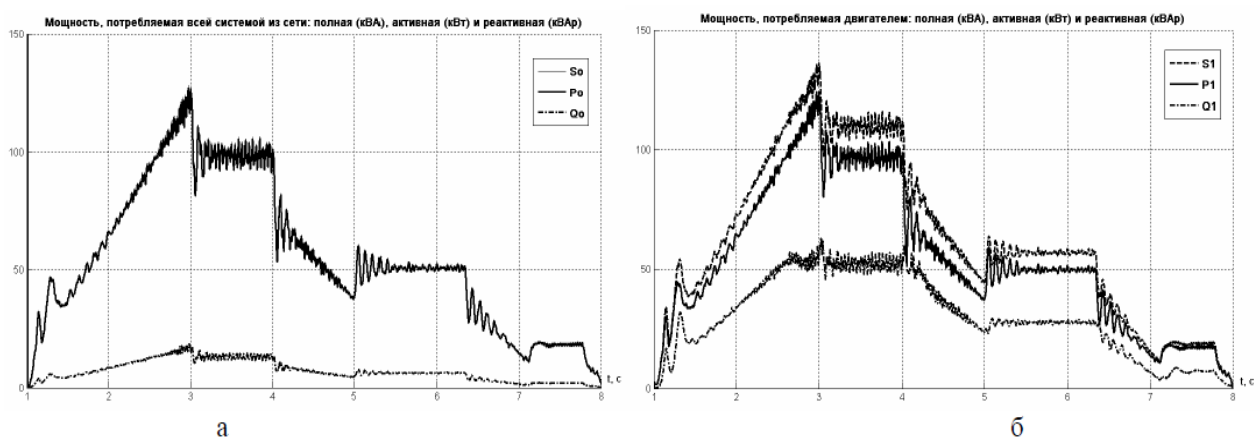


Рисунок 4.20 - Діаграми повної потужності і її складових: а - системи електроприводу в цілому, б - електродвигуна.

На рис. 4.21 представлена динаміка зміни таких важливих енергетичних показників електроприводу, як коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ і коефіцієнт корисної дії η в одних координатах для всієї системи і для двигуна.

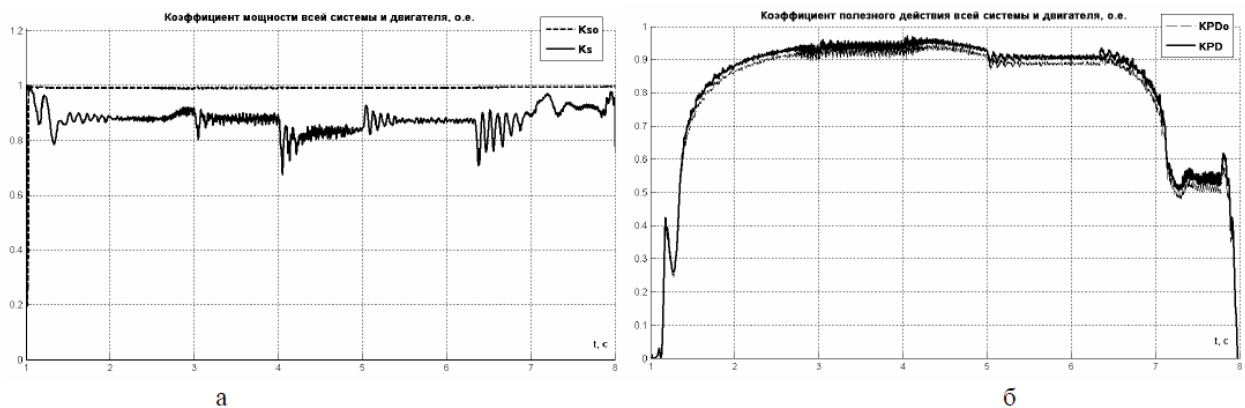


Рисунок 4.21 - Діаграми зміни енергетичних показників:

а - коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, б - коефіцієнта корисної дії η

Діаграма $\cos\varphi = f(t)$ (рис. 4, а) підтверджує той факт, що для системи частотно-регульованого асинхронного електроприводу в цілому характерно високе значення коефіцієнта потужності у всьому діапазоні регулювання (близький до одиниці). Для двигуна значення коефіцієнта трохи нижче і підвищується при роботі на малих швидкостях, при цьому середня величина коефіцієнта потужності порядку 0,9.

Значення коефіцієнта корисної дії залежать від величини швидкості (рис. 4.21, б). При невеликому діапазоні регулювання до 2: 1 ККД досить високий (0,9 і більше), а при розширенні діапазону до 9: 1 його значення суттєво зменшується (не більше 0,6). На отриманих діаграмах добре видно, що значення ККД для всієї системи трохи нижче, ніж у двигуна. Це пов'язано з втратами в додаткових елементах обмотки ланцюга (випрямляч, інвертор і ін.).

Розміщення всіх результатів обчислень в робочому просторі системи *MATLAB* за допомогою блоків *To Workspace* дозволяє досить зручно і швидко отримувати графічні залежності між необхідними контрольованими змінними в будь-якому їх поєднанні. Так, на рис. 4.22 представлені фазові траєкторії енергетичних характеристик системи електроприводу в цілому (рис. 4.22, а) і для двигуна окремо (рис. 4.22, б).

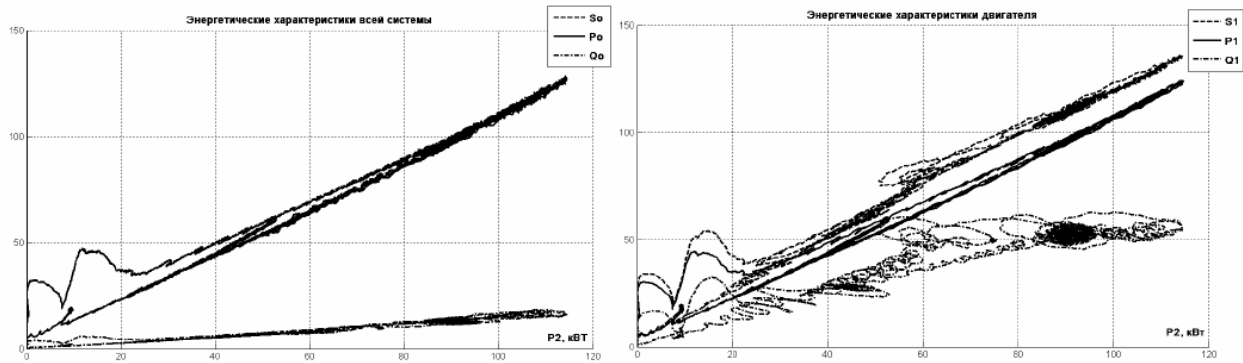


Рис. 4.22 - Фазові траєкторії енергетичних характеристик:

а - для системи електроприводу в цілому, б - для електродвигуна.

Типовим для всіх характеристик є наявність петлі, що відповідає двом різним режиму роботи електроприводу: запуску і гальмування.

Слід зазначити загалом їх лінійний характер, що підтверджує теоретичні розрахунки при проектуванні електродвигунів.

Для кількісного визначення значень контрольованих змінних і енергетичних показників найбільш просто і зручно використовувати блоки цифрової індикації Display пакета Simulink, входи яких підключаються до відповідним лініях зв'язку (знаходяться всередині підсистем BE1 і BE2). При цьому необхідно зупиняти процес моделювання в необхідний момент часу (використовувати кнопку "пауза" на панелі інструментів) і записувати свідчення.

У табл. 4.1 наведені результати вимірювань для моментів часу, відповідних серединам ділянок руху з усталеною швидкістю відповідно до розглянутої швидкісний діаграмою з урахуванням розширення другого діапазону від $\omega_{\max} / 2$ до $\omega_{\max} / 3$.

Таблица 1.

Угловая скорость	Система электропривода в целом					
	P2 (кВт)	Po (кВт)	Qo (кВАр)	So (кВА)	cosφ _o (о.е.)	η _o (о.е.)
ω _{max}	91,3	98,8	13,1	99,7	0,991	0,924
ω _{max} / 3	29,8	35,5	4,23	35,7	0,993	0,836
ω _{max} / 9	9,40	18,1	2,00	18,2	0,994	0,519
Угловая скорость	Электродвигатель					
	P1 (кВт)	P1 (кВт)	Q1 (кВАр)	S1 (кВА)	cosφ (о.е.)	η (%)
ω _{max}	91,3	97,0	52,6	110,4	0,878	0,941
ω _{max} / 3	29,8	34,6	18,3	39,20	0,883	0,859
ω _{max} / 9	9,40	17,2	7,00	18,60	0,926	0,546

Слід зазначити, що застосування віртуальних моделей для дослідження складних електромеханічних систем доцільно і ефективно, так як дозволяє провести всебічний аналіз практично будь-якої системи електроприводу не тільки з точки зору поведінки системи в цілому, а й по відношенню до окремих елементів, що входять в її структуру . При цьому є можливість моделювання процесів, що відповідають реальним електричних мереж і електротехнічним пристроїв.

ВИСНОВОК

На підставі результатів теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Стосовно до об'єкта керування – електропривод станинних роликів чорнової кліті товстолистового стану на базі електродвигуна постійного струму показана можливість використання релейних САР для відпрацювання заданої швидкості з високими показниками якості.

2. Методами оптимального (релейного) керування синтезовані регулятори струму та швидкості, що забезпечує низьку чутливість системи до параметричних збурень.

3. Розроблені програмні коди (набір m-файлів) у середовищі Matlab, що дозволяють проектувати оптимальні САР для інших електромеханічних об'єктів.

4. Результати математичного моделювання з використанням середовища моделювання динамічних систем Matlab/Simulink підтверджують основні теоретичні положення, сформульовані в науковій праці. Створені цифрові математичні моделі електропривода постійного струму з оптимальними регуляторами.

5. Зроблено порівняльний аналіз показників якості роботи системи підпорядкованого керування та релейної системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1(42). Емельянов С.В. Пути развития типов обратных связей и их применение при построении замкнутых динамических систем / Емельянов С.В., Коровин С.К. - Проблемы управления и теории информации, т. 10 № 3, 1984.1. - С. 161 - 174.

2(44). Емельянов С.В. Новые типы обратной связи / Емельянов С.В., Коровин С.К. – М.: Наука. Физматлит, 1997. - 352 с.

3(68). Петров Б.Л. Исследования по теории много связных систем / Сб. под ред. Петрова Б.Л.-М.: Наука, 1982. - 152 с.

4(72). Колмановский В.Б. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием / Колмановский В.Б., Носов В. Р. - М: Наука, 1984.1. - 448 с.

5(80). Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / Куржанский А.Б. - М.: Наука, 1977. -392 с.

6(104). Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Поляк Б.Т., Щербаков П.С. - М.: Наука, 2002. - 303с.

7(43). Емельянов С.В. Применение координатно-параметрической обратной связи при синтезе систем автоматического управления / Емельянов С.В., Коровин С.К., Сизиков В.И. - Проблемы управления и теория информации, т. 10 № 4, 1984.1.- С. 237 - 254.1.

8(65). Ильинский Н.Ф. Основы электропривода / Ильинский Н.Ф. – М.: Издательство МЭИ, 2004. - 221 с.

9(66). Ильинский Н.Ф. Общий курс электропривода / Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 544 с.

10(83). Леонхард В. Регулируемые электроприводы переменного тока / Леонхард В. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 196 - 239.

11(154). Цыпкин Я.4. Информационная теория идентификации / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1995. - 336 с.

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

- 24(151). Метод фазовой плоскости в теории релейных систем / Флюггелотн И. – М.: Физматгиз, 1959. - 176 с.
- 25(1). Андропов А.А. Теория колебаний / Андропов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. - М.: Физматгиз, 1959. - 916 с.
- 26(152). Цыпкин Я.4. Релейные автоматические системы / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1974. - 575 с.
- 27(150). Флоренцев С.Н. Современная элементная база электроники / Флоренцев С.Н., Ковалев Ф.И. - Электротехника, № 4, 1996. - С. 5-12.
- 28(191). Fitzgerald A.E. Electric Machinery / Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D. - McGraw Hill Professional, 2002. - 704 p.
- 29(13). Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / Бесекерский В.А., Попов Е.П. – М.: Наука, 1972. - 768 с.
- 30(28). Воронов А.Л. Теория автоматического управления. В 2-х ч / Воронов А.Л. и др. - М: Высшая школа, 1986.ч.1 - 367 с., ч.2 - 504 с.
- 31(30). Гелиг А.Х. Динамика импульсных систем и нейронных сетей / Гелиг А.Х. - Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1982. - 192 с.
- 32(77). Кунцевич В.М. Нелинейные системы управления с частотно-широотно-импульсной модуляцией / Кунцевич В.М., Чеховой Ю.Н. - Киев: Техніка, 1970. - 340с.
- 33(39). Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / Емельянов С.В. – М.: Наука, 1967. - 336 с.
- 34(40). Теория систем с переменной структурой / [Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А. и другие].– М.: Наука, 1970. - 592 с.
- 35(138). Старикова М.В. Автоколебания и скользящий режим в системах автоматического регулирования / Старикова М.В. - М.: Машгиз, 1962. - 195 с.
- 36(3). Айзерман М.А. Основы теории разрывных систем Ч.1 / Айзерман М.А. Пятницкий Е.С. - Автоматика и телемеханика №7, 1974. - с. 33 - 47.
- 37(37). Принцип блочного управления. Ч.1 / [Дракунов С.В., Изосимов Д.Е, Лукьянов А.Г. и другие]. -Автоматика и телемеханика №5, 1990. - С. 38 -47.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

47. Мотченко А.И., Марченко В.И. Квазиоптимальный по быстродействию релейный электропривод с заданными динамическими свойствами // Труды науч.-техн. конф. "Следящие электроприводы промышленных установок, роботов и манипуляторов". – Челябинск, 1986. – С.16

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

59. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. II. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 5. – С. 561-568.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

69. Инструкция по эксплуатации КТЕ5-А для приводов постоянного тока с регулируемой скоростью.

70. Башарин А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман. – Л.: Энергия, 1974.1. – 440 с.

71. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниково-вых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2004.1. – 320 с.

72. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

73. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. Учебное пособие. 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

74. Півняк Г. Г., Волков О. В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно імпульсною модуляцією: Монографія, – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. - 470 с.

75. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями, Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла, Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет), 2002. - 43 с.

76. Чермалых В. М., Чермалых А. В., Майданский И. Я. Исследование динамики и энергетических показателей электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического

университета (технические науки)

Тематический выпуск. - 2007. - С. 193 - 198.

77. Чермалых А. В. Исследование динамики и энергетических характеристик систем электропривода с помощью виртуальных моделей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - 2005. - Вип. 4/2005 (33). - С. 142 - 147.

78. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. - СПб.: КОРОНА принт, 2002. - 304 с., ил.

79. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. - СПб.: КОРОНА принт, 2003. - 256 с., ил.

80. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. - СПб.: КОРОНА принт, 2001. - 320 с., ил.

Додаток А

Скрипт-программа розрахунку параметрів регуляторів лінійної та релейної системи в пакеті MATLAB

```

n = 440; % Номинальное напряжение электродвигателя, В
In = 248; % Номинальный ток электродвигателя, А
n = 160; % Номинальная частота вращения, об/мин
Jd = 54.9; % Момент инерции двигателя, кгм2
Ra = 0.118; % Сопротивление якорной цепи двигателя, Ом
Ed0 = 768.15; % Максимально выпрямленная ЭДС преобразователя,
В
Re = 0.17*1; % Эквивалентное сопротивление якорной цепи
системы, Ом
Le = 0.017*0.5; % Эквивалентная индуктивность якорной цепи
системы ТП-Д, Гн
Tmu = 5e-3; % Малая постоянная времени ТП, с
Uymax = 10; % Максимальное управляющее напряжение, В
%-----
wn = pi*n/30; % Номинальная угловая скорость вращения
двигателя, 1/с
Jsum = 820.3*1; % Суммарный приведенный момент инерции ЭП,
кгм2
ktp = (Ed0/Uymax)*1; % Коэффициент усиления тиристорного
преобразователя
Te = Le/Re; % Электромагнитная пост. времени системы ТП-
Д, с
cFn = (Un-In*Ra)/wn; % Произведение потока на конст. пост.
двиг-ля, Вc
Tm = Jsum*Re/cFn^2; % Электромеханическая пост. времени ЭП,
Idin = 1.3*In; % Динамический ток, А
Mdin = cFn*Idin; % Динамический момент, Нм
%A = Sk*Mdin/(Jsum*wn^2); % Передаточный коэффициент
механизма, мм/рад
Ic = 0.3*In; % Статический ток

%-----%
%% 2. Синтез ПИ-РТ (модульный оптимум)
%-----%
Imax = 2.5*In; % Максимально допустимый ток якоря (ток
упора), А
kot = Uymax/Imax; % Коэффициент передачи цепи обратной связи
по току, В/А
Tot = 2*Tmu; % Постоянная времени интегрирования контура
тока, с
krtp = Re*Te/(ktp*kot*Tot); % Пропорциональная часть ПИ
регулятора тока
krti = Re/(ktp*kot*Tot); % Интегральная часть ПИ
регулятора тока
Wrt = krtp + tf(krti,[1 0]); % ПФ ПИ-РТ
%-----%

```

```

% Синтез ПИ-РС (симметричный оптимум)
wmax = wn;           % Максимальная скорость двигателя, 1/с
%wmax = wn;
kos = Uymax/wmax; % Коэффициент передачи цепи обратной связи
по скорости, Вс
Tos = 2*Tot;       % Постоянная времени контура скорости, с
krsp = Tm*cFn*kot/(Re*kos*Tos); % Пропорциональная часть
ПИ-РС
krsi = Tm*cFn*kot/(Re*kos*2*Tos^2); % Интегральная часть ПИ-
РС
Wrs = krsp + tf(krsi,[1 0]); % ПФ ПИ-РС

% Фильтр
Tf = 8*Tmu;        % Постоянная времени фильтра, Tf = 2*Tos
Wf = tf(1,[Tf 1]); % ПФ фильтра
%-----%

% Расчет задатчика интенсивности скорости
%tp = Tm*cFn*wmax/(Re*Idin); % Время разгона до
установившейся скорости, с
tp = ((Tm*cFn*wmax)/(Re*Idin))/1;
%tp = 0.2393;
%tp = Jsum*wmax/Mdin; % Время разгона до
установившейся скорости, с
%tp = 4.1.65;
kzis = 1/tp; % Коэффициент передачи ЗИС, В/с
%kzis = Uymax/tp; % Коэффициент передачи ЗИС, В/с
%-----%

% % Расчет параметров позиционного контура
% Uoutmax = 110; % Максимальное вых. напряжение ФЧВ,
В
% kop = (Uoutmax/Sk); % Коэффициент обратной связи, В/мм
% kр = kop*0.89; % Коэффициент обратной связи, В/мм
(0.89 - затяжка)
% krp = kos*2*cFn*Idin/(kop*Jsum*wn*A); % Коэффициент
линейного РП
%% 4. Синтез релейной системы
%-----%
%система pozisionnaja (s)

% % file modeli -> rel_pozisija_est.mdl
% 3 regulatora (v estestv koordinatax)
%clear all
un=Un;
in=In;
nn=n;
ra=Ra;
%wn=4.1415*nn/30;
cf=cFn;

re=Re;
Te=Te;

%ktp=52;

```



```

Tu=Tmu;

J=Jsum;
%Tm=J*re/(cf^2);

Kdin=kdin; % otnochenie dinamich toka k nominalnomu
traz=tp;
%Ic=0.5*in;

%%%%%%%%%%%%5

Uum=Uymax;
im=Imax;
wm=wmax;
%wm=un/cf;
Epm=Ed0;

% ===== regulator skorosti =====

% ob`ekt upravlenija (v estestvennix)
b11w=0;
b12w=(re*im)/(cf*Tm*wm);
b13w=0;
b21w=-(cf*wm)/(re*Te*im);
b22w=-1/Te;
b23w=Epm/(re*Te*im);
b31w=0;
b32w=0;
b33w=-1/Tu;

m3w=ktp*Uum/(Tu*Epm);

Aow=[b11w b12w b13w;b21w b22w b23w;b31w b32w b33w];
Uw=[0 0 m3w];

% matrica Barbachina
Bw=[b11w b21w b31w 0 0 0;
    b12w b11w+b22w b32w b21w b31w 0;
    b13w b23w b11w+b33w 0 b21w b31w;
    0 b12w 0 b22w b32w 0;
    0 b13w b12w b23w b22w+b33w b32w;
    0 0 b13w 0 b23w b33w];
Kw=[-1;0;0;0;0;0];
Aw=inv(Bw)*Kw;

Kwi=Aw(5)/Aw(3);
Kwe=Aw(6)/Aw(3);
Kw=1; % :-)
KW=[Kw Kwi Kwe] %-> vector-stroka upravlenij

% ===== regulator toka =====

% ob`ekt upravlenija (v estestvennix)

b11i=-1/Te;

```

```
b12i=(1/(re*Te))* (Epm/im);  
  
b21i=0;  
b22i=-1/Tu;  
  
m2i=ktp*Uum/(Tu*Epm);  
  
Aoi=[b11i b12i;b21i b22i];  
Ui=[0 m2i];  
  
% matrica Barbachina  
Bi=[b11i b21i 0;  
    b12i b11i+b22i b21i;  
    0 b12i b22i];  
Ki=[-1;0;0];  
Ai=inv(Bi)*Ki;  
  
Kie=Ai(3)/Ai(2);  
Ki=1; % :-)  
KI=[Ki Kie] %-> vector-stroka upravljenij
```