

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 ножиць для поперечного різання гарячого металу

Виконав: студент групи ЕЕ-22зм  
Корчма О. М.  
(прізвище, та ініціали)

  
(підпис)

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Завідувач кафедри  
доц. Руднев Є. С.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент  
доц. Іванов В. Г.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ 2023 р.

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.

“ ” 2023 року

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Корчмі Олександр Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом ножиць для поперечного різання гарячого металу

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “15” 11 2023 р. № 50 / 15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 12 грудня 2023 р.

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

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

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

## 6. Консультанти розділів проекту

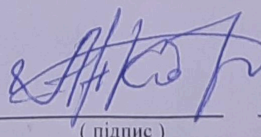
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	доц. Руднев С. С.		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент


  
(підпис)

Корчма О. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

(підпис)

Руднев С. С.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 97 сторінок, 32 рисунка, 78 найменування літературних посилань.

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

*Предметом дослідження* є електропривод постійного струму ножиць поперечного різання товстолистового стану з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

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

Розроблено електропривод за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму. Синтезовані дві системи керування: система підпорядкованого керування з безперервними регуляторами (ІІІ-регулятора струму та ІІ-регулятора швидкості) і релейна система оптимального керування. В середовищі MATLAB розроблені моделі систем електропривода та програмні коди розрахунку параметрів регуляторів оптимальної системи та визначення залежностей показників якості системи від параметрів системи методом найменших квадратів.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, МЕХАНІЗМ НОЖИЦІ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РЕЛЕЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ .....	12
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ.....	20
2.1 Опис роботи механізму ножиць поперечного різання та його конструкції .....	20
2.2 Розрахунок статичних навантажень.....	25
2.3 Розрахунок потужності та вибір електродвигунів ножиць.....	28
3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕП .....	32
3.1 Вибір комплектного електропривода ножиць .....	32
3.2 Вибір силового трансформатора та згладжувального дроселя .....	33
3.3 Склад обладнання електроприводу.....	35
3.4 Опис системи керування ЕП ножиць поперечного різання .....	36
3.5 Математичний опис об'єкта керування.....	41
3.6 Розрахунок основних параметрів елементів системи ЕП.....	42
3.7 Синтез лінійного регулятора струму .....	45
3.8 Синтез лінійного регулятора швидкості.....	50
3.9 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості.....	54
3.10 Моделювання електроприводу механізму ножиць з підпорядкованою системою керування в Matlab/Simulink .....	58
4 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ .....	68
4.1 Загальні положення синтезу системи методом аналітичного конструювання регуляторів .....	69
4.2 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат .....	71
4.3 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат .....	74

	5
4.3 Моделювання ЕП ножиць поперечного різання з релейною системою керування в середовищі Matlab/Simulink .....	76
4.4 Синтез двомасової системи ЕП з використанням структурування передатних функцій .....	85
ВИСНОВОК.....	90
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	91

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасному світі, орієнтованому на автоматизацію технологічних процесів, виникає настанова на пошук загальних принципів синтезу систем управління для складних об'єктів, які в повній мірі враховують і використовують унікальні властивості самого об'єкта управління [1-6]. За такого підходу, конкретні характеристики об'єкта управління, обумовлені його фізичною природою, не тільки враховуються, але й активно використовуються для досягнення визначеної мети. Це сприяє виникненню нових принципів і принципів управління, які, разом із забезпеченням високої якості управління, сприяють досягненню високих техніко-економічних показників системи. Проте в нелінійному світі відсутні стандартні шляхи та універсальні методи, які були б характерні для лінійної теорії управління. Кожна форма нелінійності унікальна та породжує свої власні методи синтезу. Це викликає необхідність розробки індивідуальних стратегій керування для кожного конкретного випадку нелінійної системи, враховуючи її особливості та особливі вимоги. Такий індивідуальний підхід дозволяє максимально використовувати потенціал кожного об'єкта управління і підтримує найвищий рівень ефективності та функціональності систем керування в умовах нелінійного середовища.

Серед різноманітних нелінійних об'єктів керування, автоматизовані електроприводи (ЕП) визначаються як одні з найбільш вагомих у сучасному технічному ландшафті. Знаходячись у центрі уваги, ЕП відзначаються тим, що більше 60% усієї виробленої енергії в промислово розвинених країнах споживається саме ними [7-12]. Це підкреслює стратегічне значення ефективного управління електроприводами для оптимізації використання електроенергії в індустріальних процесах.

Сучасна промисловість широко використовує електроенергію, яка становить близько третини виробленої, часто непоправною, первинної енергії. Проте, враховуючи постійний ріст споживання електроенергії, стає зрозумілим, що вирішення завдань раціонального використання енергії стає ключовою проблемою. В цьому контексті, виробництво алгоритмів управління для

електроприводів, спрямованих на досягнення завдань керування з мінімальними витратами електроенергії, визначається як один з потенційних шляхів вирішення цієї проблеми [13-18]. Отже, актуальність розробки і вдосконалення алгоритмів управління для електроприводів підкреслюється не тільки з погляду ефективного використання електроенергії, але й з точки зору оптимізації технічних процесів та забезпечення сталого розвитку промисловості.

На сьогоднішній день найбільш перспективними у сфері енергоефективності та компактності конструкцій є електроприводи, які базуються на використанні електричних машин змінного струму, живлених від силових напівпровідникових перетворювачів напруги. Незважаючи на це, електроприводи постійного струму залишаються широко використовуваними на промислових підприємствах, зокрема на металургійних комбінатах, завдяки своїм універсальним властивостям та ефективності.

Однією з характерних особливостей таких електроприводів є релейна нелінійність. Ця особливість зумовлена режимом роботи сучасних силових приладів, які переважно працюють у "ключовому режимі" для забезпечення мінімізації втрат енергії [8-9, 11, 15-16, 19-22]. Такі динамічні системи є принципово нелінійними, описуються диференціальними рівняннями з розривним керуванням, і їх названо релейними системами або системами з розривним керуванням. Цей характер роботи систем забезпечує їм високу ефективність та мінімізацію енерговитрат у ключових моменти функціонування. Попри те, що це визначає їхню релейну нелінійність, цей підхід є ключовим для забезпечення оптимальної ефективності електроприводів у сучасному індустріальному середовищі.

Історія релейних систем має давні корені і сягає часів, коли напівпровідникові прилади були ще не відомі. Початок цієї історії пов'язаний із винайденням релейного зворотного зв'язку, який вперше був використаний Ч. Шофілдом у 1836 році [14, 23, 24]. Навіть незважаючи на тенденцію релейних



систем до автоколивань, їхню простоту в реалізації в поєднанні з високими динамічними властивостями та самоадаптацією при зміні параметрів та навантаження дозволили цим системам широко розповсюджуватися. Це визначило початок створення теорії релейних систем.

Перший етап розвитку теорії релейних систем був пов'язаний передусім з внеском А.А. Андронова [25], Я.З. Ципкіна [24, 26] та І.Флюгге-Лотц [27, 28]. Згодом, з цієї теорії виникли самостійні напрямки, такі як: теорія нелінійних систем автоматичного керування з різними видами модуляції [29-32] та теорія систем автоматичного керування зі змінною структурою [33-35].

Розвиток цих напрямків виокремив нові принципи та методи, спрямовані на вдосконалення релейних систем та розширення їхнього застосування в різних областях автоматизації та управління. Такий розвиток визначив значний внесок у теорію керування та автоматизації систем.

Академік С.В. Ємельянов вважається основоположником теорії систем зі змінною структурою, і його внесок в розвиток цієї теорії виявився важливим та плідним. Він виховав цілу групу вчених, які подальше внесли суттєвий вклад у цю галузь. Ця теорія суттєво відрізняється від попередніх напрямків, і ключовою ідеєю стала концепція використання ковзного режиму для синтезу систем автоматичного керування. Ковзний режим представляє собою специфічний вид руху, що виникає у релейних системах при певних умовах, і властивий саме цій класу систем. Описаний режим дозволяє досягти високої якості процесів керування в динамічних системах, забезпечуючи інваріантність до зовнішніх збурень та малу чутливість до змін динамічних властивостей ОК.

Подальший розвиток теорії привів до виникнення теорії систем з розривним управлінням [36-41] та теорії бінарних систем [1-2, 7]. Перша з них ґрунтується на використанні багатовимірного змінного режиму в просторі стану для вирішення завдань керування. Друга теорія базується на принципі бінарної, або двоїстої, природи сигналів в нелінійних динамічних системах, що дозволяє застосовувати синтез операторів стабілізуючого зворотного зв'язку на допоміжній нелінійній системі. Ці новаторські підходи відкривають нові можливості для розв'язання складних завдань керування в різноманітних

технічних системах.

Можливість та перспективність використання ковзних режимів для керування електроприводами на базі напівпровідникових перетворювачів напруги отримали широке застосування [42-45]. Це визначено переходом до сучасних силових напівпровідникових перетворювачів, елементи яких працюють в ключовому (релейному) режимі. Цей підхід став особливо актуальним завдяки бурхливому розвитку силової напівпровідникової техніки і введенню нових типів високочастотних силових приладів, що базуються на технологіях MOSFET і IGBT.

У зв'язку з цим, фахівці з області керування та електроприводу виявили інтерес до використання релейних законів керування, зокрема на основі ковзних режимів [46-49]. Це стало можливим завдяки прогресу напівпровідникової техніки і переходу до сучасних силових напівпровідникових перетворювачів, де силові елементи працюють у ключовому режимі.

Розширення можливостей сучасних напівпровідникових технологій стало основою для побудови та вдосконалення провідникових перетворювачів електричної енергії, що знаходять широке використання в автоматизованих електроприводах. Зокрема, вони все активніше використовують багатовимірне релейне керування, особливо в контурі регулювання фазних струмів електродвигуна. В літературі цей підхід отримав різні назви, такі як "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 інші. Однак для найбільш повного розуміння процесів, що відбуваються при використанні цього виду керування, рекомендується використовувати термін "керування на ковзних режимах".

Ножиці представляють собою ефективний інструмент для різання як гарячого, так і холодного металопрокату в поздовжньому і поперечному напрямках. Вони застосовуються для виконання різних операцій, таких як поріз

металопрокату на мірні довжини, обрізання передніх і задніх кінців, поперечне різання широких листів на стрічки та обрізання кромek у листів.

В залежності від характеру різання використовують різні конструкції ножів, які визначають типи ножиць. До одного з таких типів відносять ножиці з паралельними ножами. Цей тип ножиць широко використовується для різання гарячого металу квадратного і прямокутного перерізу на шматки мірної довжини. Також вони застосовуються для обрізки передніх і задніх кінців металу після прокатки на блюмінгах, слябінгах заготовочних і сортових станах.

Залежно від конструкції, ножиці поперечного різання з паралельними ножами можуть бути двох типів: з верхнім різом, коли різання відбувається верхнім різом, і з нижнім різом, коли різання відбувається при русі нижнього ножа. Такий різновид ножиць дозволяє ефективно вирізати та формувати металеві вироби з високою точністю та швидкістю.

У сучасний період одними з найпоширеніших і широко використовуваних в промисловості є системи керування електроприводом, які базуються на принципі підпорядкованого керування. В порівнянні з попередніми поколіннями систем, ці нові рішення відрізняються значною швидкодією та побудовані на основі уніфікованих елементів, що спрощує процес проектування та збирання.

Умови сучасного ринку, що характеризуються швидким зростанням важливості регульованих електроприводів, вимагають суворої економії матеріальних і трудових ресурсів. Оцінка переваг електроприводів тепер проводиться не тільки за досягнутим ефектом в технологічній сфері, але й за ціною, яку вони представляють в сфері виробництва та експлуатації обладнання. Таким чином, спостерігається тенденція до глибокої уніфікації пристроїв керування, що сприяє ефективному використанню ресурсів та забезпечує оптимальні показники виробництва й експлуатації обладнання.

**Об'єктом дослідження** є електромагнітні та механічні процеси в вентильному електроприводі з двигуном постійного струму та підвищення показників якості його роботи системи.

**Предметом дослідження** є електропривод постійного струму ножиць поперечного різання товстолистового стану з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

**Метою** роботи є синтез релейної системи керування електроприводом ножиць поперечного різання, 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 методом найменших квадратів.

# 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У системах автоматичного регулювання технологічних процесів часто спостерігаються коливання параметрів, що можуть впливати на ефективність і точність регулювання. Наприклад, в системі регулювання товщини на реверсивному стані холодної прокатки алюмінію може відбуватися значне зміння загального коефіцієнта підсилення. У різних каналах регулювання ця зміна може бути від 4 до 15 разів внаслідок впливу натискання та натягу, відповідно. Багато об'єктів управління, особливо ті, що використовують кривошипно-шатунні механізми, можуть піддаватися значним змінам у приведеному моменті інерції та електромеханічній сталій часу, обумовленій їхньою конструкцією.

Неперервні системи з підпорядкованим регулюванням і послідовним коригуванням отримали широке застосування через їхню простоту в розрахунках і налаштуваннях. Однак ці системи виявляють високу чутливість до змін параметрів і зовнішніх впливів. Елементи системи піддаються старінню, а характеристики можуть змінюватися внаслідок температурних похибок, що призводить до втрати якості динамічних характеристик електроприводу, формування діаграм струму і швидкості електродвигуна.

Недоліками лінійних систем підпорядкованого регулювання, виявленими у [51], є статизм при збуренні в однократно інтегруючих системах та значне динамічне падіння швидкості в системах з дворазовим інтегруванням. Більше того, умови стійкості у лінійних системах не дозволяють використовувати великі коефіцієнти підсилення.

Отже, при синтезі системи управління електроприводом важливо одночасно забезпечити високу точність виконання завдань, тобто оптимізацію з мінімізацією інтегральної квадратичної похибки, а також забезпечити низьку чутливість до змін різних параметрів об'єкта управління та до зовнішніх збурень. У контексті цієї задачі створення систем оптимального управління, які залишаються стійкими при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення,

визначається як найбільш перспективне рішення. Важливо, щоб у таких системах уникнути протиріччя між точністю та 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  $f_{\Pi}$ .

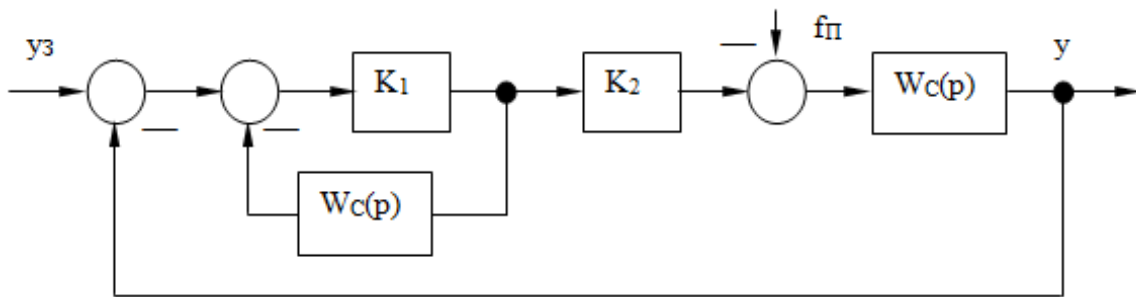


Рисунок 1.1 – Структурна схема замкненої лінійної системи регулювання

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  $W_{y_3}$ ,  $W_{f_{\Pi}}(p)$  і виконання необхідних перетворень виходить наступне рівняння для визначення  $y(p)$ :

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

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 здійсненим, 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:

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

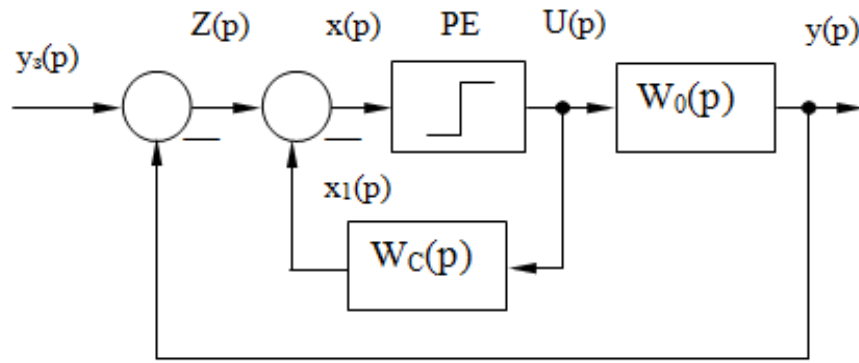


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи, що має релейний елемент

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.



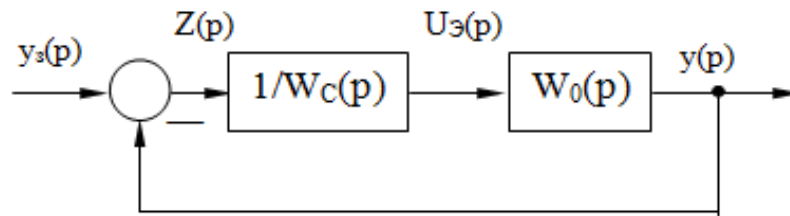


Рисунок 1.3 – Структурна схема лінійної системи, що еквівалентна релейній

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 1.4. 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.

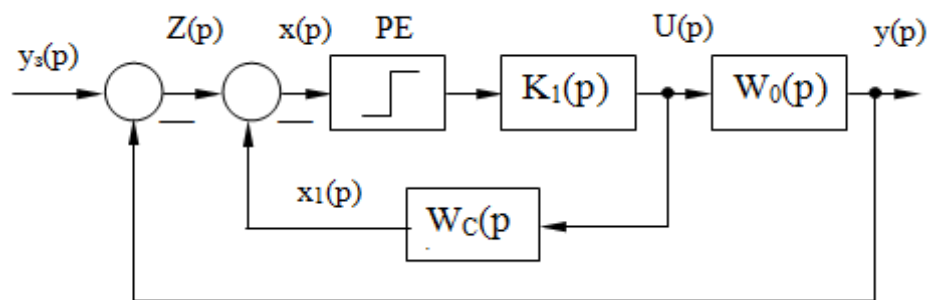


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління

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).

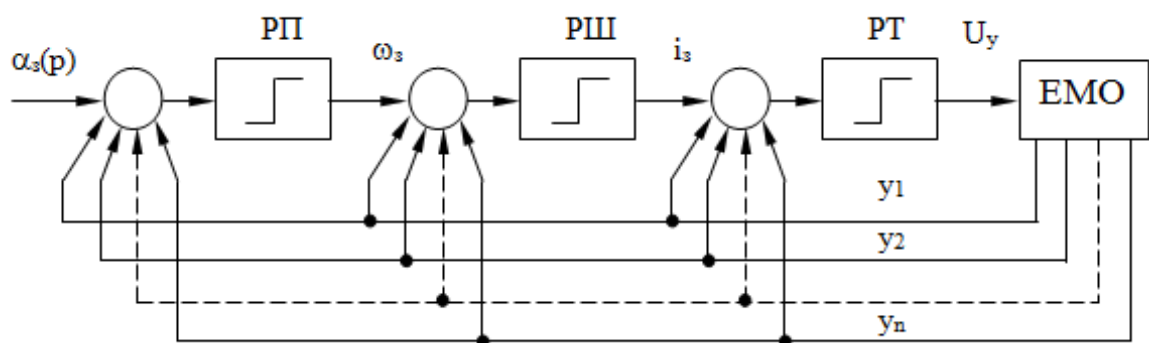


Рисунок 1.5 – Структурна схема оптимальної САУ

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 роботи механізму ножиць поперечного різання та його конструкції

Функціональні можливості ножиць поперечного різання №2 охоплюють обрізку переднього й заднього кінців розкату, вирізання матеріалу на мірні довжини, формування планок для проб, а також порізку листів на сутунку. Загальна конструкція ножиць включає в себе станини, спрямовані донизу, що утворюють ножовий стіл, і верхню частину з передньою панеллю та редуктором головного привода, розташованим між станинами. Верхній супорт з радіусним ножом, який може здійснювати рух, обертаючись відносно ножового столу, також розташований між передньою панеллю та редуктором.

Для виконання різання верхній супорт, обладнаний радіусним ножом, переміщується за допомогою обертових валів, що обертаються в одному напрямку та з однаковою швидкістю. Рух, який поєднує зворотно-поступальний рух, передається через два шатуни, призначені для цього завдання.

Ексцентрикові вали, розташовані в передній панелі та редукторі, приводяться в обертання двома двигунами постійного струму через редуктор. Електродвигуни розташовані між станинами на траверсі для забезпечення стійкості та точності роботи системи. Таким чином, структура та принцип дії ножиць поперечного різання №2 ретельно розглянуті, що є ключовими елементами технологічного процесу гарячої прокатки.

Електродвигуни активуються при кожному різі та автоматично вимикаються, коли верхній супорт досягає свого максимального верхнього положення, використовуючи вимикач шляхового 201SQ. Механізм ножиць фіксується в цьому верхньому положенні за допомогою гальма.

Ножиці оснащені притисками, розташованими з боку входу смуги в ножиці, які призначені для фіксації (притискання) листа під час процесу різання.

Притиск складається з чотирьох повзунів, які з'єднані попарно та

приводяться у зворотно-поступальний рух за допомогою системи тяг, керованих двома гідроциліндрами.

Робота притисків відбувається наступним чином. Лист, який просувається по рольгангові перед ножицями, наближається до ножиць поперечного різання з різом, що котиться, для обрізки передньої та задньої країн. Для забезпечення перпендикулярності лінії різання до бічної кромки листа притиск проводиться до лівої стаціонарної лінійки (з точки зору руху металу) за допомогою роликового штовхача напрямного пристрою.

При підході розкату до лінії різання, оператор видає команду на зупинку рольганга перед ножицями та активування головного привода для початку процесу різання. Команда на опускання повзунів притиску подається з поста управління ножицями одночасно з включенням їх для різання. Протягом різання притиски утримують розкат.

Після повороту ексцентрикового вала ножиць на кут  $270^\circ$  від нульового положення, відбувається активація сигналу на підйом притисків згідно із шляховим вимикачем 201SQ. Притиски піднімаються у верхнє вихідне положення, що контролюється кінцевими вимикачами, з амплітудою ходу – 160 мм.

Ножиці обладнані вузлом захисту привода при різанні пальців напівмуфти, включаючи вимикачі кінцевого положення 201SQ1, 201SQ2 і 202SQ1, 202SQ2. При справній муфті обидва датчика випромінюють одночасний імпульс із точнішею однаковою тривалістю, свідчачи про справність муфти.

Однак, при різанні пальців напівмуфти починають обертатися з різними швидкостями (або напівмуфта з боку механізму зупиняється). Це призводить до розходження часових імпульсів датчиків, що викликає автоматичне відключення привода.

На рисунках 2.1 та 2.2 наведено кругову діаграму роботи ножиць та кінематичну схему механізму ножиць поперечного різання товстолистого стану.

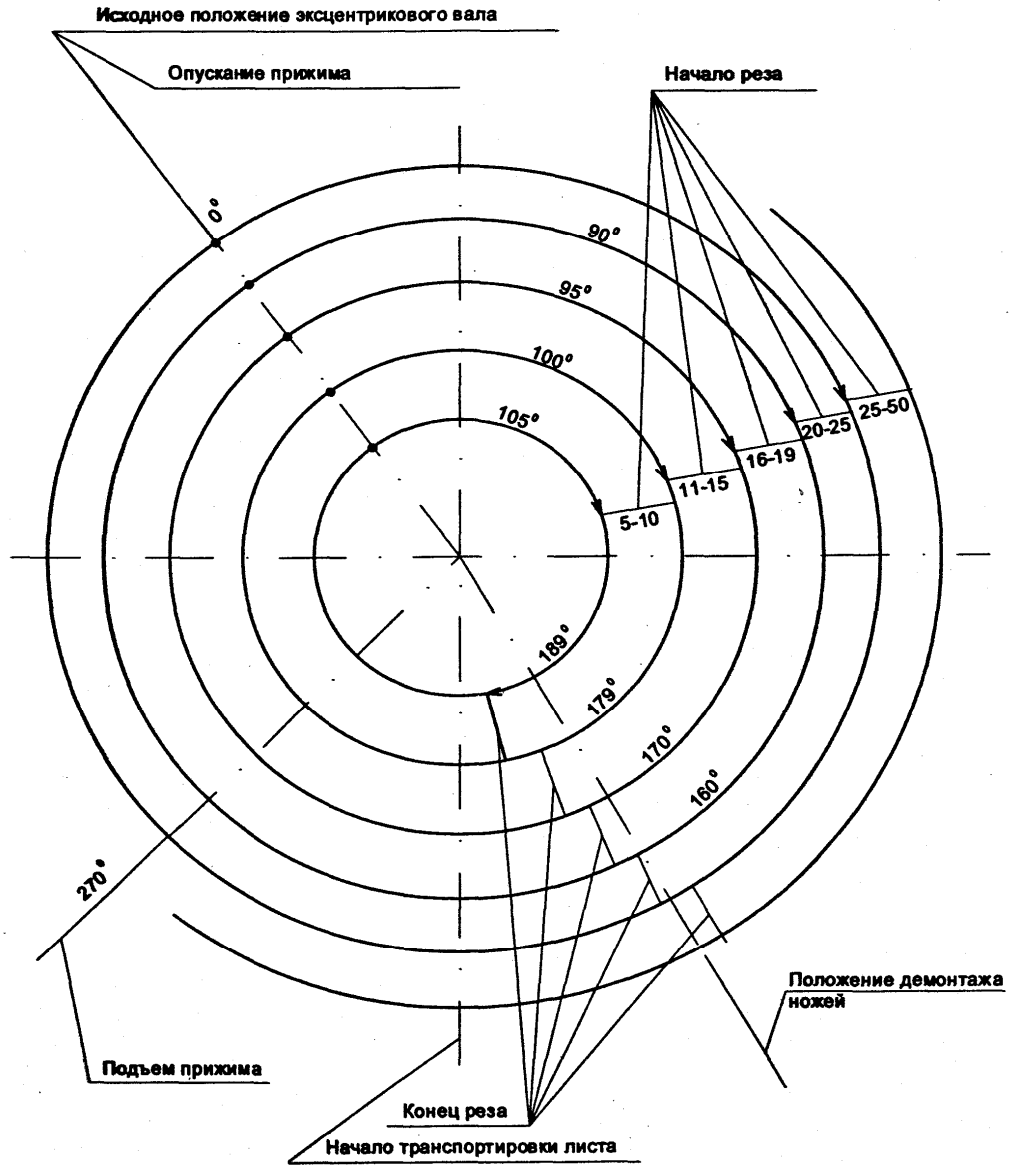


Рисунок 2.1 – Кругова діаграма роботи ножиць поперечного різання

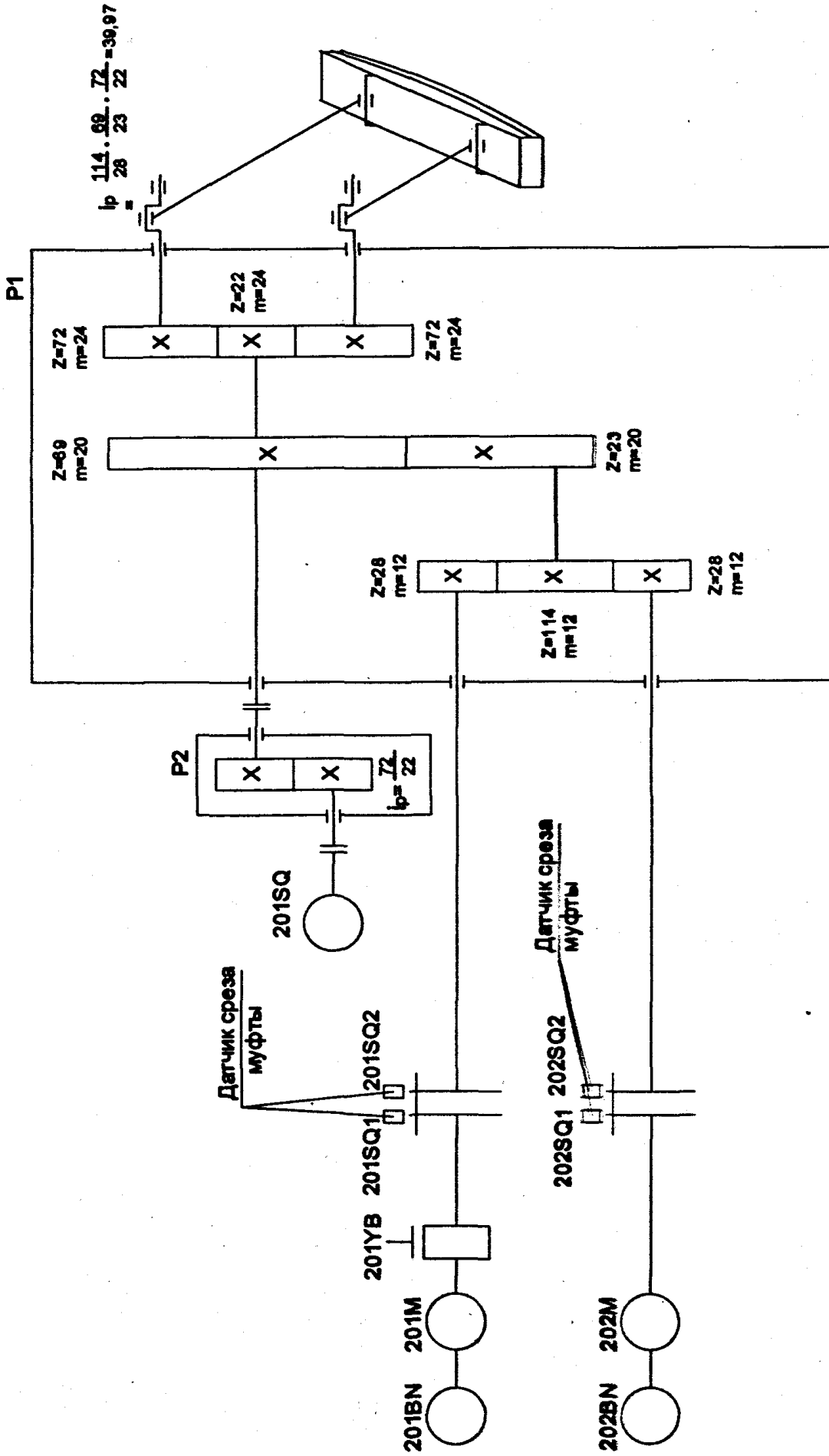


Рисунок 2.2 – Кінематична схема ножниць поперечного різання прокатного стану



Таблиця 2.1 – Технічна характеристика ножиців поперечного різання № 2

Найменування параметра	Розмірність	Величина
Максимальне зусилля різання	кН	15200
Максимальний крутний момент на приводному валу ножиців	кНм	1600
Найбільше число різів	різ/хв	6-8
Зазор між ножами	мм	0,5-3,5
Розкриття ножів максимальне	мм	148
Довжина ножів	мм	2750
Максимальна ширина листа, що транспортується через ножиці без порізу	мм	2650
Характеристика металу, що розріжеться		
Розрахункова марка сталі		Ст3
товщина листа	мм	8-50
довжина листа	мм	12000
ширина листа	мм	1100-2500
механічні властивості розрахункової марки сталі металу, що розріжеться, при температурі різання 200°C:		
межа міцності при розтяганні $\sigma_b$	Мпа	600
відносне подовження $\delta_s$	%	32
Момент інерції механізму доведений до вала двигуна	кгм <sup>2</sup>	120
Передаточне число редуктора		39,974
Швидкість обертання вхідного вала	с <sup>-1</sup>	74,3
Час різання в режимі "старт-стоп":		
при товщині листа 5-35 мм	с	3,6
при товщині листа 36-50 мм	с	4,6
Найбільший статичний момент, доведений до швидкохідного вала редуктора	Нм	51,07×103
Найбільший статичний момент на ексцентриковому валу	тм (кНм)	155 (1519)

## 2.2 Розрахунок статичних навантажень

Методика вибору потужності ЕП ножиців поперечного різання представлена в навчальних посібниках [61,62].

Для визначення необхідної потужності різання використовуються формула В.В.Носаля тому що вона враховує більше число параметрів і дає більше значення зусилля різання, чому формула А.А. Корольова [61].

Відповідно до методики В.В. Носаля, повне зусилля різання визначається по формулі:

$$F_{\Sigma} = k \cdot 0,6 \cdot \sigma_b \cdot \delta_s \cdot \frac{h^2}{\operatorname{tg} \varphi} \left( 1 + \frac{1}{1 + \frac{10\delta_s}{\sigma_b \cdot y^2 \cdot x}} + Z \frac{\operatorname{tg} \varphi}{0,6 \cdot \delta_s} \right), \quad (2.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, враховуючий притуплення ножів і міцність металу, що розрізється й залежної від товщини металу;

$\delta_s$  – відносне подовження металу при випробуванні на розрив;

$y = \frac{\Delta}{h}$  – величина відносного бічного зазору між ножами;

$\Delta$  – бічний зазор між ножами, застосовується залежно від товщини листа, мм;

$x = \frac{H}{h}$  – коефіцієнт, що враховує дію притиску;

$H$  – відстань між ріжучою кромкою нижнього ножа й центром притиску в мм, що залежить від товщини листа;

$Z$  – коефіцієнт вигину.

З аналізу формули (2.1) і вираження (3.22) з [61] випливає:

– с збільшенням глибини надрізу й межі міцності металу зусилля різання збільшується;

– зусилля різання пропорційно квадрату товщини листа;

– зусилля різання назад пропорційно тангенсу кута нахилу ножа, зі збільшенням кута зусилля різання зменшується.

Практично ухвалюємо  $\varphi \leq 6^0$ , тому що в цьому випадку зусилля виштовхування листа з-під ножів не перевищує 11 % від  $F_{max}$  [61, 64].

Для визначення повного зусилля різання ухвалюємо наступні значення коефіцієнтів [61]:  $\delta_s = 0,32$  [65];  $y = \frac{\Delta}{h} = \frac{3,2}{50} = 0,064$ ;  $k = 1,25$ ;  $H = 100$  мм;

$$x = \frac{H}{h} = \frac{100}{50} = 2 \text{ [66].}$$

Коефіцієнт вигину  $Z$  визначається залежно від допоміжного коефіцієнта  $\lambda$  обумовлений вираженням

$$\lambda = c \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sigma_b \cdot h} = 500 \frac{\operatorname{tg} 5,0125}{600 \cdot 50} = 0,001, \quad (2.2)$$

де  $c = 500$  мм – ширина смуги, що відрізається, [67].

Відповідно до рисунка 8 [66] коефіцієнт вигину  $Z = 0,02$ , тоді

$$F_{\Sigma} = 1,25 \cdot 0,6 \cdot 600 \cdot 0,32 \cdot \frac{50^2}{\operatorname{tg} 5,0125} \left( 1 + \frac{1}{1 + \frac{10 \cdot 0,32}{600 \cdot 0,064^2 \cdot 2}} + 0,02 \frac{\operatorname{tg} 5,0125}{0,6 \cdot 0,32} \right) =$$

$$= 6,628 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Величина обертового моменту на вхідному валу залежно від повороту кривошипа визначається по формулі:

$$M_{дв} = \frac{m_k \cdot F_{\Sigma}}{1000 \cdot i}, \quad (2.3)$$

де  $m_k$  – наведене плече моменту, що зивається.

Для центрального кривошипно-шатунного механізму  $m_k$  визначається формулою:

$$m_k = m_k^{\alpha} + m_k^f, \quad (2.4)$$

де  $m_k^{\alpha} = R \left( \sin \alpha + \frac{\lambda_1}{2} \sin 2\alpha \right)$ , мм – ідеальне плече [66];

$$m_k^f = 0,06 \left( (1 \pm \lambda_1) \cdot r_A + \lambda_1 \cdot r_B + r_0 \right), \text{ мм – плече тертя;}$$

$$R = \frac{H_p + h_n}{2} = \frac{148 + 5}{2} = 76,5 \text{ мм – радіус кривошипа;}$$

$$h_n = 5 \text{ мм – величина перекриття ножів;}$$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{(1 - \varepsilon_n)h - h_n}{R} - 1 \right) = \arccos \left( \frac{(1 - 0,6)50 - 5}{76,5} - 1 \right) = 143,5^\circ \quad - \text{ кут}$$

повороту кривошипа, відповідній до заданої глибини різь, при якій відбувається відрив;

$$\lambda_1 = \frac{R}{L} = 0,15 \text{ [66];}$$

$$r_A = 65 \text{ см – радіус ексцентрикової головки шатуна;}$$

$$r_B = 19 \text{ см – радіус малої головки шатуна;}$$

$$r_0 = 30 \text{ см – радіус ексцентрикового вала в опорах;}$$

знак « $\rightarrow$ », береться при  $\alpha = 90 \div 180^\circ$ .

На рисунку 3.14 [61] наведений графік зміни наведеного плеча обертаючого моменту залежно від кута повороту кривошипа.

На рисунку 2.3 показана залежність сумарного розрахункового крутного моменту на тихохідному валу редуктора від кута повороту кривошипа ( $M_{c,\max,\text{расч}} = 860 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ), а також ця ж залежність наведена в технічній документації ножиців ( $M_{c,\max} = 1350 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ), з наведених залежностей випливає, що НПР-2 має подвійний запас по зусиллю різання.

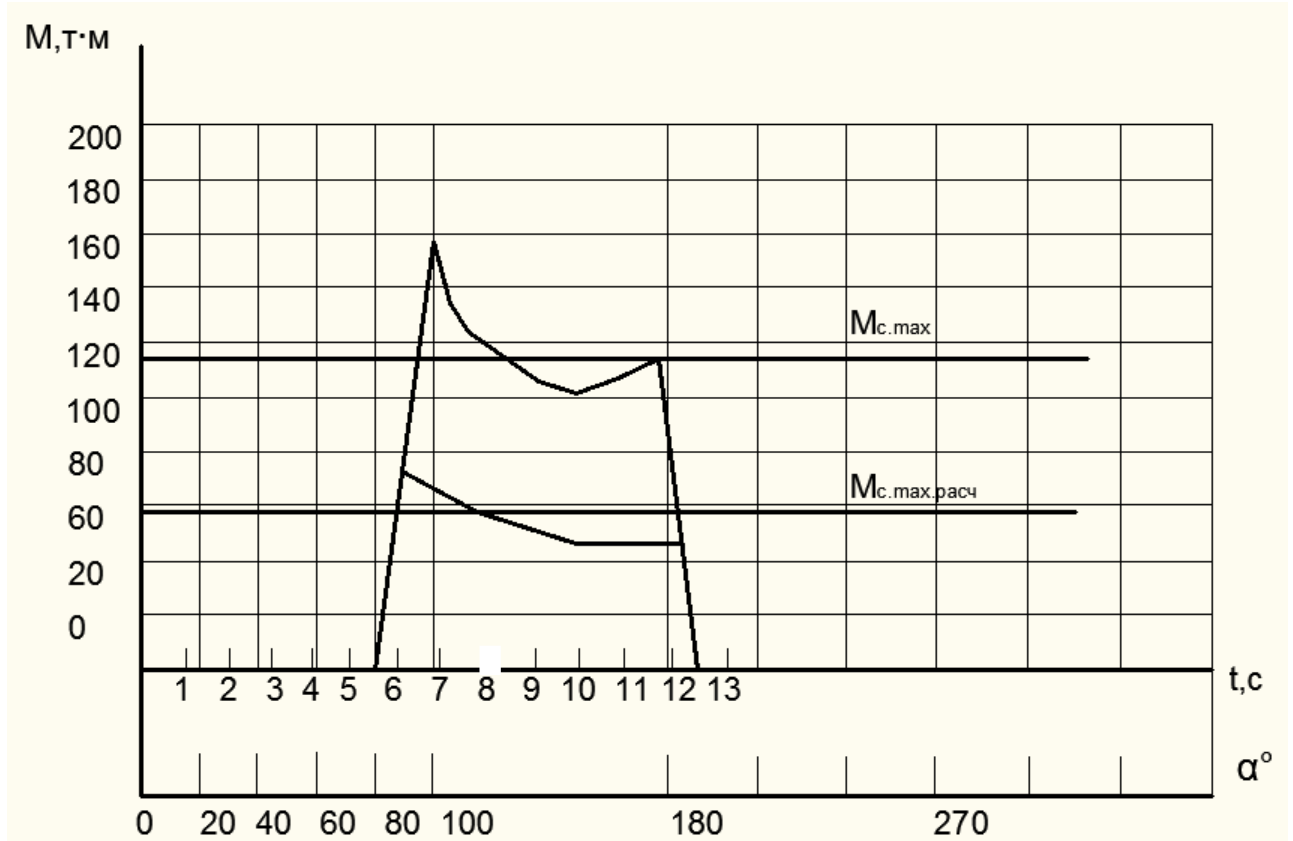


Рисунок 2.3 – Залежність сумарного крутного моменту на тихохідному валу редуктора від кута повороту кривошипа

### 2.3 Розрахунок потужності та вибір електродвигунів ножиць

Розрахунки потужності проводимо для режиму різання листового прокату максимального перетину відповідно до технічних характеристик ножиць.

Оптимальне передаточне число редуктора визначається вираженням

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_M \varepsilon_{M \max} + M_{\text{с.м}}}{J_{\text{дв}} \varepsilon_{M \max}}}, \quad (2.5)$$

де  $M_{\text{с.м}}$  – статичний момент механізму;

$\varepsilon_{M \max}$  – прискорення механізму;

$J_M, J_{\text{дв}}$  – моменти інерції відповідно механізму й двигуна.

Тому що при пуску й гальмуванні привода ножиць момент статичний механізму ножиць дорівнює моменту холостого ходу, то їм можна зневажити, формула (2.5) прийме наступний вид

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{J_{\text{дв}}}}. \quad (2.6)$$

Вважаємо, що встановлений редуктор є оптимальним. Тоді згідно з вираженням (2.6) необхідний момент інерції електродвигуна рівний

$$J_{\text{дв}} = J_{\text{м}} / i_{\text{опт}}^2 = J'_{\text{м}} = 120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.6)$$

де  $J'_{\text{м}}$  – момент інерції механізму наведений до вала двигуна, отриманий з технічних характеристик ножиців табл. 1.4.

Отже, сумарний момент інерції системи, наведений до вала двигуна рівний:

$$J_{\Sigma} = 2J'_{\text{м}} = 2 \cdot 120 = 240 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Відповідно до технічних даних необхідна швидкість електродвигуна:

$$\omega_{\text{дв.треб}} = 74,3 \text{ с}^{-1}$$

Визначаємо перевантажувальну здатність двигуна  $\lambda_{\text{м}}$ , яка гарантує роботу двигуна без перегріву [61]:

$$\lambda_{\text{м}} = \sqrt[4]{\frac{1}{2\varepsilon^2}} = \sqrt[4]{\frac{1}{2 \cdot 0,185^2}} = 1,95 \quad (2.7)$$

$$\text{де } \varepsilon = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{т}} + t_{\text{рез}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{0,5 + 60,5 + 0,39}{7,5} = 0,185;$$

$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = 0,5 \text{ с}$  – час розгону й гальмування рівні відповідно до протоколу перевірки системи управління приводом;

$$t_{\text{ц}} = \frac{60}{n} = \frac{60}{8} = 7,5 \text{ с} – \text{ час циклу роботи механізму};$$

$n = 6 - 8$  – число різів за хвилину, яке характеризує номінальне завантаження ділянки різання відповідно до технічних характеристик ножиців поперечного різання № 2.

Визначення часу різання

Ексцентриковий вал обертається зі швидкістю  $\frac{\omega_{\text{дв}}}{i} = \frac{74,3}{39,974} = 1,86 \text{ с}^{-1}$ ,

(17,76 про/хв) тобто один оберт (один різ) він виконує за  $\frac{60}{17,76} = 3,378 \text{ с}$ .

За час різання кривошип повернеться на кут 41,40, а повний оберт кривошип зробить за 3,378 с. Тоді час різання дорівнює:

$$t_p = \frac{4,14 \cdot 3,378}{360} = 0,39 \text{ с}$$

Необхідний динамічний момент двигуна:

$$M_{j_{\text{треб}}} = \lambda_m M_n = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 240 \frac{\omega_{\text{xx}}}{t_{\text{п}}} = 240 \frac{74,3 \cdot 1,05}{0,5} = 37447,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.8)$$

Визначаємо необхідний максимальний момент двигуна з урахуванням статичного навантаження:

$$M_{\text{макс.треб}} = M_{j_{\text{треб}}} + M_{\text{с.хх}} = 37,447 + 1,3 = 38,747 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.9)$$

$$M_{\text{с.хх}} = 0,05 \frac{M_{\text{max}}}{\eta} = 0,05 \frac{21,45}{0,8} = 1,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

де  $M_{\text{max}}$  – максимальний момент статичного опору, обумовлений за вираженням (2.3).

За умовами роботи потрібне використання 2-х двигунів, тому необхідний номінальний момент одного двигуна:

$$M_{1_{\text{н.треб}}} = \frac{M_{\text{макс.треб}}}{2\lambda_m} = \frac{38,747}{2 \cdot 1,95} = 9,94 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (2.10)$$

Необхідна номінальна потужність одного двигуна:

$$P_{1_{\text{н.треб}}} = M_{1_{\text{н.треб}}} \omega_{\text{н.треб}} = 9,94 \cdot 74,3 = 738 \text{ кВт} \quad (2.11)$$

Технічні дані обраного електродвигуна наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані електродвигуна П2ПМ-450-135-6В3

Найменування	Величина
1 Номінальна потужність $P_n$ , кВт	560
2 Номінальна напруга $U_n$ , В	600
3 Номінальна частота обертання $n_n$ , про/хв	710/1000
4 Номінальний струм $I_n$ , А	990
5 Момент інерції двигуна $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	27

Перевіримо електродвигун на відповідність технологічному процесу різання, тому що  $J_{дв} < J_{дв.треб}$  ( $27 < 60$ ).

Сумарний момент інерції системи рівний:

$$J_{\Sigma} = J'_m + 2J_{дв} = 120 + 2 \cdot 27 = 174 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.11)$$

тоді (2.8) і (2.9)

$$M_{j_{треб}} = \lambda_m M_n = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 174 \frac{74,3 \cdot 1,05}{0,5} = 27,15 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$M_{max.треб} = M_{j_{треб}} + M_{с.хх} = 27,15 + 1,3 = 28,45 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Отже, номінальний момент одного двигуна рівний (2.10):

$$M_{1н.треб} = \frac{M_{max.треб}}{2\lambda_m} = \frac{28,45}{2 \cdot 1,95} = 7,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$P_{1н.треб} = M_{1н.треб} \omega_{н.треб} = 7,3 \cdot 74,3 = 542 \text{ кВт}$$

Таким чином, при кількості різів  $n=8$  різ/хв завантаження двигуна рівне

$$k_{загр} = \frac{P_{1н.треб}}{P_{1н}} \cdot 100\% = \frac{542}{560} \cdot 100 = 97\%.$$



## 3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 3.1 Вибір комплектного електропривода ножиць

Технічних даних комплектних тиристорних електроприводів є номінальні струм  $I_{н\text{тп}}$  та напруга  $U_{н\text{тп}}$ . Для багатодвигунних електроприводів при послідовному живленні якірних ланцюгів номінального струм перетворювача береться сумарний струм двигунів, через що зросте його потужність, а отже і його ціна. Номінальна напруга перетворювача визначається номінальною напругою електродвигуна, яка менше номінальної напруги ТП, визначається за ДСТ 25953-83, на 5-15%, що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості й на безпечне інвертування при зниженні напруги живильної мережі, тобто  $U_{н\text{тп}} = (1,05 \div 1,15)U_{н\text{дв}}$

Дотримуючись наведених рекомендацій, вибираємо роздільне живлення якірних ланцюгів. Установлюємо на кожний електродвигун по одному перетворювачу. Для встановлених двигунів, по каталогах [68, 69] вибираємо реверсивний комплектний електропривод (КТЕ) SIMOREG DC Master концерну Siemens шафового виконання, технічні дані якого наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні дані перетворювача SIMOREG DC MASTER 6RA7093-4GV62

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Номінальна напруга живлення якоря, В	$U_{н1\text{тп}} = 600$
Номінальний вхідний струм якоря, А	$I_{н1\text{тп}} = 1326$
Номінальна постійна напруга, В	$U_{н\text{тп}} = 690$
Номінальний постійний струм, А	$I_{н\text{тп}} = 1600$
Номінальна вихідна потужність, кВт	$P_{н\text{тп}} = 1104$
Номінальна напруга порушення, В	$U_{в\text{тп}} = 373$
Номінальний постійний струм порушення, А	$I_{в\text{тп}} = 40$

У системі регулювання буде передбачений блок розподілу навантажень.

### 3.2 Вибір силового трансформатора та згладжувального дроселя

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

Для узгодження тиристорного перетворювача з живильною мережею вибираємо із довідника [70] силовий трансформатор ТСЗП-1600/10ВЗ У /  $\Delta$ -11, технічні дані, якого наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні дані силового трансформатора ТСЗП 1600/10ВЗ

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Потужність, кВ А	$P_{\text{тр}} = 1\ 621$
Номінальна первинна напруга, В	$U_{1\ \text{тр}} = 6000$
Номінальна вторинна напруга, В	$U_{2\ \text{тр}} = 825$
Значення діючого струму вторинної обмотки, А	$I_{2\ \text{тр}} = 1600$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{\text{хх}} = 2730$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{\text{кз}} = 12700$
Напруга короткого замикання%	$U_{\text{кз}\%} = 6,4$
Струм холостого ходу%	$I_{\text{хх}\%} = 2,5$
Маса, кг	$m_{\text{тр}} = 3200$

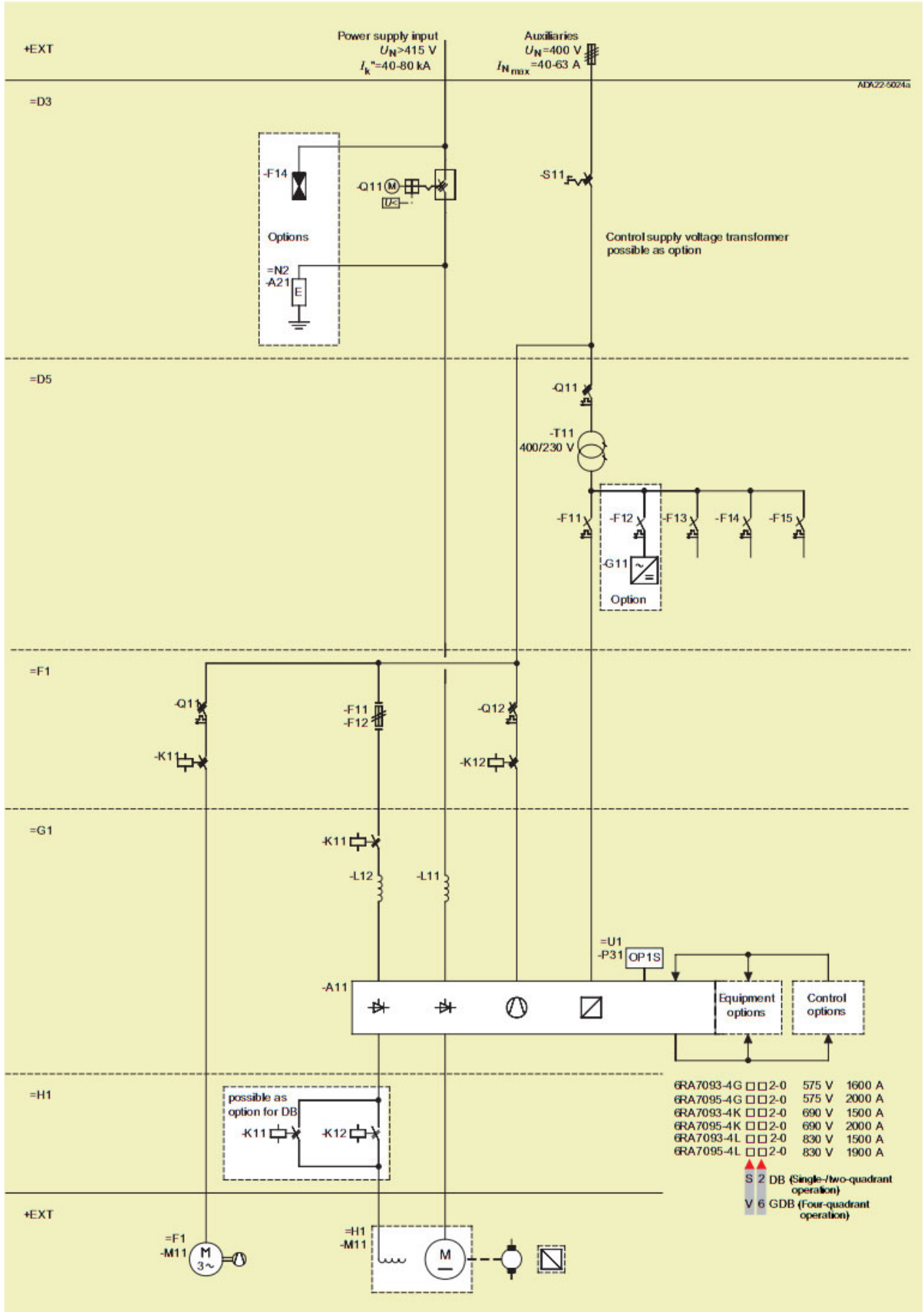


Рисунок 3.1 – Схема силової частини комплектного електропривода SIMOREG DC MASTER

Оскільки пульсації струму, що протікає в якірному ланцюзі, погіршують тепловий режим електродвигуна й умови його комутації, для їхнього зменшення застосовується згладжуючий дросель. Зменшення пульсацій напруги на затискачах якоря при включенні дроселя пояснюється тим, що на якір подається сума випрямленої напруги й ЕДС самоіндукції дроселя. Крім цього, уведення реактора, що згладжує, приводить до звуження зони переривчастих струмів, що, у свою чергу, приводить до збільшення твердості швидкісних характеристик приводу.

З довідника [70] вибираємо згладжуючий дросель, СРОСЗ-1250М УХЛ4, технічні дані якого  $I_n = 1200$  А;  $L_n = 1,28$ , мГн.

### 3.3 Склад обладнання електроприводу

Приводними двигунами ножиців є два двигуни постійного струму типу П2ПМ-450-135-6У3 (560 кВт, 600 В, 990 А, 710/1000 об/хв), двигун 201М для мех. 201, і двигун 202М для мех. 202.

Двигуни живляться від індивідуальних комплектних тиристорних електроприводів. Комплектний електропривод складається з:

- трансформатор 6/0,575 кВ, (201Т, 202Т);
- шафа з перетворювачем Simoreg DC Master 6RA7093-4GV62-Z (концерн Siemens) із блоком гальма FXM5 ( ф. CONTROL TECHNIQUES) і комутаційною апаратурою (ШТ1 для мех. 201, ШТ2 для мех. 202);
- реактор (201L1.202L1).

Для резервування перетворювачів передбачено один загальний резервний комплектний тиристорний електропривод (3TR, ШТ3-Р, 3L1R) і шафа перемикачів на резерв (ШУ1).

Фіксація привода ножиців при стоянці передбачена одним гальмом типу ТКП установленим на валу двигуна 201М.

Контроль над станом привода забезпечується наступними датчиками:

- кінцеві вимикачі 201SQ1, 201SQ2, 202SQ1, 202SQ2 - для контролю зрізу муфт хутро 201 і 202;

- шляховий вимикач 201SQ – здійснює контроль положення ножиців;
- імпульсні датчики швидкості приводних двигунів 201BN і 202BN – для виміру швидкості.

### **3.4 Опис системи керування ЕП ножиць поперечного різання**

Режим роботи привода визначено як повторно-короткочасний та реверсивний. Перетворювачі монтується у власних шафах, зокрема, механізм 201 розташований у шафі ШТ1, а механізм 202 - у ШТ2. Резервний перетворювач 1UZR встановлено у шафі ШТ3-Р. Перемикання на резервний перетворювач здійснюється у шафі ШУ1. Лінійні контактори збираються з власних шаф. Для включення використовуються кнопка 201SB1 та контактор 2Q2SB1, а для відключення – 2Q1SB2 та 202SB2.

У випадку, коли введено в роботу резервний перетворювач, його лінійний контактор активується кнопками управління 1SB1R та 1SB2R. У випадку аварійної ситуації, при натисканні кнопок 1SB (шафа ШТ1), 2SB (шафа ШТ2) або 3SBR (шафа ШТ3-Р), перетворювачі 1201UZ, 202UZ та 1UZR переходять у режим "безпечного зупину" і лінійні контактори автоматично відключаються. Для подальшого включення лінійних контакторів необхідно спочатку провести "скидання аварії", натисканням кнопок "відключення лінійного контактора" на власних перетворювачах, а тільки потім збирати схеми кнопкою "включення лінійного контактора".

В схемі передбачено кілька блокувань, які ефективно запобігають активації команди "Різ" в різних ситуаціях, забезпечуючи безпеку та надійність процесу. Ці блокування вводяться в дію в таких обставинах:

- Аварійно низький тиск в системі рідкого змащення ножиців: запобігається активація різання у випадку недостатнього тиску рідкого змащення, що забезпечує нормальну роботу ножиць.
- Несправність в насосно-акумуляторній станції: блокування для уникнення ризику при виникненні несправностей у станції, яка відповідає за подачу рідкого змащення.
- Несправність в системі густого змащення ножиць: заборона різання

при виявленні несправностей у системі густого змащення, яка важлива для ефективності роботи ножиць.

- Відсутність вентиляції двигуна: блокування для уникнення перегріву двигуна у випадку, коли вентиляційна система не активна.

- Хитний роликостіл: запобігається активація різання у випадку коливань або нестабільності роликостолу.

- Відсутність тиску в натискному гідроциліндрі: заборона різання при відсутності необхідного тиску в гідроциліндрі (натискання матеріалу).

- Опущені притиски: блокування, яке перевіряє положення притисків та завдає команду на різання лише при їх піднятті.

- Відключений транспортер обрізу: заборона різання, якщо транспортер обрізу не активний.

- Включений механізм установки зазору НІР: блокування в разі активного механізму зміни зазору, що дозволяє уникнути конфліктів та зберегти стабільність процесу.

- Включений механізм зміни ножів НІР: запобігання різання під час активності механізму зміни ножів, що є критичним для правильної роботи.

- Наявність завдання на рух рольгангів перед і за ножицями: заборона різання, якщо передбачено рух рольгангів, що допомагає уникнути несподіваних взаємодій.

Ці блокування гарантують, що команда на "Різ" може бути введена лише в безпечних та відповідних умовах, максимумі управління приводом ножиць здійснюється з поста управління.

Привід ножиць діє у трьох режимах: "автоматичний", "ручний" і "зміна ножів", які можна обрати за допомогою ключа 201SA.

У режимі "автоматичний", при взаємодії з системою СБО, команда на "Різ" виконується лише після завдання рольгангами. Це забезпечує високу координацію із загальною системою, де різання відбувається в строго визначені часові і функціональні моменти.

У ручному режимі вибір швидкості різання (за допомогою кнопок із лампочками 201SB5/HLG5, 201SB6/HLG6) і активація різання (кнопка 201SB7)

можлива в залежності від товщини листа. Оператор може також контролювати положення ножиць на повзучій швидкості (кнопки 201SB3/HLG3, 201SB4/HLG4), спостерігаючи за позначеною лампочкою 201HLG12. Також у цьому режимі можна перевести ножиці в положення "зміна ножів" на повзучій швидкості, контролюючи це за світловим сигналом (лампочка 201HLG13).

Режим "зміна ножів" розроблено для напіваавтоматичної установки ножів у положення демонтажу. Оператор вибирає швидкість ножиць за допомогою кнопок (201SB5/HLG5, 201SB6/HLG6) і натискає кнопку "Різ" (201SB7). Зупинка ножиць у положенні зміни ножів відбувається за командою від вимикача шляхового 201SQ. Управління приводами відбувається через систему АСУ ТП. Взаємозв'язок між перетворювачами та контролером реалізовано через спеціальну PROFIBUS-мережу. Це забезпечує ефективний обмін даними та високу точність управління системою приводів.

У вбудованому контролері перетворювача системи регулювання приводів використовується двоконтурна схема, де внутрішній контур відповідає за регулювання струму, а зовнішній - за контроль швидкості. Оскільки привод ножиць поперечного різання працює на загальний вал з двигунами, створено вузол для розподілу навантаження в системі регулювання.

Інформація про будь-які неполадки або активацію захисту привода і перетворювача фіксується в самому перетворювачі та відображається на робочій панелі управління на самому перетворювачі (PMU), а також на переносній робочій панелі управління (OP1S), якщо вона підключена до ТП.

Повідомлення про помилки (попередження) припиняє відображення, як тільки виправлена причина. Щодо аварійного стану перетворювача (серйозні несправності), вони припиняють відображення після усунення причин та натискання кнопки скидання на панелі управління.

Інформація про аварійні ситуації в механізмах області ножиць виводиться на панель сигналізації ШС, розташовану в приміщенні для чергового персоналу, у вигляді світлових та звукових сигналів.

Принципові та функціональні схеми ЕП ножиць поперечного різання наведено на рисунках 3.2-3.3.

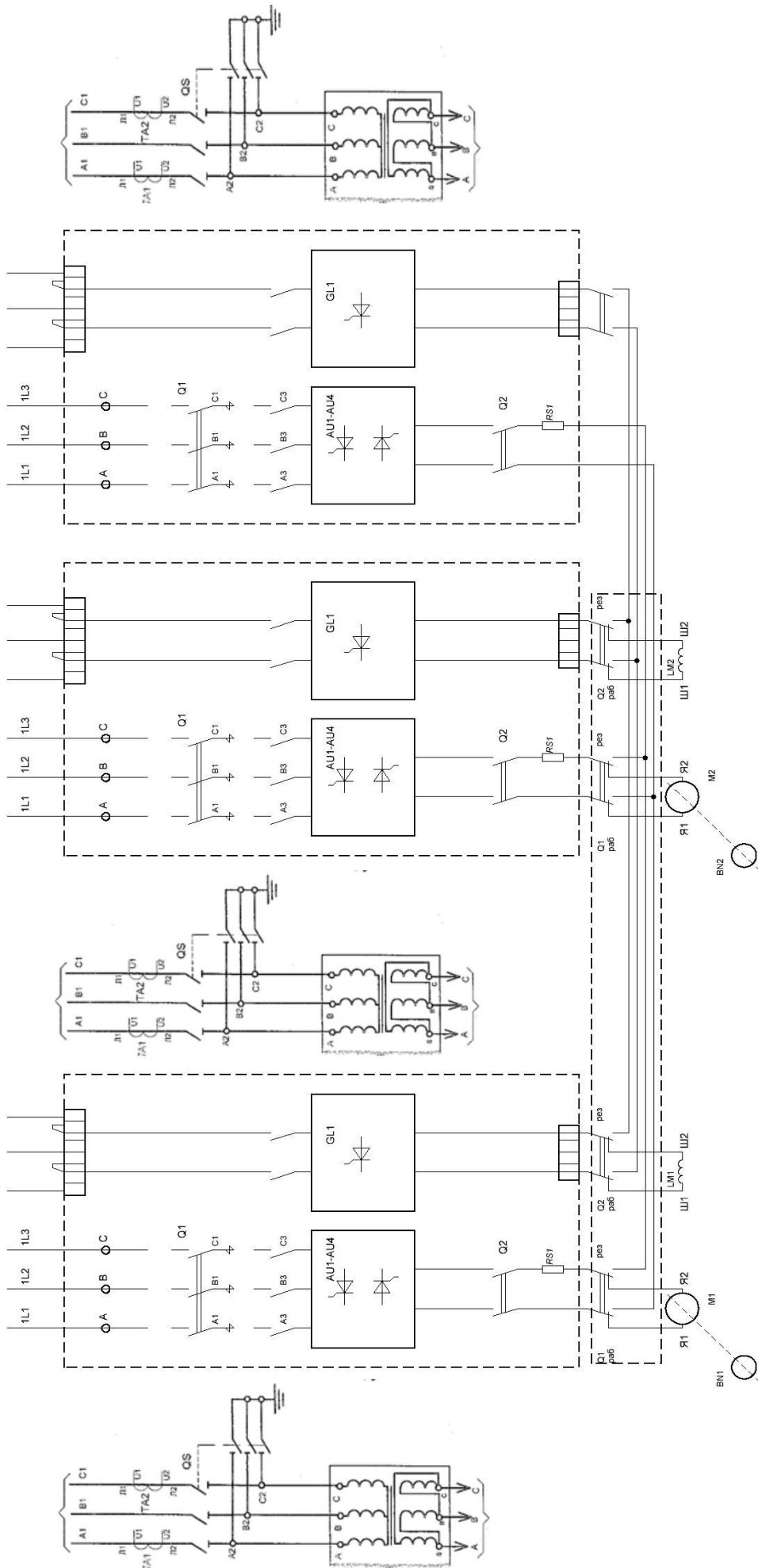


Рисунок 3.2 – Принципова схема електроприводу ножиць поперечного різання





### 3.5 Математичний опис об'єкта керування

При синтезі системи керування приймаються 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 постійні часу структурних елементів електропривода приймаються незмінними.

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

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

Якщо швидкість зміни кута  $d\alpha/dt > \omega_0$ , то ЕРС визначається не кутом  $\alpha$ , а зміною по кривій живлячої напруги останнього тиристора, що проводив струм у зв'язку з неможливістю закрити по ланцюгу управління відкритий тиристор. Останнє явище одержало назву неповної керуваності тиристорного перетворювача.

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

САР буде використана безперервна модель тиристорного перетворювача.

Система регулювання обраного тиристорного перетворювача двохпроцесорна, усі регулятори (струму якоря, швидкості, е.р.с. двигуна, струму збудження 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. 3.4): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина двигуна) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативному зворотним зв'язком по е.р.с двигуна.

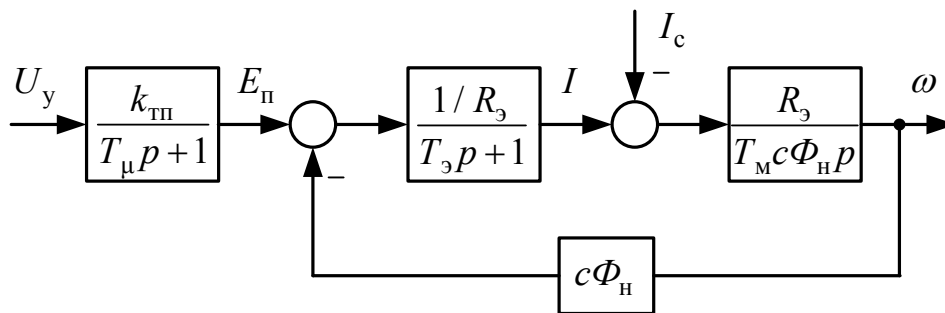


Рисунок 3.4 – Структурна схема силової частини електропривода

### 3.6 Розрахунок основних параметрів елементів системи ЕП

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

$$E_{d0\text{ тп}} = 1,35U_{2\text{ тр тп}} = 1,35 \cdot 825 = 1113,75\text{В} \quad (3.1)$$

де 1,35 – коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2\text{ тр тп}}$  – номінальна напряга на вторинній обмотці силового трансформатора, В.

Кругова частота першої гармоніки випрямленої напряги:

$$\omega_1 = 2\pi f_c m_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3 = 942 \text{ Гц}$$

де  $f_c$  – частота живильної мережі, Гц;

$m_\phi$  – Число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний і повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр тп}} = \frac{\Delta P_{\text{кз тп}} U_{2 \text{ тр тп}}^2}{P_{\text{тр тп}}^2} = \frac{12700 \cdot 825^2}{(1104 \cdot 10^3)^2} = 7,092 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{тр тп}} = \frac{U_{\text{кз\% тп}} U_{2 \text{ тр тп}}}{100 I_{2 \text{ тр тп}} \sqrt{3}} = \frac{6,4 \cdot 825}{100 \cdot 1600 \cdot \sqrt{3}} = 0,019 \quad (3.4)$$

$$x_{\text{а тр тп}} = \sqrt{z_{\text{тр тп}}^2 - r_{\text{тр тп}}^2} = \sqrt{(0,019)^2 - (7,092 \cdot 10^{-3})^2} = 0,018 \quad (3.5)$$

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

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

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

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

Індуктивність силового трансформатора, приведена до кола випрямленого струму:

$$L_{\text{тр тп}} = \frac{x_{\text{а тр тп}}}{2\pi f_c} = \frac{0,018}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,732 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \quad (3.6)$$

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

Індуктивність якоря двигуна визначається по емпіричній формулі:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = 6 \frac{600}{2 \cdot 710 \cdot 990} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

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

$U_{\text{н}} = 600 \text{ В}$  – номінальна напруга електродвигуна;

$I_n = 990$  А – номінальний струм електродвигуна;

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

$n_n = 710$  об/хв – номінальна частота обертання електродвигуна.

Сумарний опір якірного ланцюга електродвигуна:

$$r_{\text{я.дв}} = \beta(r_{\text{я}} + r_{\text{дп}}) = 1,32(0,065 + 0,034) = 0,128 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

де  $\beta = 1,32$  – температурний коефіцієнт двигуна, що враховує зміна опору при нагріванні машини на 800С;

$r_{\text{я}} = 0,065$  Ом – опір обмотки якоря (холодний) при 200С;

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

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ф}} \cdot x_{\text{а}}}{2\pi} = \frac{3 \cdot 9,724 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 4,645 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.9)$$

де  $m_{\text{ф}}$  - число фаз випрямлення;

$x_{\text{а}} = 9,724$  мОм – повний опір силового трансформатора.

При синусоїдальному опорної напрузі СІФК перетворювача, характеристика вхід-вихід ТП лінійна і коефіцієнт передачі ТП по напрузі розраховується по формулі:

$$k_{\text{тп}} = \frac{E_{\text{д0}}}{U_{\text{у max}}} = \frac{1113,75}{10} = 111,375 \quad (3.10)$$

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

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_{\text{э}} &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_{\text{к}} + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,128 + 2(3,2 \cdot 10^{-3}) + 8,288 \cdot 10^{-3} + 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,155 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.11)$$

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

$r_{\text{тр}} = 3,2$  мОм – активний опір силового трансформатора;

$r_k = 8,288 \text{ мОм}$  – комутаційний опір;

$r_{ш} = 0,1r_{я.дв} = 0,1 \cdot 0,128 = 12,8 \text{ мОм}$  – активний опір шин або кабелю, що з'єднують ТП із якорем двигуна.

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$L_{\Sigma} = L_{дв} + 2L_{тр} = 2,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5,732 \cdot 10^{-5} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.12)$$

Сумарний наведений момент інерції електропривода:

$$J_{\Sigma} = J'_m + 2J_{дв} = 120 + 2 \cdot 27 = 174 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.13)$$

де  $J_{дв} = 27 \text{ кгм}^2$  – момент інерції електродвигуна.

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_H = \frac{U_H - I_H r_{я.дв}}{\omega_H} = \frac{600 - 990 \cdot 0,128}{74,3} = 6,3 \text{ Вс} \quad (3.14)$$

де  $\omega_H = 74,3 \text{ с}^{-1}$  – номінальна швидкість електродвигуна.

Електромагнітна постійна часу системи ТП-Д:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{2,62 \cdot 10^{-3}}{0,155} = 0,017 \text{ с} \quad (3.15)$$

Електромеханічна постійна часу електропривода:

$$T_M = \frac{J'_{\Sigma} R_{\Sigma}}{c\Phi_H^2} = \frac{174 \cdot 0,155}{6,3^2} = 0,68 \text{ с} \quad (3.16)$$

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

### 3.7 Синтез лінійного регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму будемо вважати, що електромеханічна постійна часу набагато більша електромагнітної постійної часу  $T_{\Sigma}$ . Можна також зневажати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, розглядає

її як збурювальним впливом у контурі струму.

Структурна схема контуру струму представлено на рисунку 3.5.

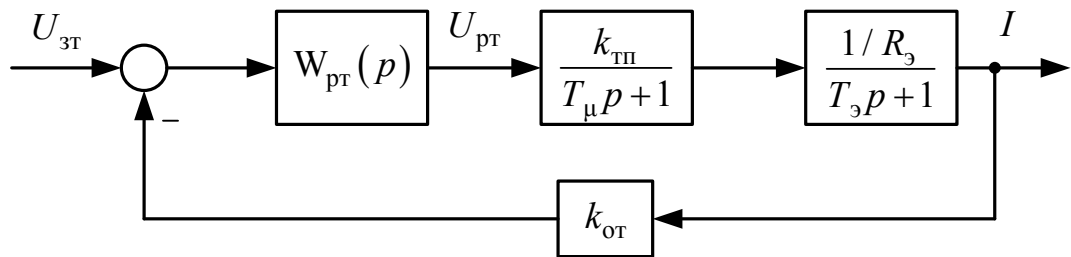


Рисунок 3.5 – Структурна схема контуру струму

У якості малої постійної часу контуру струму приймаємо малу постійну ТП  $T_\mu = 5$  мс. Налаштовуємо контур струму на модульний оптимум.

Передаточна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{рт}}^{\text{м}}(p) = \frac{R_э (T_э p + 1)}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} 2T_\mu p} = \frac{R_э (T_э p + 1)}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}} p} = k_{\text{ртП}} + \frac{k_{\text{ртИ}}}{p} \quad (3.17)$$

Пропорційна й інтегральна частина ПІ-регулятора струму:

$$k_{\text{ртП}} = \frac{R_э T_э}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}}} = \frac{0,155 \cdot 0,017}{111,375 \cdot 0,004 \cdot 0,01} = 0,591 \quad (3.18)$$

$$k_{\text{ртИ}} = \frac{R_э}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}}} = \frac{0,155}{111,375 \cdot 0,004 \cdot 0,01} = 29,5 \quad (3.19)$$

де  $T_э = 0,017$  с – електромагнітна постійна часу системи ТП-Д;

$k_{\text{тп}} = 111,375$  – коефіцієнт передачі ТП по напрузі;

$k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{макс}}} = \frac{10}{2,5 \cdot 990} = 0,004$  В/А – коефіцієнт передачі ланцюга

зворотнього зв'язка по струму;

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

$I_{\text{макс}} = 2,5 I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 990 = 2475$  А – максимально допустимий струм якоря

двигуна (струм упору);

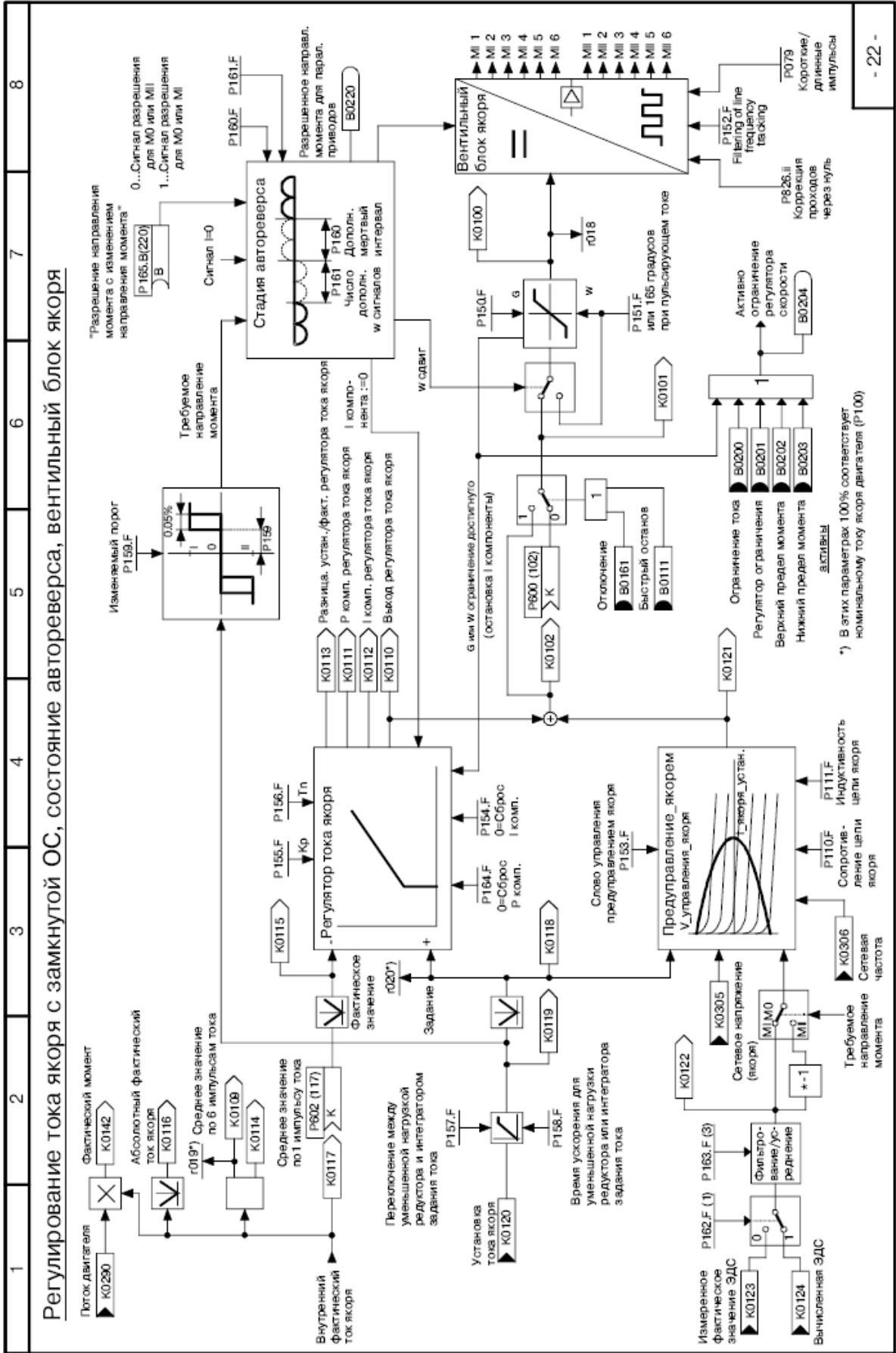
$T_{\text{от}} = 2T_\mu = 2 \cdot 0,005 = 0,01$  с – постійна часу інтегрування контуру струму

при настроюванні на модульний оптимум.

Функціональна схема контуру регулювання струму якоря, реалізована в перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлено на рисунку 3.6. 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. 3.7), на які подається напруга з датчика напруги, підключеного до вимірювального шунта. Шунт необхідно встановити в якірному ланцюзі двигуна. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем A/D, нормується по величині 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.





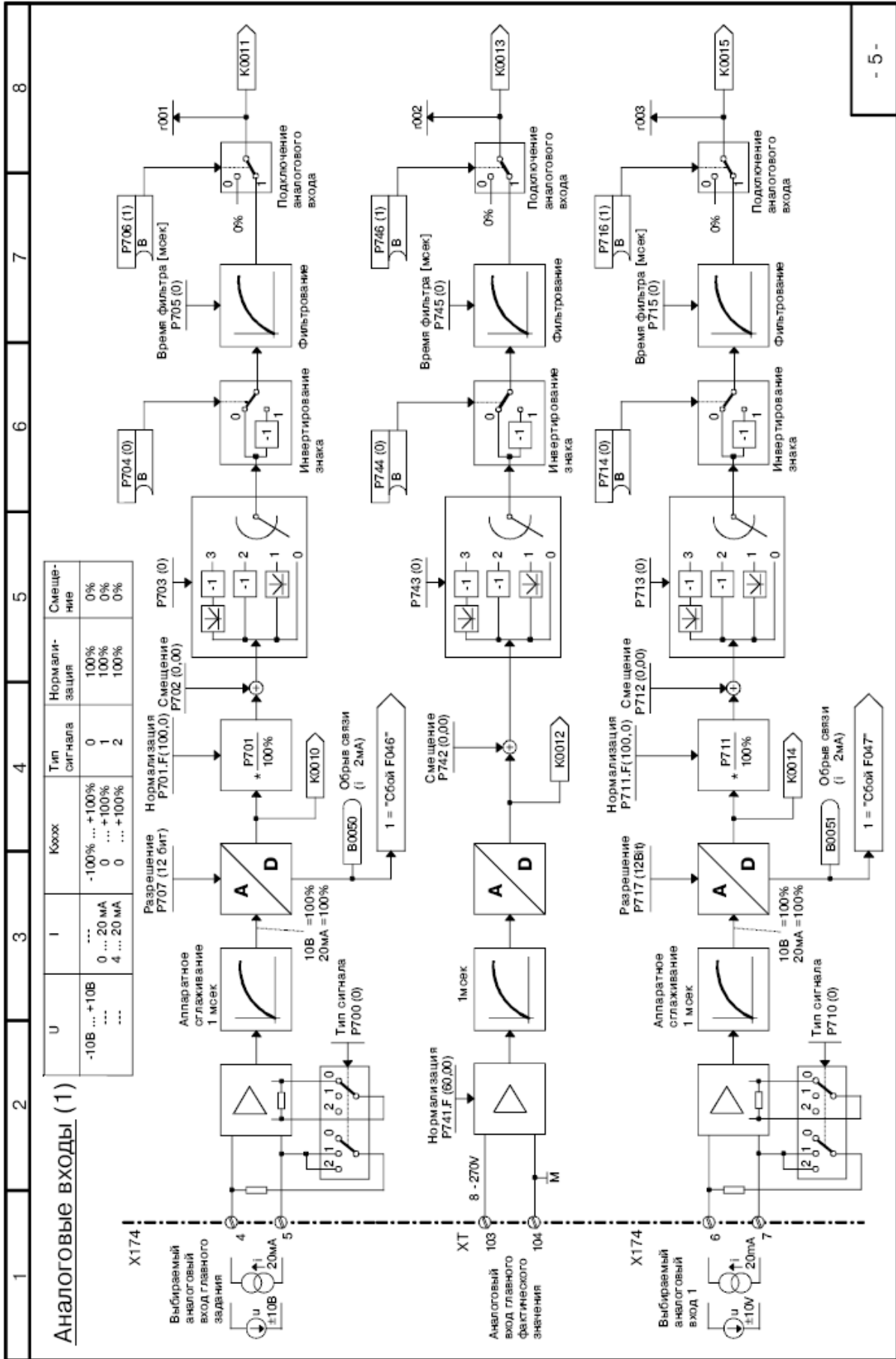


Рисунок 3.7 – Канал формирования сигнала возвратного зв'язка по струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

### 3.8 Синтез лінійного регулятора швидкості

Структурна схема контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки  $T_\mu$  - мала постійна часу, то добутком  $T_{от}T_\mu$  можна зневажити) наведено на рисунку 3.8.

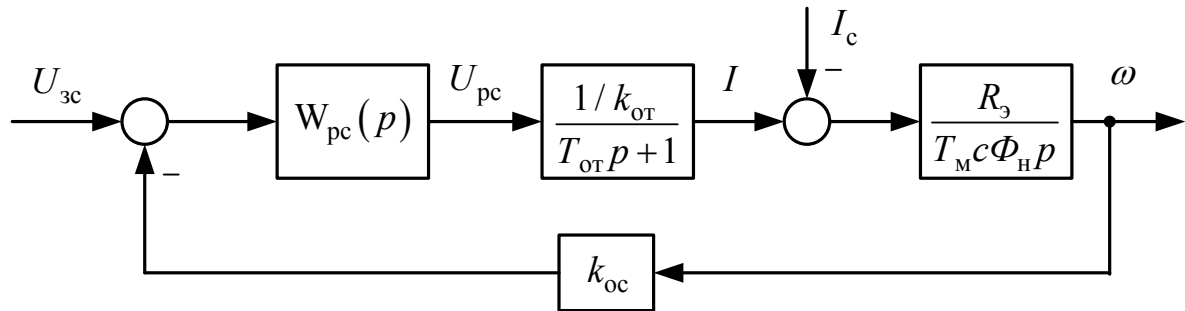


Рисунок 3.8 - Структурна схема контуру швидкості

Регулятор швидкості організований по пропорційному (П) закону управління з настроюванням на модульний оптимум. Регулятор для забезпечення необхідних динамічних параметрів повинен компенсувати електромеханічну постійну часу системи  $T_M$ , а також малу постійну часу контуру швидкості  $T_{oc}$ . У цьому випадку передатна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{рс}^c(p) = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{oc} 2T_{от}} = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{oc} T_{oc}} = k_{рсП} \quad (3.20)$$

Пропорційна частина П-регулятора швидкості:

$$k_{рсП} = \frac{T_M c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{oc} T_{oc}} = \frac{0,68 \cdot 6,3 \cdot 0,004}{0,155 \cdot 0,134 \cdot 0,02} = 38,22 \quad (3.21)$$

де  $T_M = 0,2$  с – електромеханічна постійна часу системи ТП-Д;

$k_{oc} = \frac{U_{зс.маx}}{\omega_{маx}} = \frac{10}{74,3} = 0,134$  Вс – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного

зв'язка по швидкості;

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

$\omega_{маx} = \omega_H = 74,3$  1/с – максимальна швидкість електродвигуна;

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

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.9. 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 вибираємо імпульсний датчик RVI 58N – 1024 імпульсу/оберт.

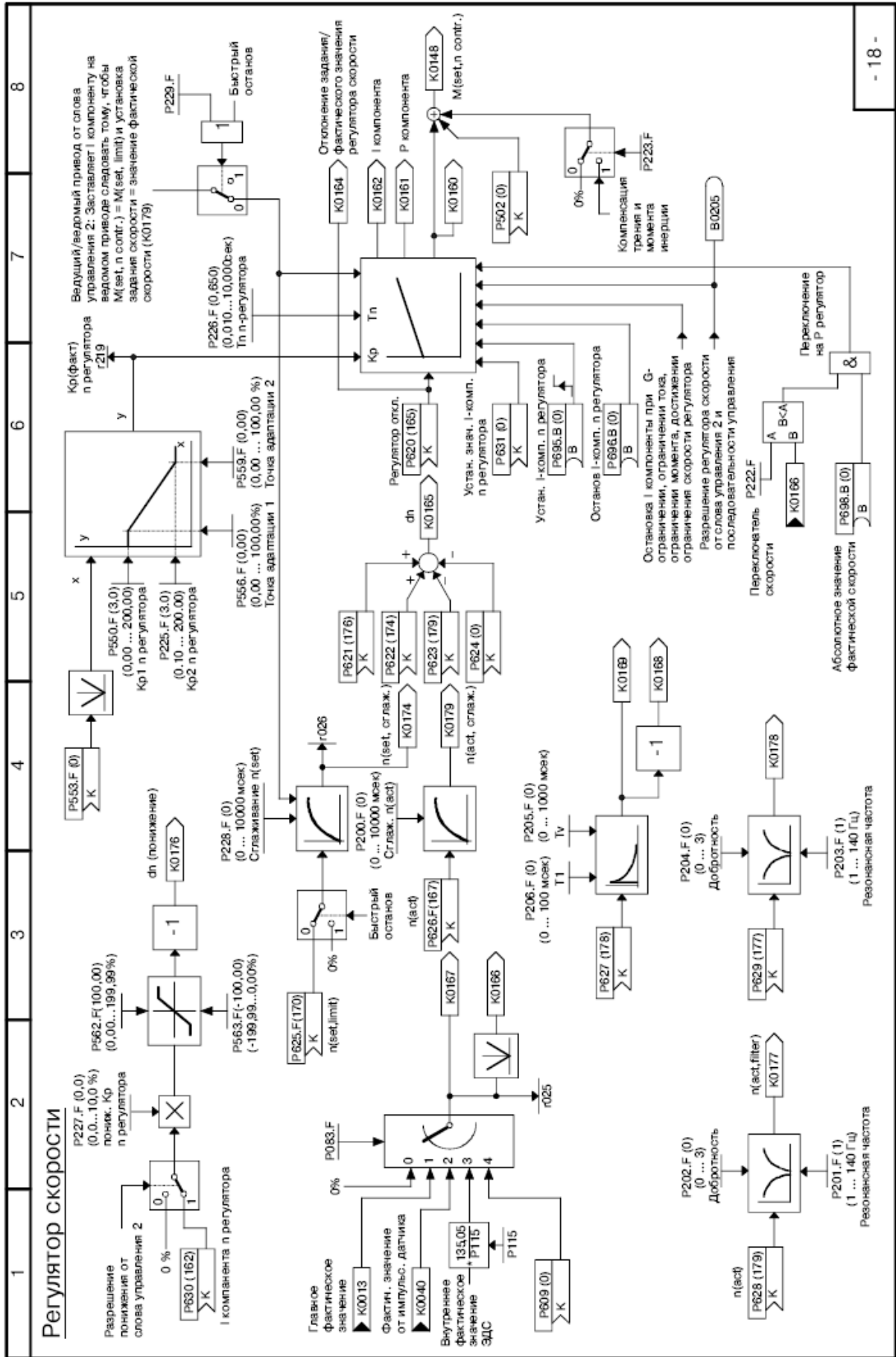


Рисунок 3.9 – Функціональна схема регулятора швидкості в перетворювачі SIMOREG DC Master

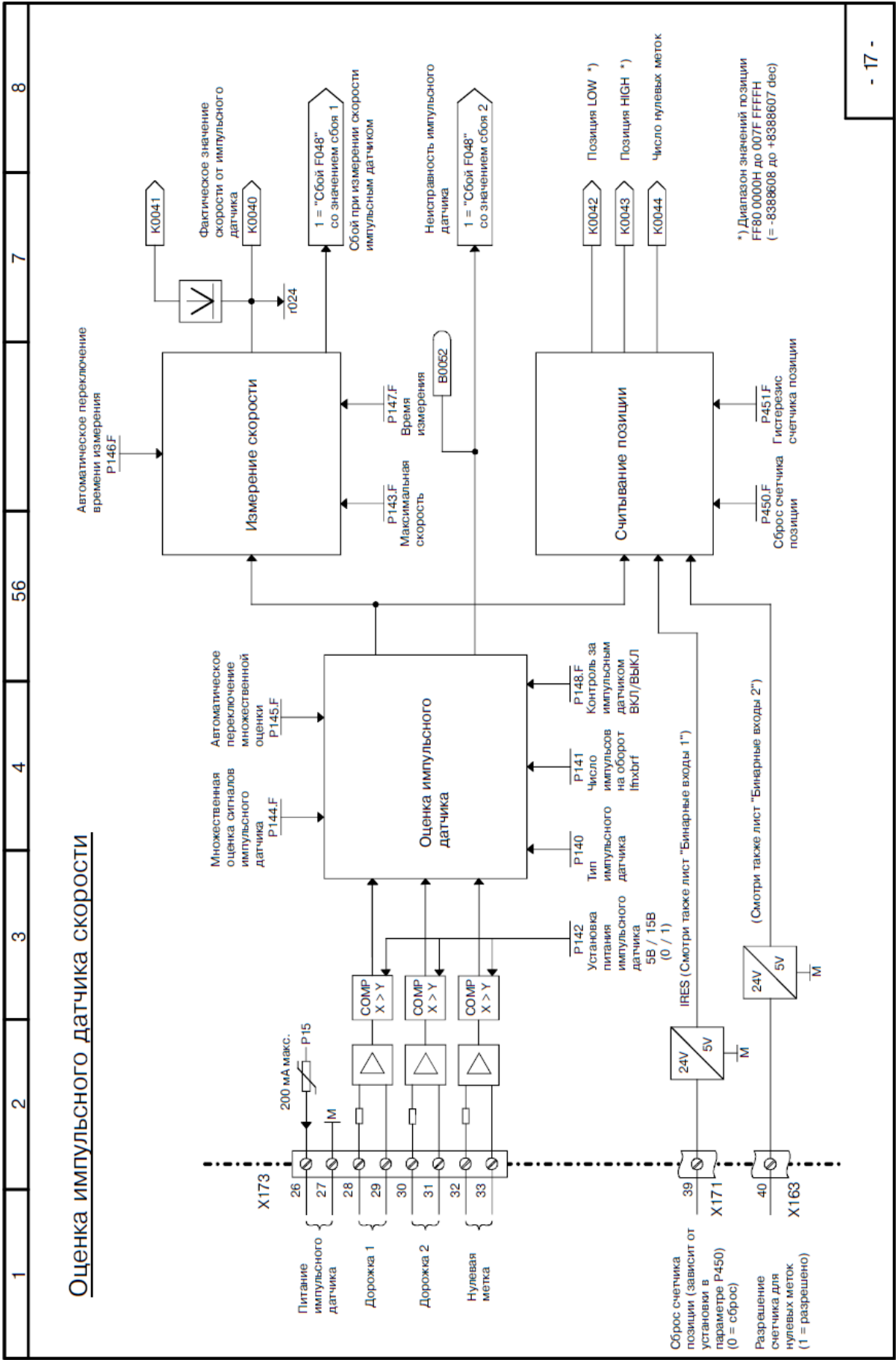


Рисунок 3.10 – Функціональна схема регулятора швидкості в перетворювачі SIMOREG DC Master

### 3.9 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону й гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки токообмеження ( $I_{\max} = 2,5I_n$ ) 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 наведено на рисунку 3.11.

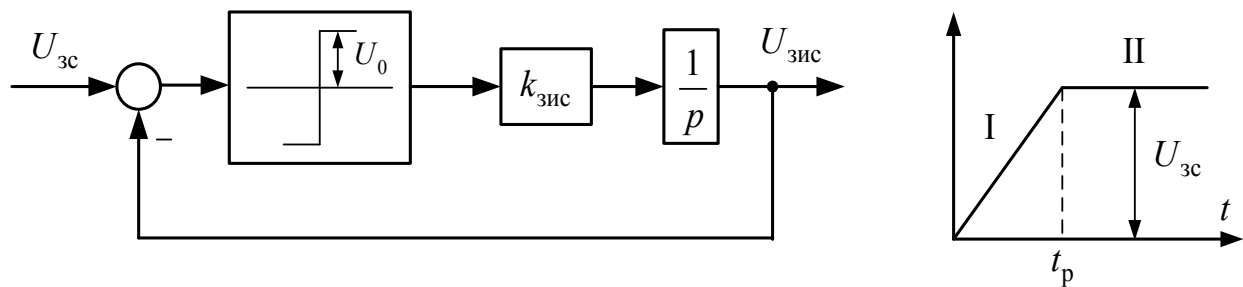


Рисунок 3.11 – Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідна напруги задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

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

II ділянка:

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

де  $I_{\text{дин}} = I_n = 990\text{А}$  - заданий динамічний струм;

$\omega_{\text{з,уст}} = 74,31 \text{ 1/с}$  – усталена швидкість, яка відповідає  $U_{\text{зс}}$ ;

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

$U_0 = 10 \text{ В}$  - полка релейного елемента.

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

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_H}{R_\Omega} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} = \frac{0,68 \cdot 6,3 \cdot 74,3}{0,155 \cdot 990} = 0,61 \text{ с} \quad (3.26)$$

Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p} = \frac{10}{0,61} = 16,3 \text{ В/з} \quad (3.27)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлено на рисунку 3.12.

На рисунку 3.13 наведена структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування електропривода.





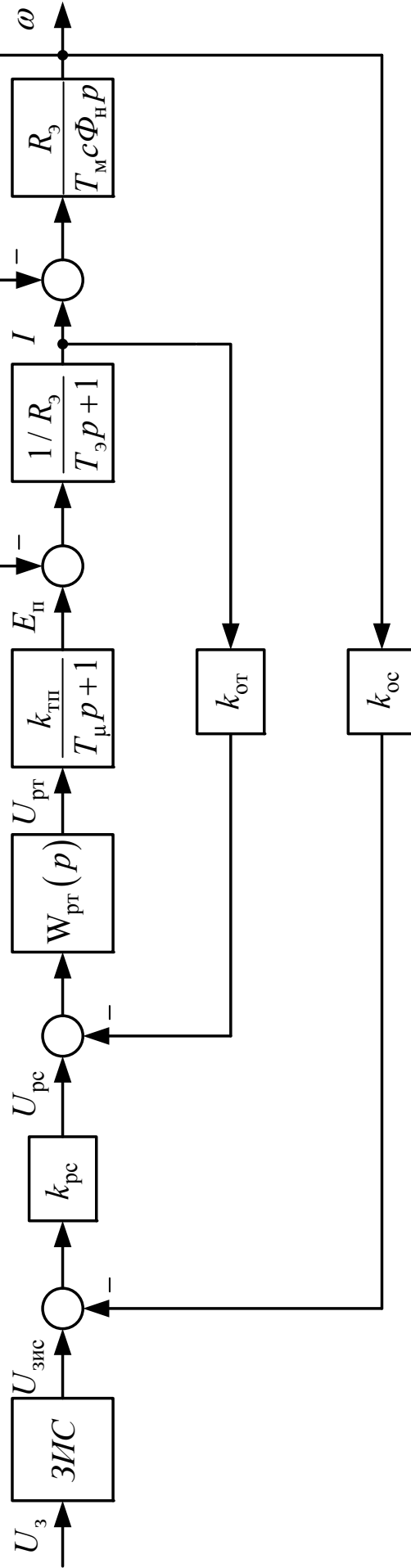


Рисунок 3.13 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

### 3.10 Моделювання електроприводу механізму ножиць з підпорядкованою системою керування в Matlab/Simulink

Цифрове моделювання розрахованої системи здійснюється в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводом ножиців, що має у своєму составі ПІ-регулятор струму, П-регулятор швидкості й задатчик інтенсивності швидкості наведена на рис. 3.14. Внутрішні структури підсистем (Subsystem) типових вузлів схеми наведені на рис. 3.15 - 3.16.

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 Lincr неприпустимо. Моделі регуляторів коректно враховують поріг насичення регулятора  $U_{y.max} = 10$  В (див. рис. 3.15).

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. 3.18 - 3.29.

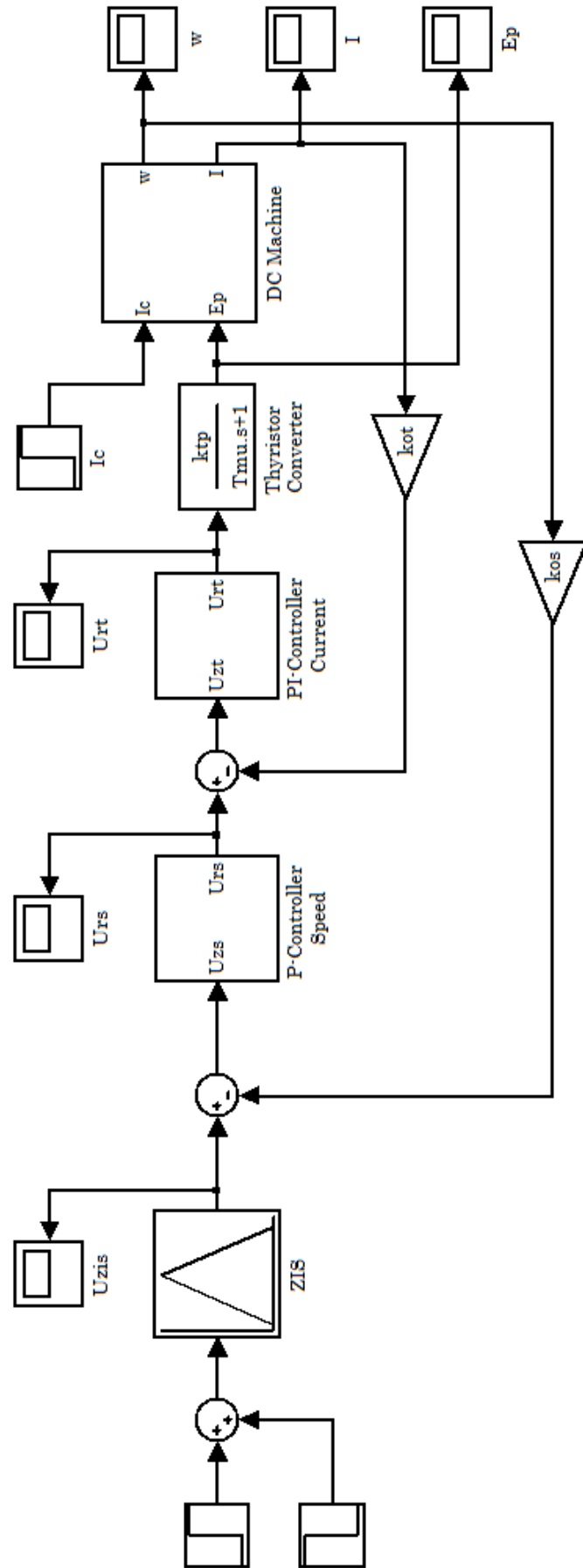


Рисунок 3.14 – Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування

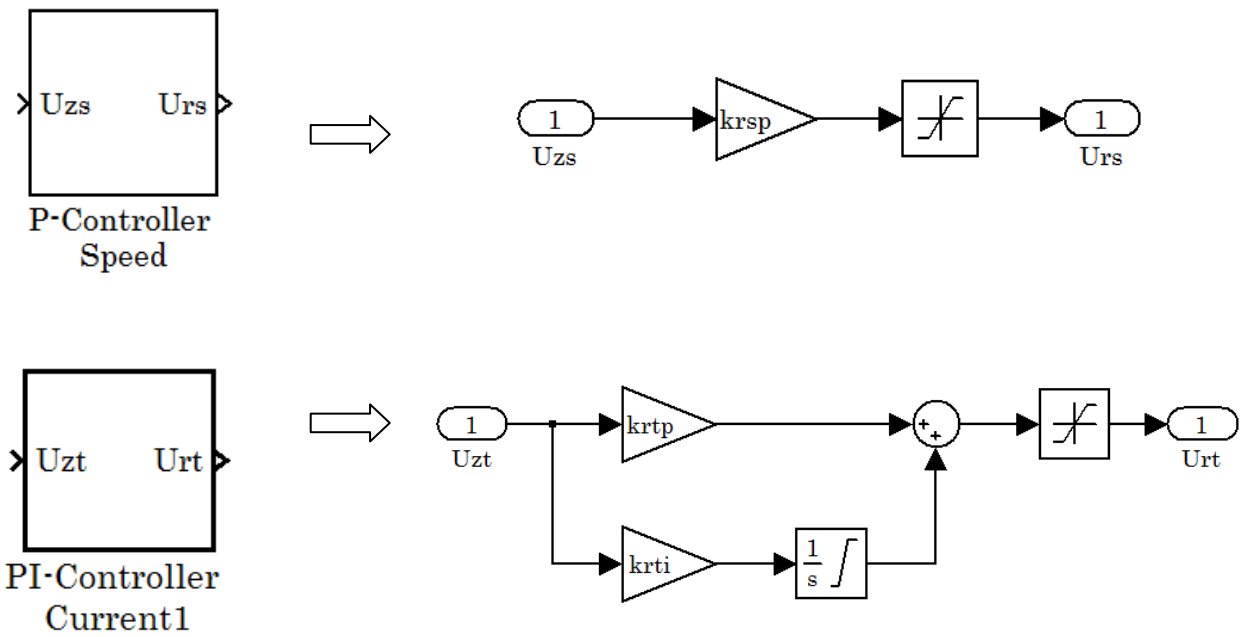


Рисунок 3.15 – Підсистема «ПІ-регулятор» струму (PI-controller Current) і швидкості (P-Controller Speed), що враховує поріг насичення регулятора

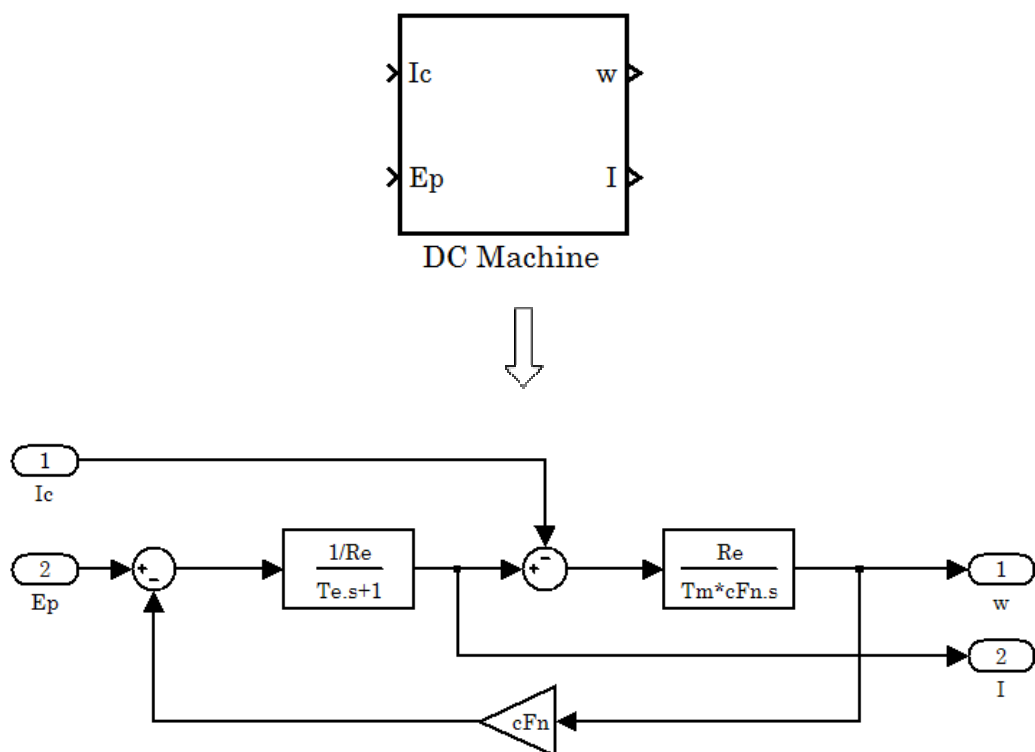


Рисунок 3.16 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

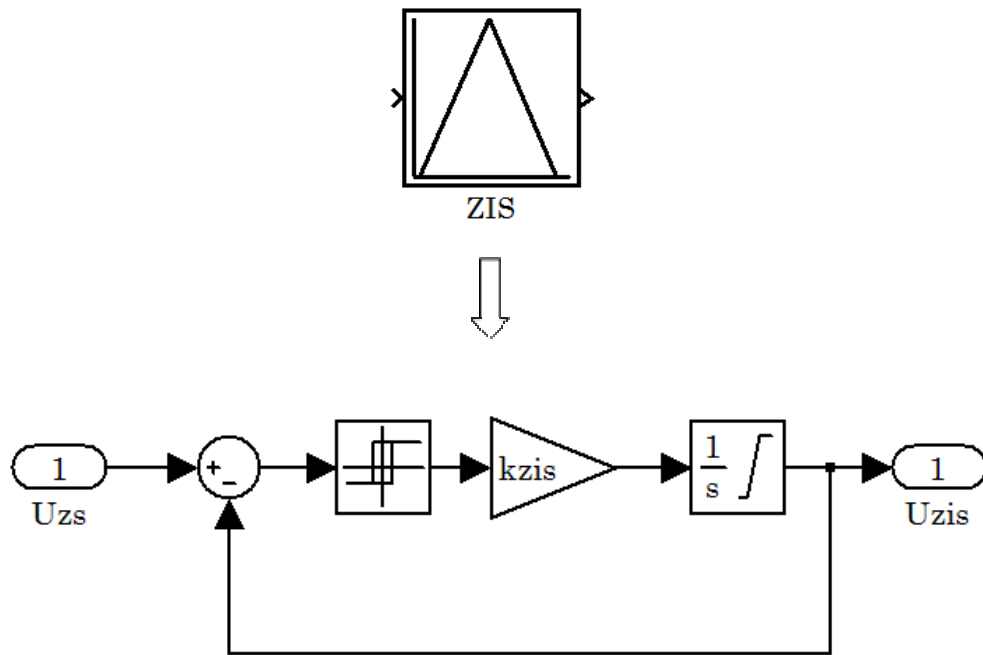


Рисунок 3.17 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), що реалізує раціональну динаміку



Рисунок 3.18 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості

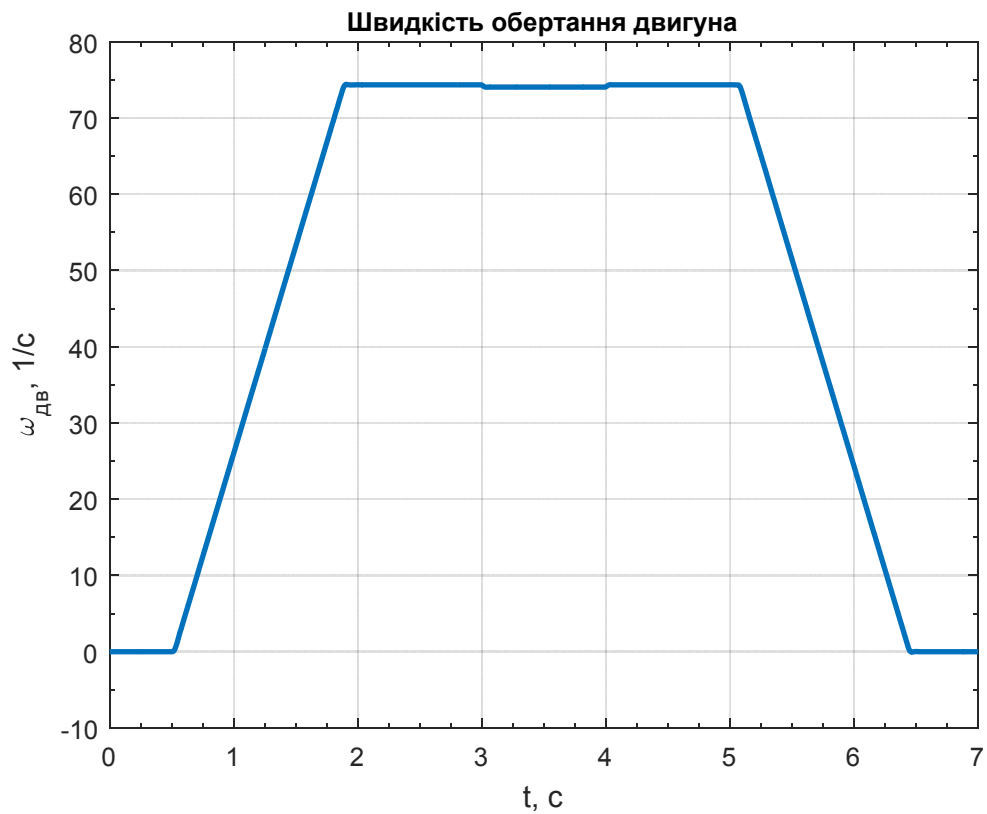


Рисунок 3.19 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ( $I_c = 0,4I_H$ )

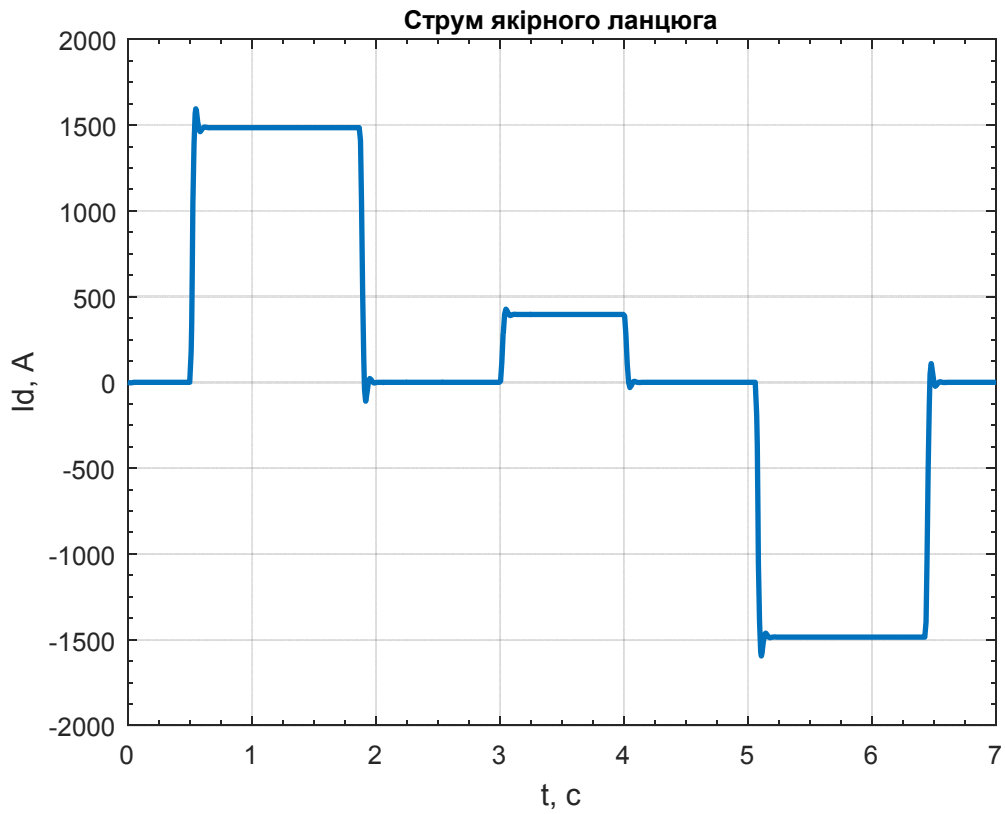


Рисунок 3.20 – Графік перехідного процесу струму якоря ( $I_c = 0,4I_H$ )

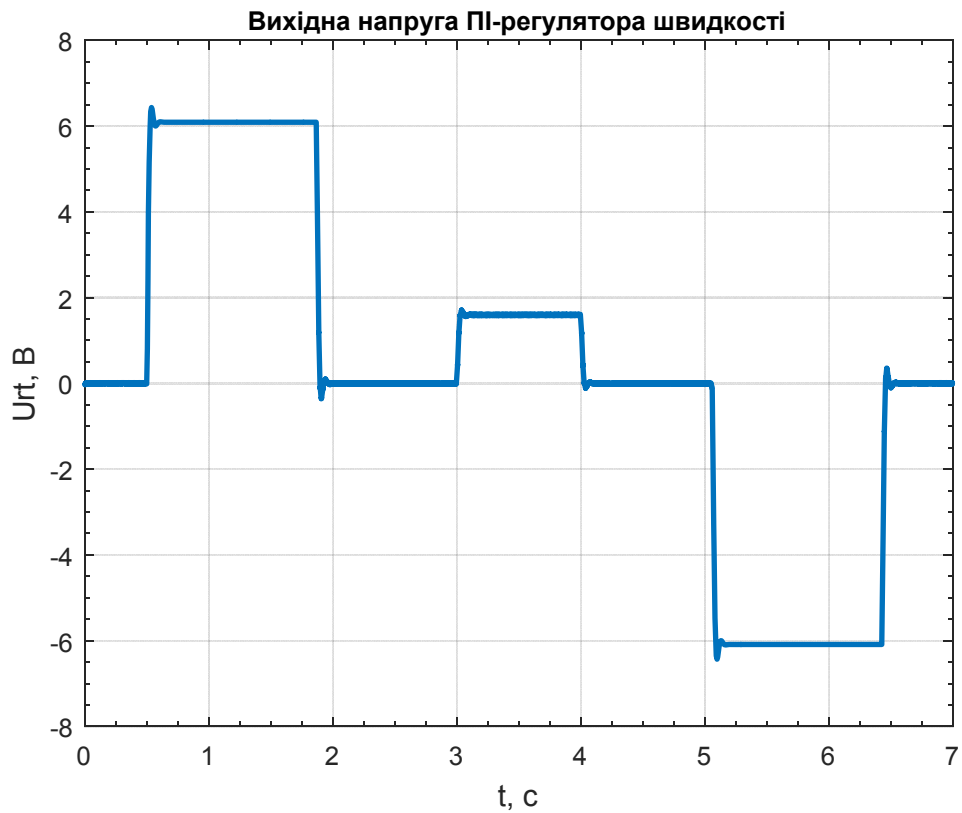


Рисунок 3.21 – Графік перехідного процесу напруги ПІ-регулятора швидкості ( $I_c = 0,4I_H$ )



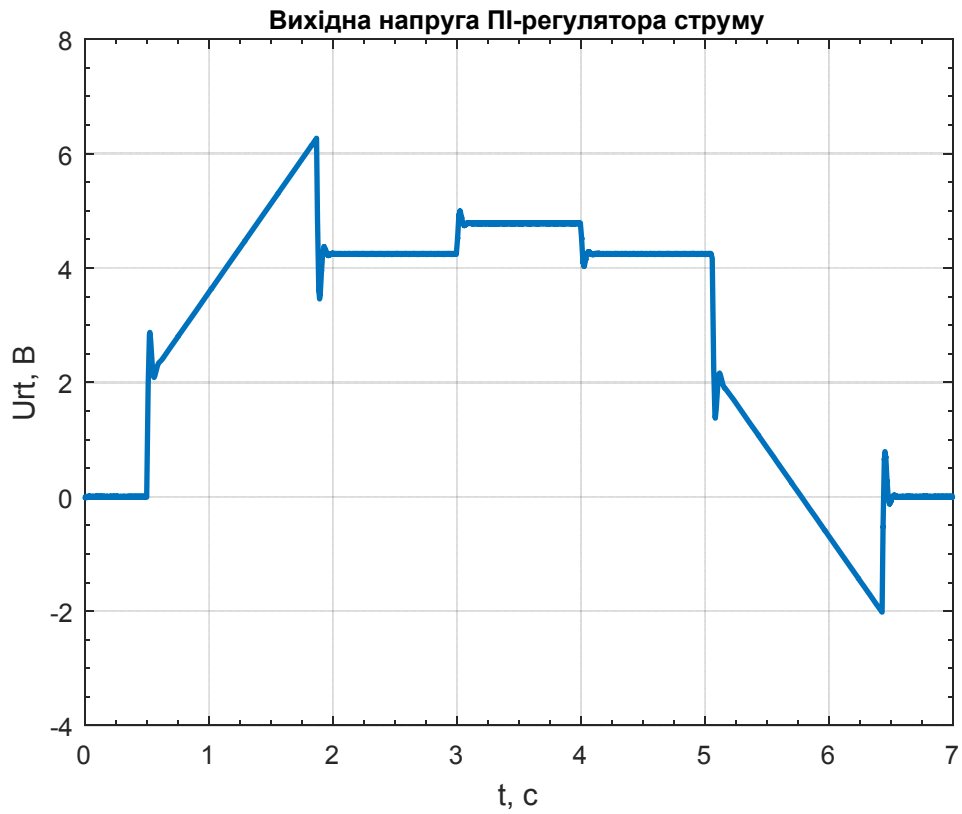


Рисунок 3.22 – Графік перехідного процесу напруги  
ПІ-регулятора струму ( $I_c = 0,4I_H$ )

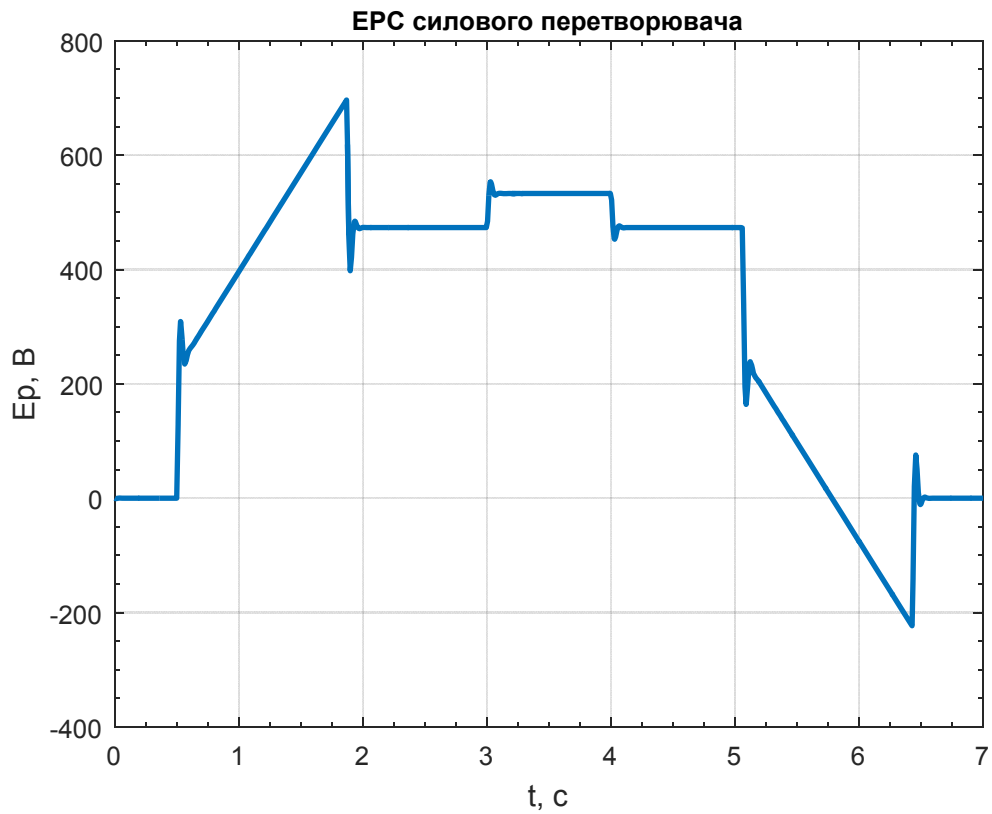


Рисунок 3.23 – Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного  
перетворювача ( $I_c = 0,4I_H$ )

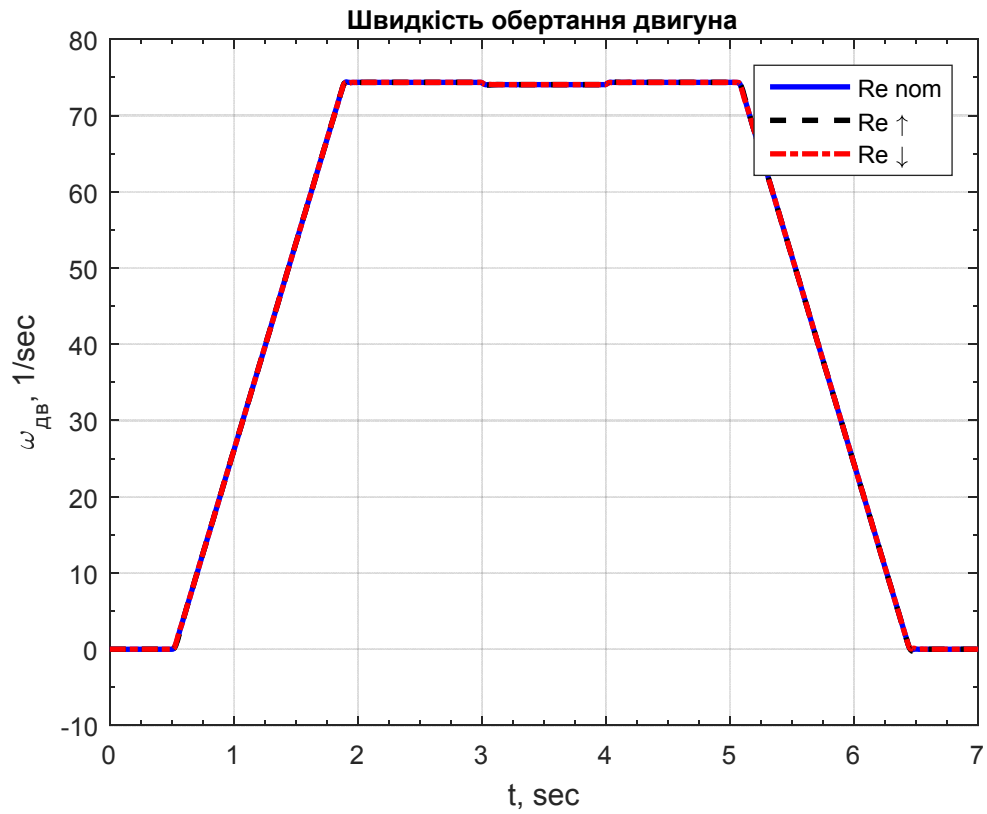


Рисунок 3.24 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,4I_H$ )

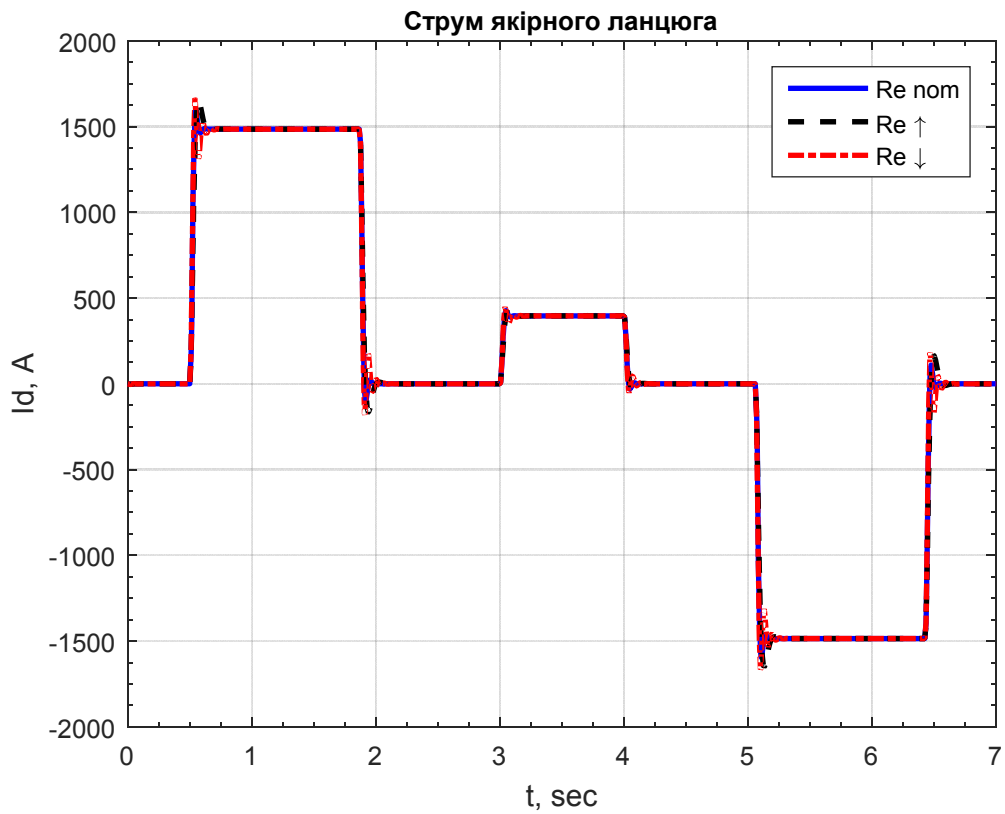


Рисунок 3.25 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,4I_H$ )

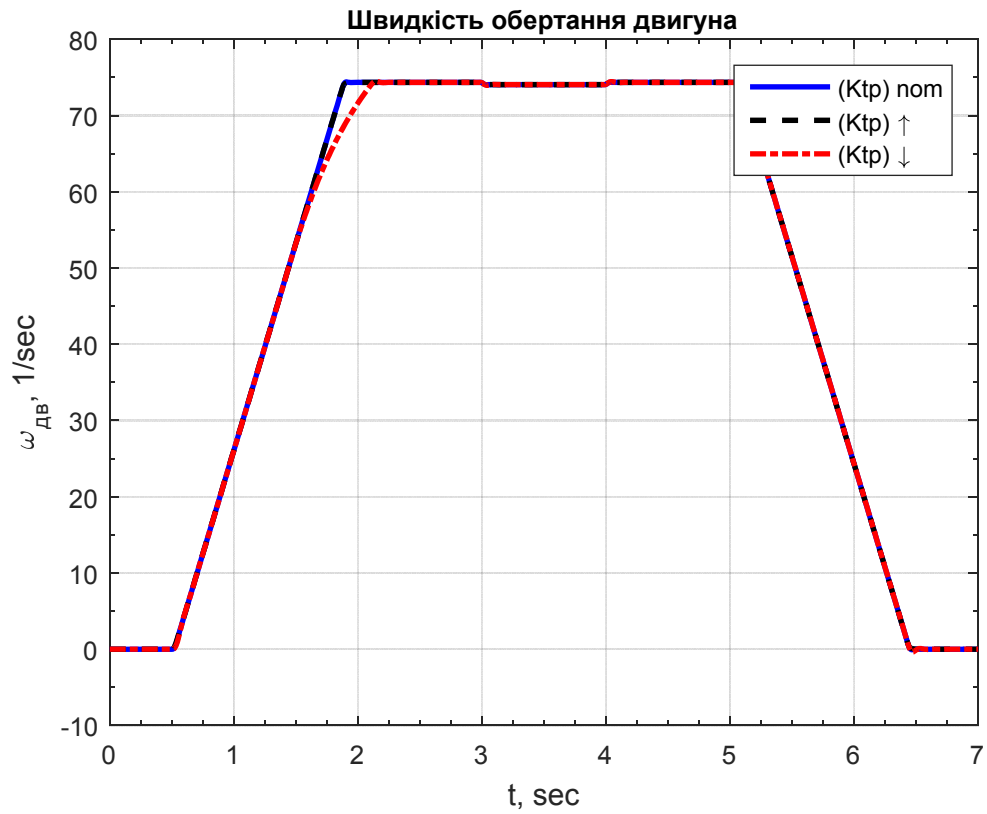


Рисунок 3.26 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $k_{tr}$  в 2 рази ( $I_c = 0,4I_H$ )

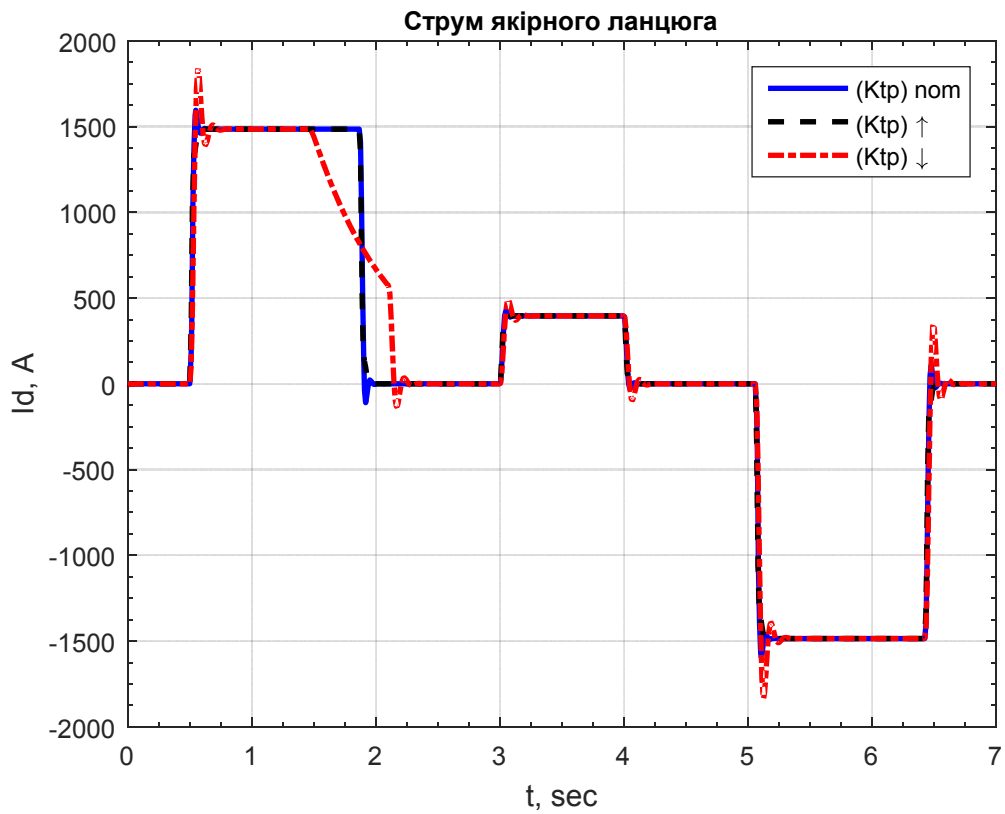


Рисунок 3.27 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $k_{tr}$  в 2 рази ( $I_c = 0,4I_H$ )

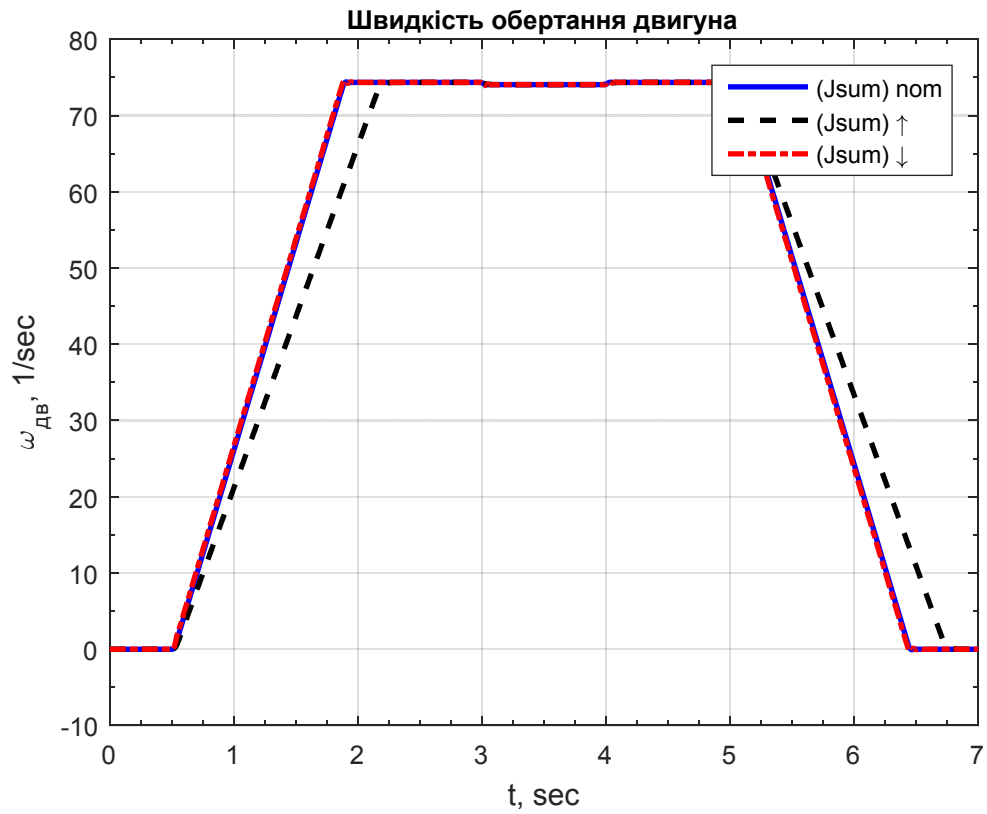


Рисунок 3.28 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази

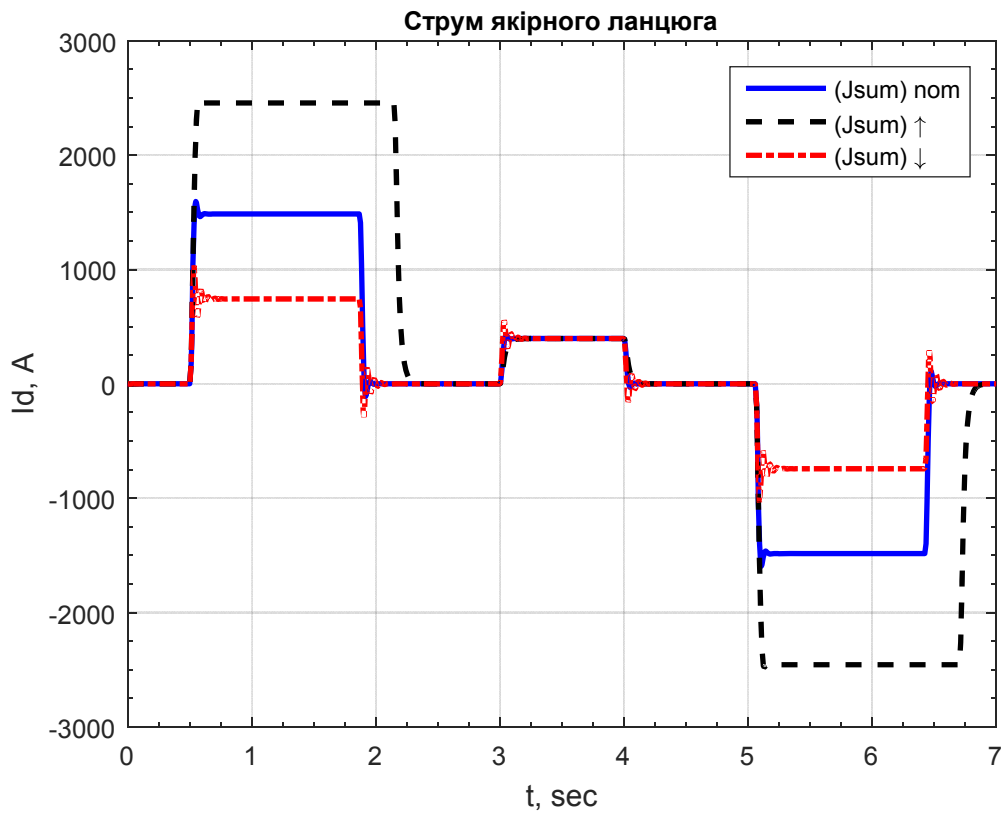


Рисунок 3.29 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази

## 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.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.1)$$

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

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l dt, \quad (4.2)$$

де  $\eta_i = X_i - X_i^*$   $X_i^*$

У векторній формі:

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

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n (\bar{\eta}, K \bar{\eta}) dt. \quad (4.3)$$

Перетворимо початкову систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\eta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n; \quad (4.4)$$

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

Завдання вирішується методом динамічного програмування. Напишемо рівняння Беллмана:

$$\min_U \left[ \sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \eta_i} \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U \right) \right] = 0. \quad (4.5)$$

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:

$$U = -\text{sign} \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial V}{\partial \eta_i}. \quad (4.6)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} C_{(11,11)} & C_{(12,11)} & \dots & C_{(ij,11)} & \dots & C_{(nn,11)} \\ C_{(11,12)} & C_{(12,12)} & \dots & C_{(ij,12)} & \dots & C_{(nn,12)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,kl)} & C_{(12,kl)} & \dots & C_{(ij,kl)} & \dots & C_{(nn,kl)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,nn)} & C_{(12,nn)} & \dots & C_{(ij,nn)} & \dots & C_{(nn,nn)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ \dots \\ \dots \\ A_{nn} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} \\ 2K_{12} \\ \dots \\ \dots \\ K_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

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

$$C_{(ij,kl)} = \begin{cases} 0 & , \text{если } i \neq k, j \neq l \\ a_{jl} & , \text{если } i = k, j \neq l \\ a_{ii} + a_{jj} & , \text{если } i = k, j = l, i \neq j \\ a_{ii} & , \text{если } i = k = j = l; \end{cases} \quad (4.8)$$

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.

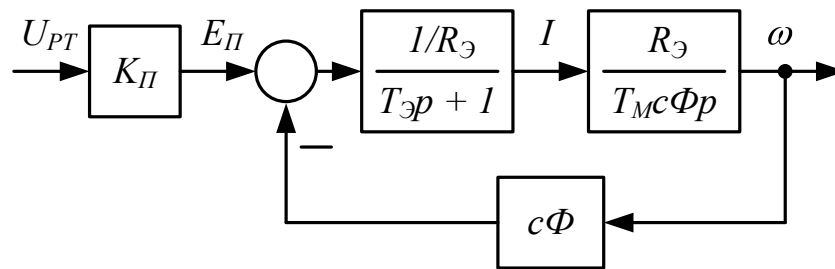


Рисунок 4.1 - Структурна схема об'єкта керування РТ

Математичний опис об'єкта керування РТ має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{I} = -\frac{1}{T_\Theta} I - \frac{c\Phi}{R_\Theta T_\Theta} \omega + \frac{K_{PI}}{R_\Theta T_\Theta} U_{PT} \\ \dot{\omega} = \frac{R_\Theta}{T_M c\Phi} I. \end{cases} \quad (4.9)$$

Наводимо керовані координати і напруга до відносним одиницям

$$X_1 = \frac{I}{I_M}; \quad X_2 = \frac{\omega}{\omega_M}; \quad U = \frac{U_{PT}}{U_M}, \quad (4.10)$$

де  $I_M, \omega_M, U_M$  – максимальні значення величин, які слід прийняти

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



У відносних одиницях маємо:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -\frac{I}{T_{\mathcal{E}}} X_1 - \frac{c\Phi\omega_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} X_2 + \frac{K_{II}U_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} U \\ \dot{X}_2 = \frac{R_{\mathcal{E}}I_M}{T_M c\Phi\omega_M} X_1. \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\eta_1 = X_1 - X_1^*; \quad \eta_2 = X_2 - X_2^*, \quad (4.12)$$

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

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2 + b_1U \\ \dot{\eta}_2 = a_{21}\eta_1, \end{cases} \quad (4.13)$$

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 (4.13) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою системи Matlab, у якій було розроблені програмні коди (m-файли).

Функція Ляпунова для системи другого порядку

$$V = A_{11}\eta_1^2 + 2A_{12}\eta_1\eta_2 + A_{22}\eta_2^2. \quad (4.14)$$

Критерій якості

$$J(U) = \int_0^{\infty} (k_{11}\eta_1^2 + 2k_{12}\eta_1\eta_2 + k_{22}\eta_2^2) dt. \quad (4.15)$$

Алгоритм управління РТ має вигляд:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[ b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \text{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (4.16)$$

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} \\ 2k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

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:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[ -\frac{1}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) \right] = U_M \text{sign} [X_1^* - X_1] \quad (4.19)$$

### 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 (4.1) за винятком того, що функцією, яка керує, є напруга РС  $U_{PC}$ .

Алгоритм управління РС

$$U_{PC} = -U_M \operatorname{sign} \left[ b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \operatorname{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (4.20)$$

коефіцієнти  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  знаходимо, вирішуючи рівняння виду (4.2), в якому підставимо наступні значення коефіцієнтів критерію якості:

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

звідки знаходимо

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

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

$$\begin{aligned}
 U_{PC} &= -U_M \operatorname{sign} \left[ \frac{a_{21}}{a_{11}a_{12}} (X_1 - X_1^*) - \frac{1}{a_{12}} (X_2 - X_2^*) \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ \frac{a_{21}}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) - X_2 + X_2^* \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ X_2^* - X_2 - \frac{R_\vartheta I_M T_\vartheta}{T_M c \Phi \omega_M} (X_1 - X_1^*) \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ X_2^* - X_2 - k_{\omega i} (X_1 - X_1^*) \right],
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

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

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

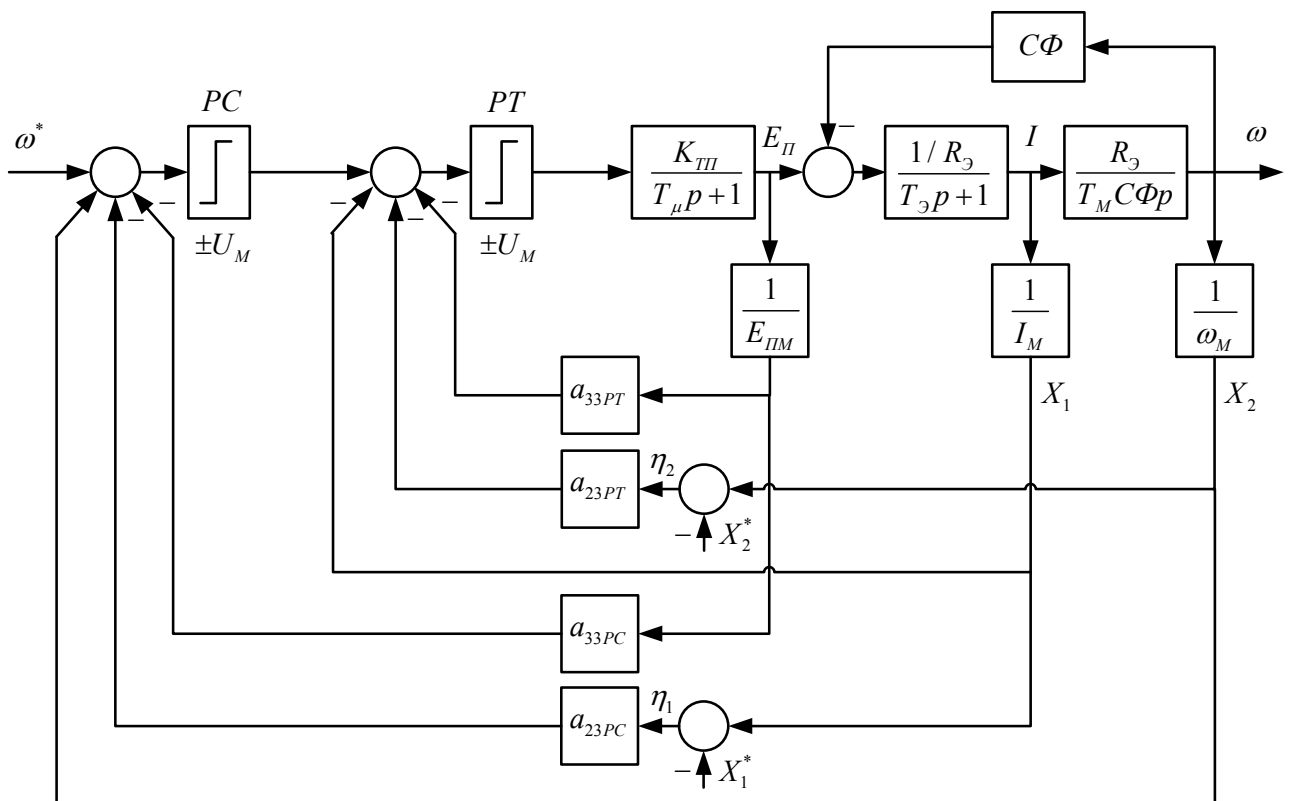


Рисунок 4.2 – Структурна схема релейної системи з контролем природних фазових координат

### **4.3 Моделювання ЕП ножиць поперечного різання з релейною системою керування в середовищі Matlab/Simulink**

Дослідження перехідних процесів в системі керування електроприводом, яка здійснюється за допомогою релейної конфігурації, виконано у середовищі прикладних програм Matlab/Simulink. Завдяки цій прикладній програмі, інженери та дослідники можуть створювати математичні моделі, використовувати різні алгоритми керування та вивчати їхню динаміку у віртуальному середовищі.

Matlab/Simulink надає інтуїтивний графічний інтерфейс для побудови блок-схем, що представляють системи. Користувачі можуть визначати різні компоненти системи, встановлювати їх взаємозв'язки та задавати параметри. Програма дозволяє симулювати роботу системи та вивчати її реакцію на різні вхідні сигнали.

Процес моделювання в Matlab/Simulink включає в себе визначення математичних рівнянь, введення параметрів, аналіз результатів симуляції та, при необхідності, налаштування параметрів для оптимізації роботи системи керування. Ця програма стала необхідним інструментом для вивчення та вдосконалення систем керування в різних галузях, від промисловості до досліджень.

Математична модель системи деталізовано представлена на рисунках 4.3 - 4.5. Аналіз роботи релейної системи проведено в тому ж самому програмному забезпеченні, що й для класичної системи підпорядкованого регулювання. З графіків перехідних процесів (рис. 4.6 – 4.17) випливає, що в релейній системі спостерігається покращення якості процесів, а точність функціонування системи стає вищою. Значущий аспект полягає в тому, що в релейній системі зміни в сталих часу практично не впливають на якість перехідних процесів.

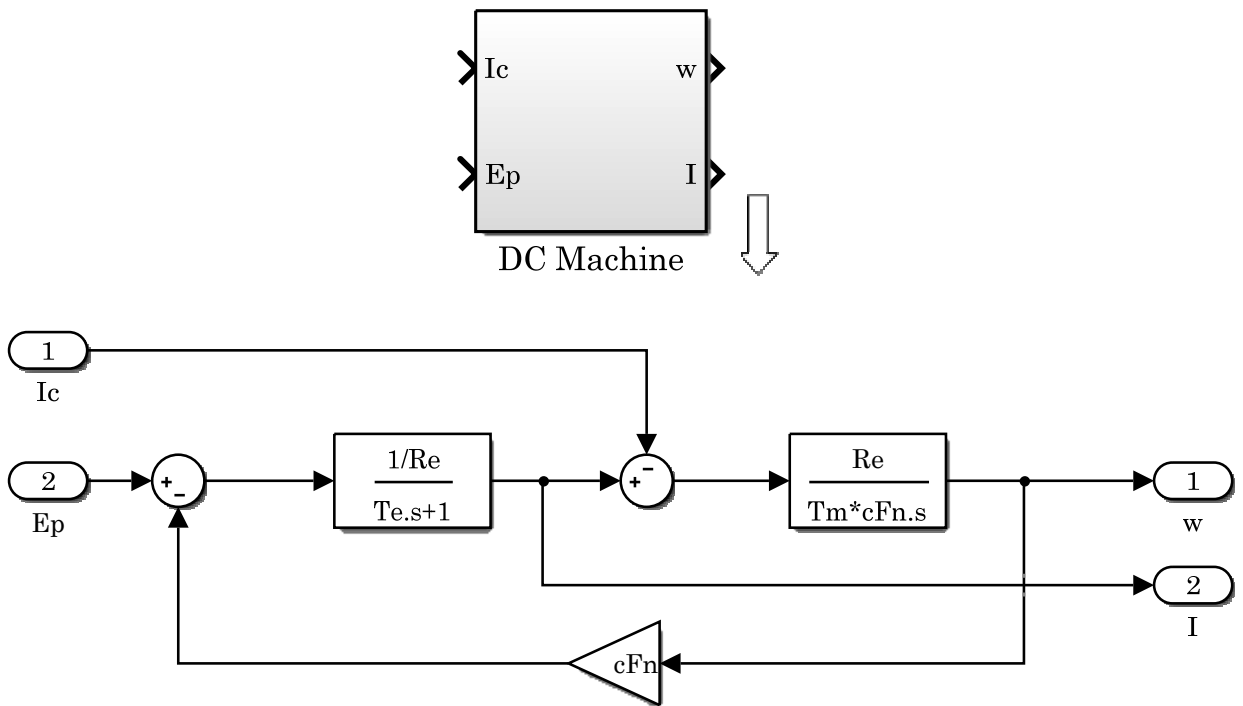


Рисунок 4.3 – Блок електродвигуна постійного струму (DC Machine)

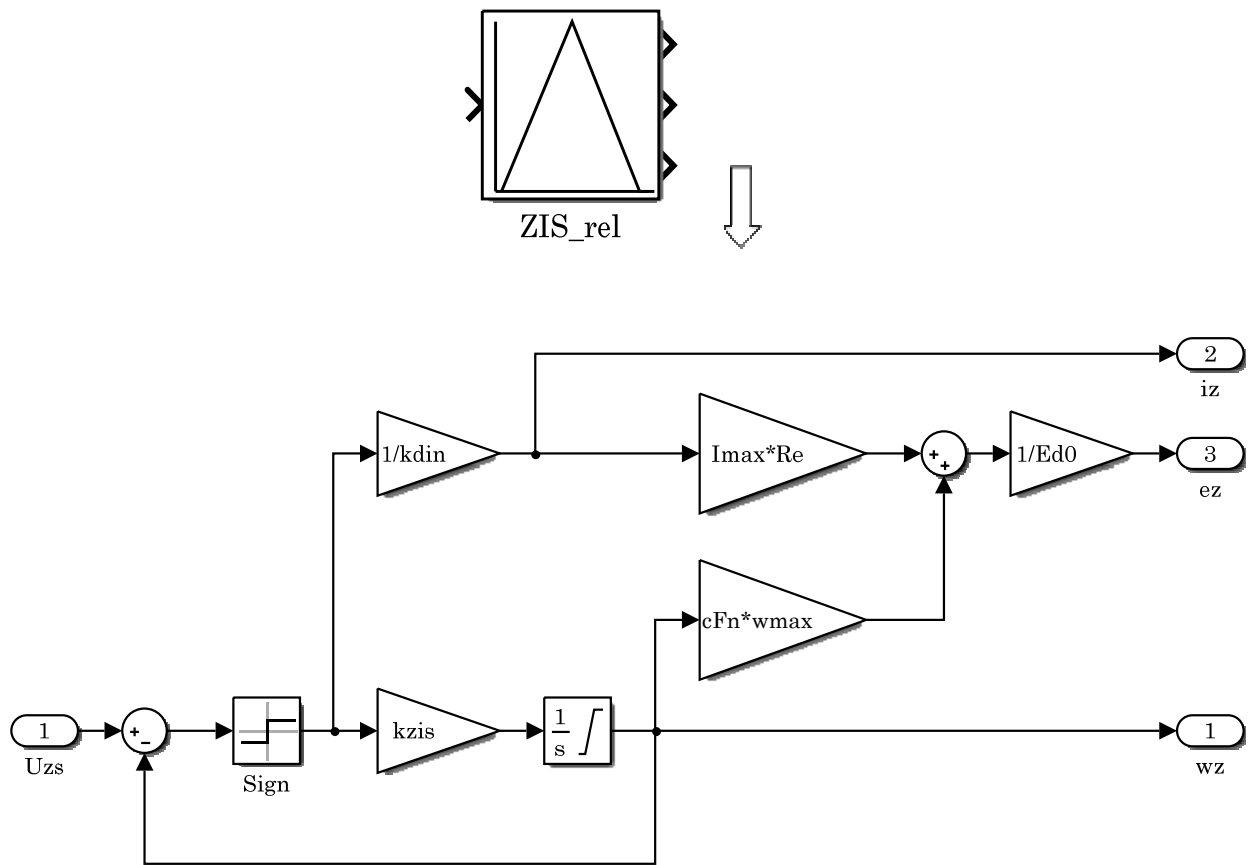


Рисунок 4.4 – Блок «Задатчик інтенсивності швидкості»

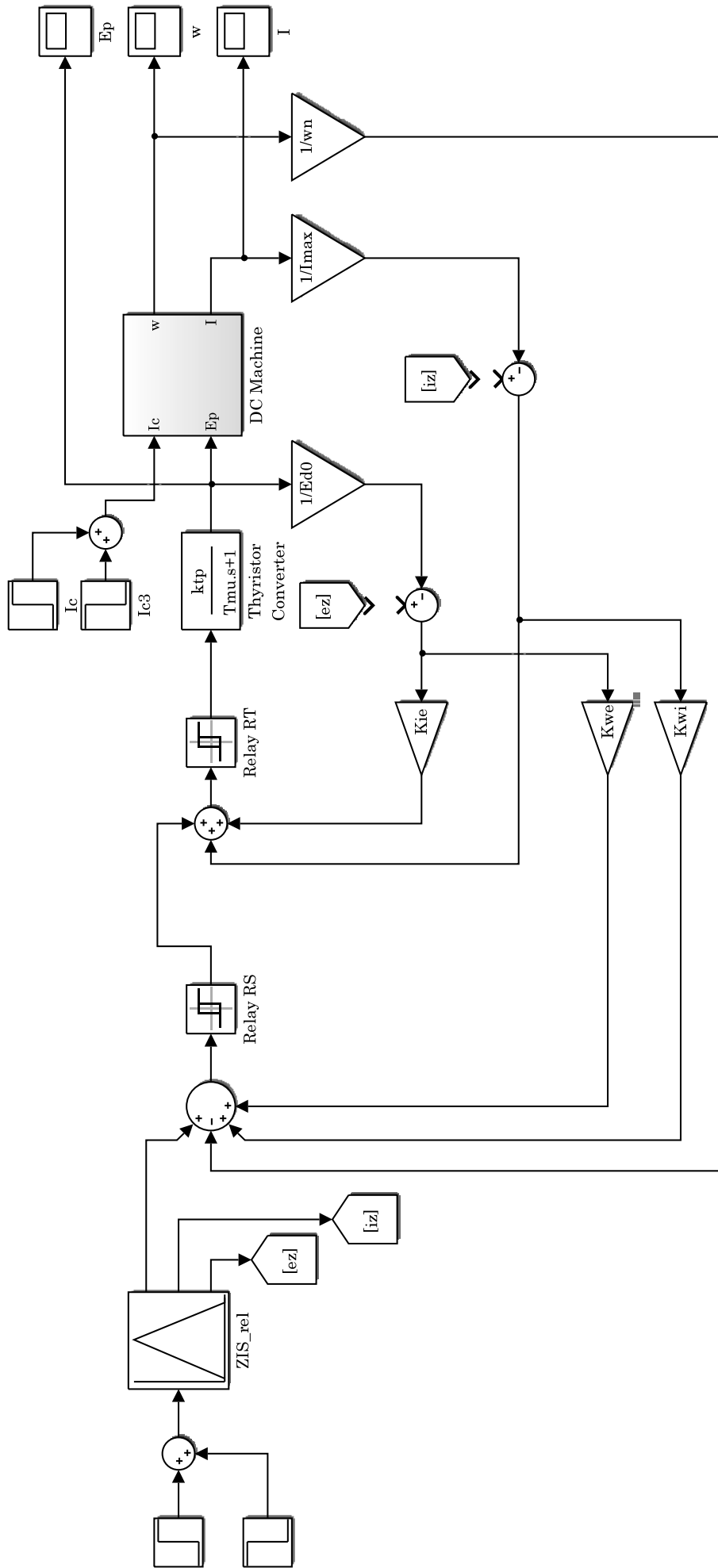


Рисунок 4.5 – Математична Simulink-модель релейної системи керування електроприводом ножиць

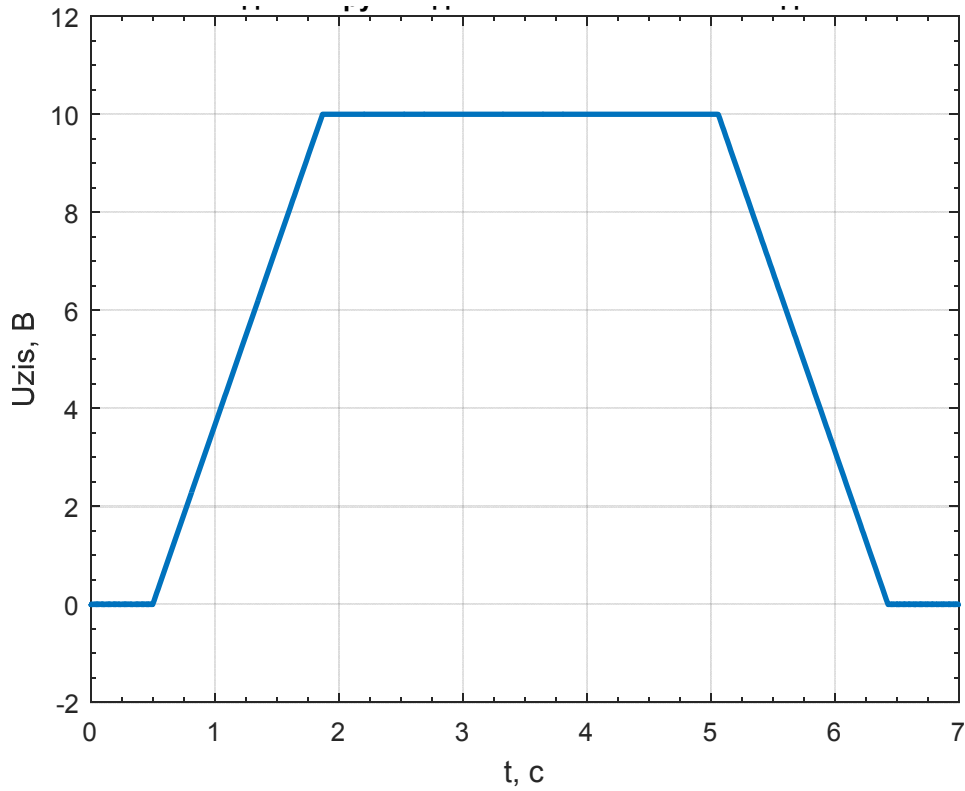


Рисунок 4.6 – Перехідний процес напруги задатчика інтенсивності швидкості в релейній системі керування ЕП ножиць

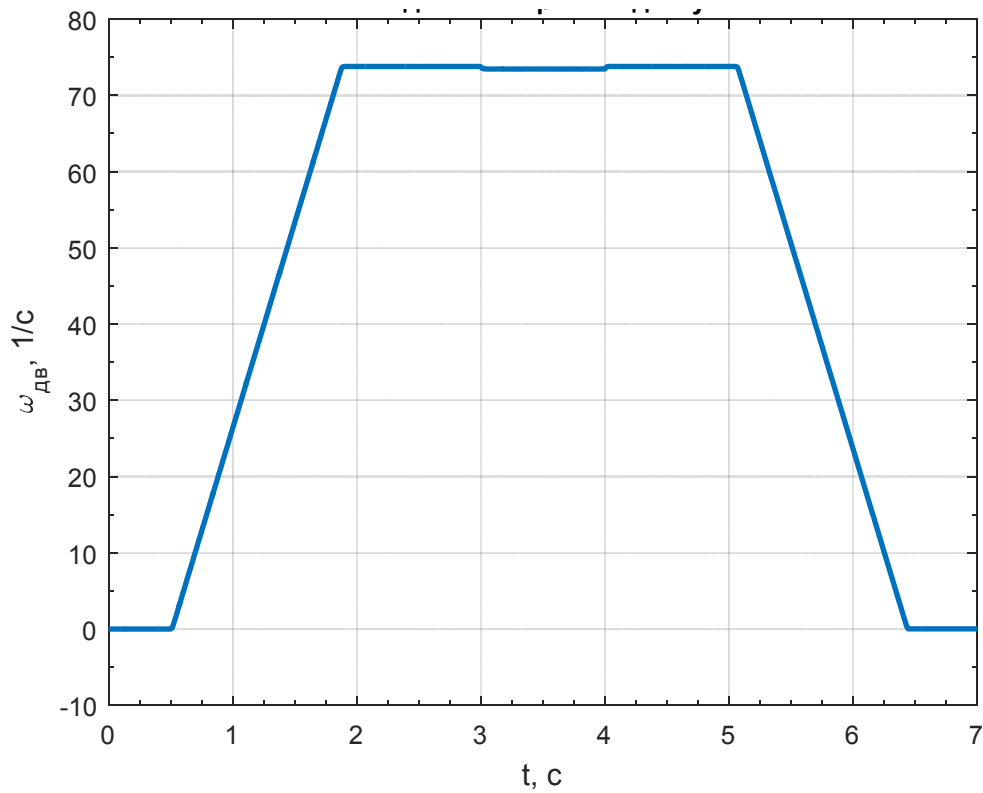


Рисунок 4.7 – Перехідний процес швидкості двигуна (струм навантаження  $I_c = 0,4I_n$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць



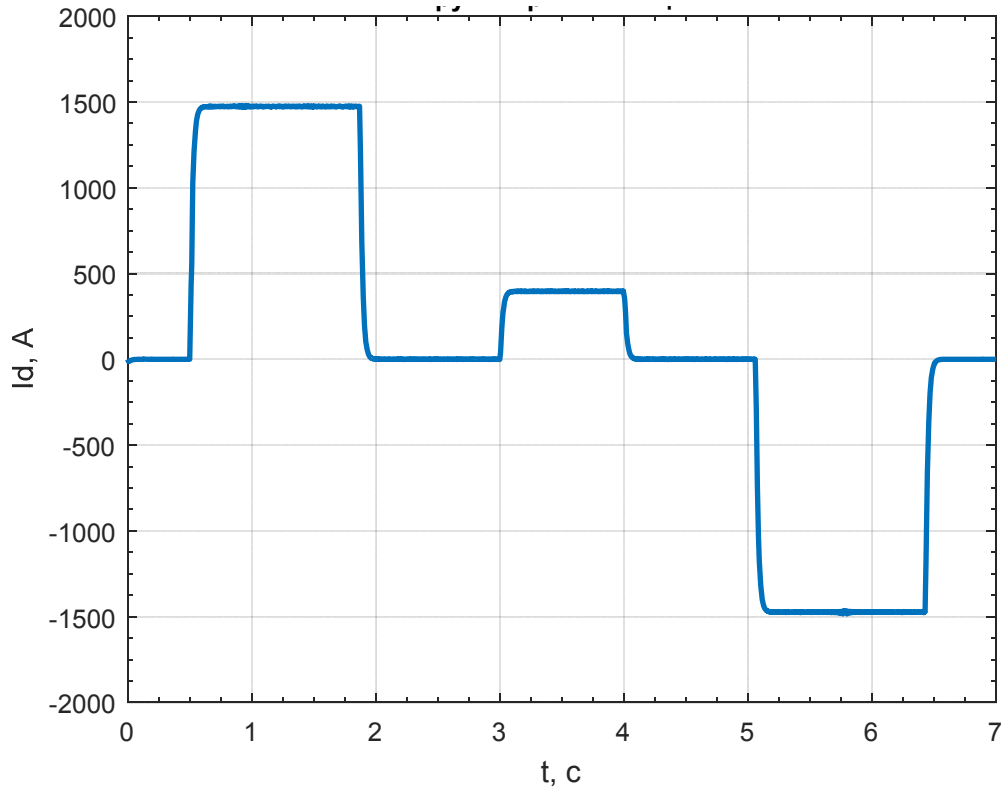


Рисунок 4.8 – Перехідний процес струму якоря

(струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

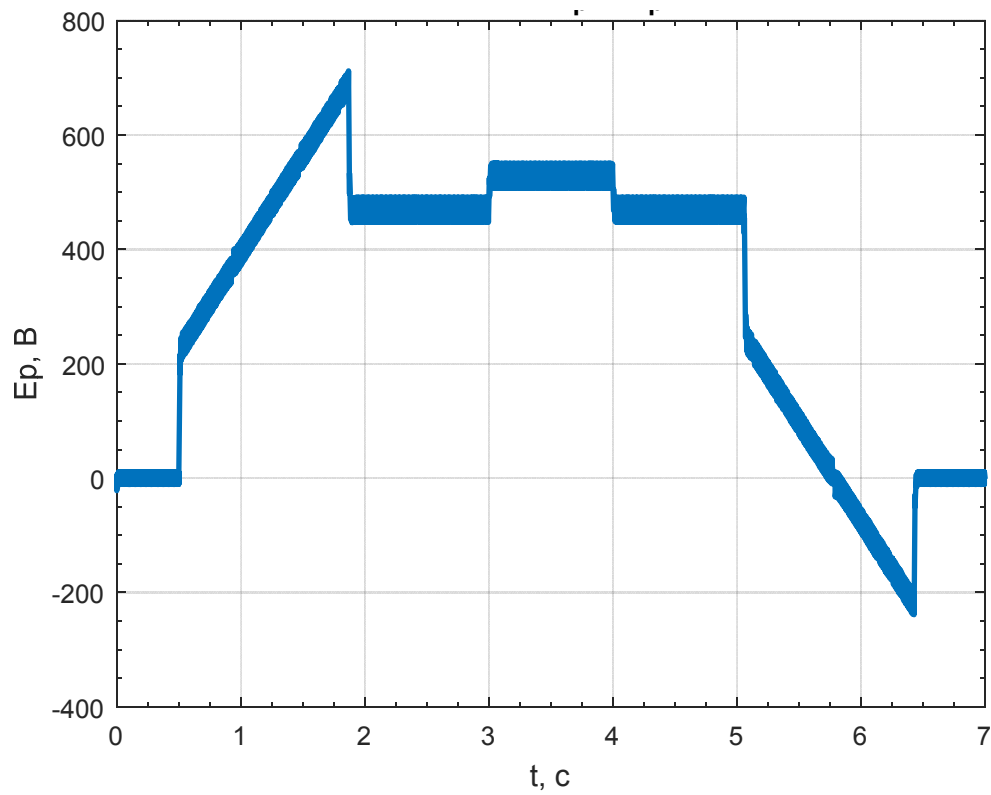


Рисунок 4.9 – Перехідний процес ЕРС тиристорного перетворювача (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

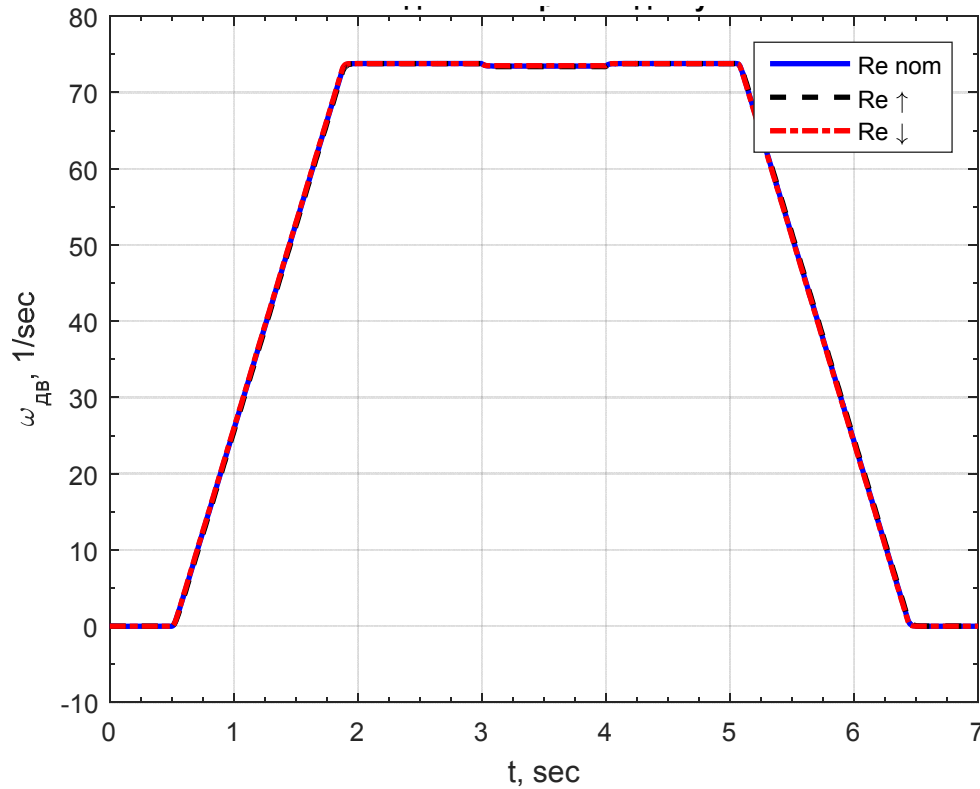


Рисунок 4.10 – Графіки переходного процесу швидкості двигуна при зміні  $R_e$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

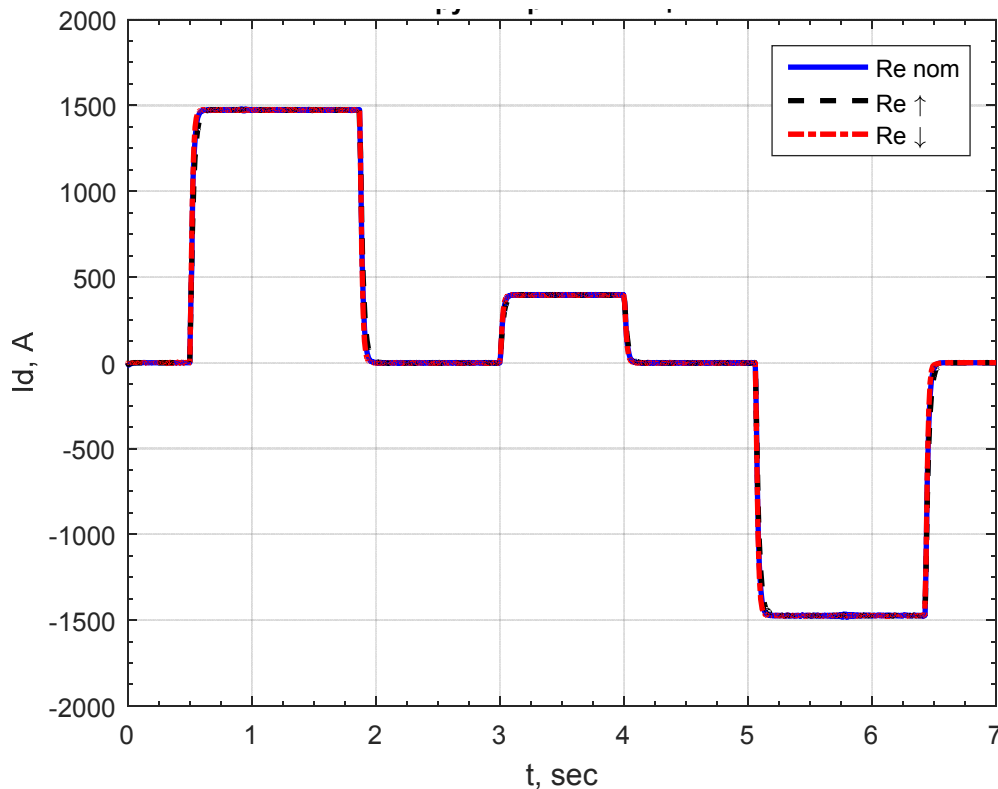


Рисунок 4.11 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні  $R_e$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

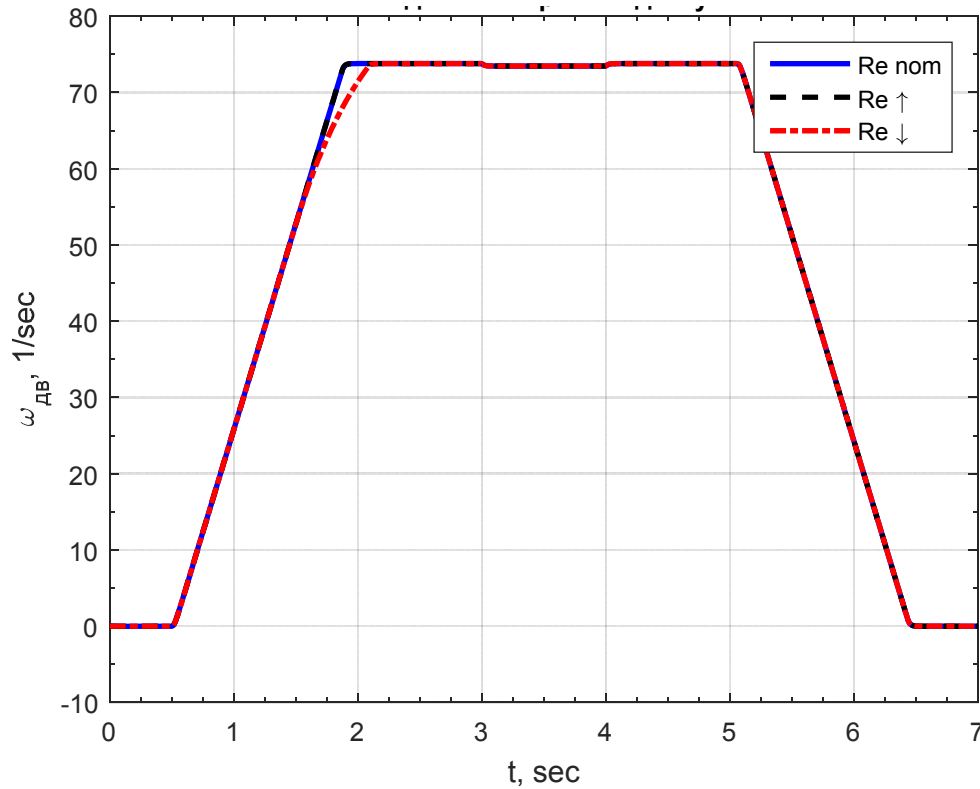


Рисунок 4.12 – Графіки переходного процесу швидкості двигуна при зміні  $k_p$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

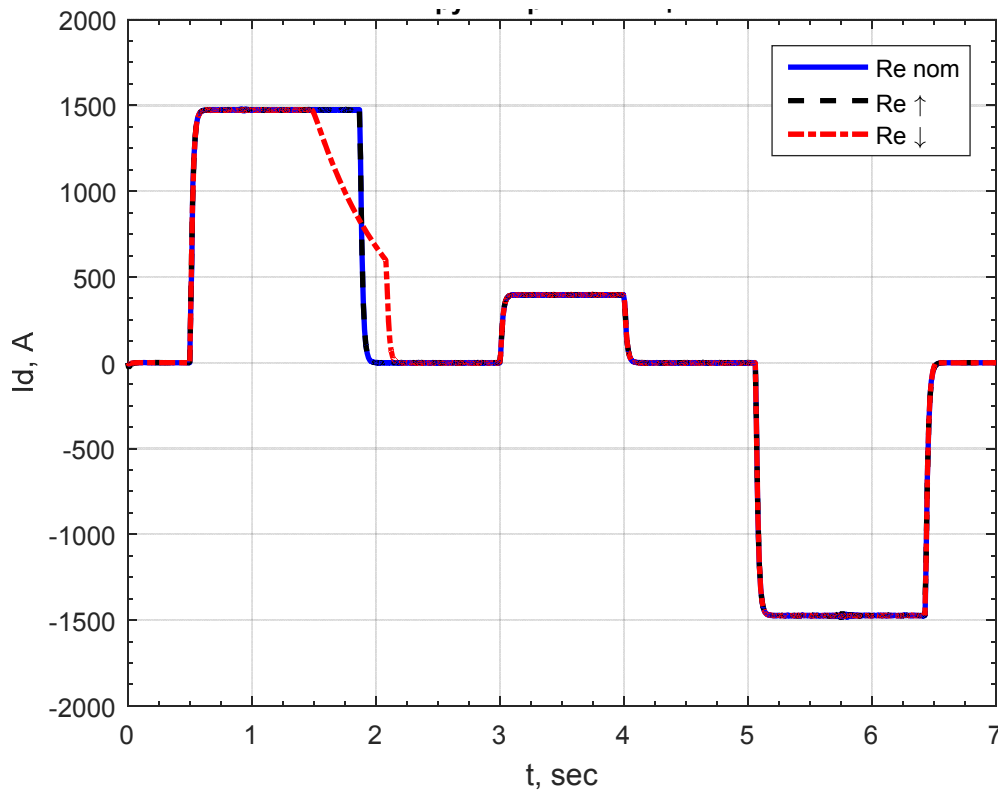


Рисунок 4.13 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні  $k_p$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

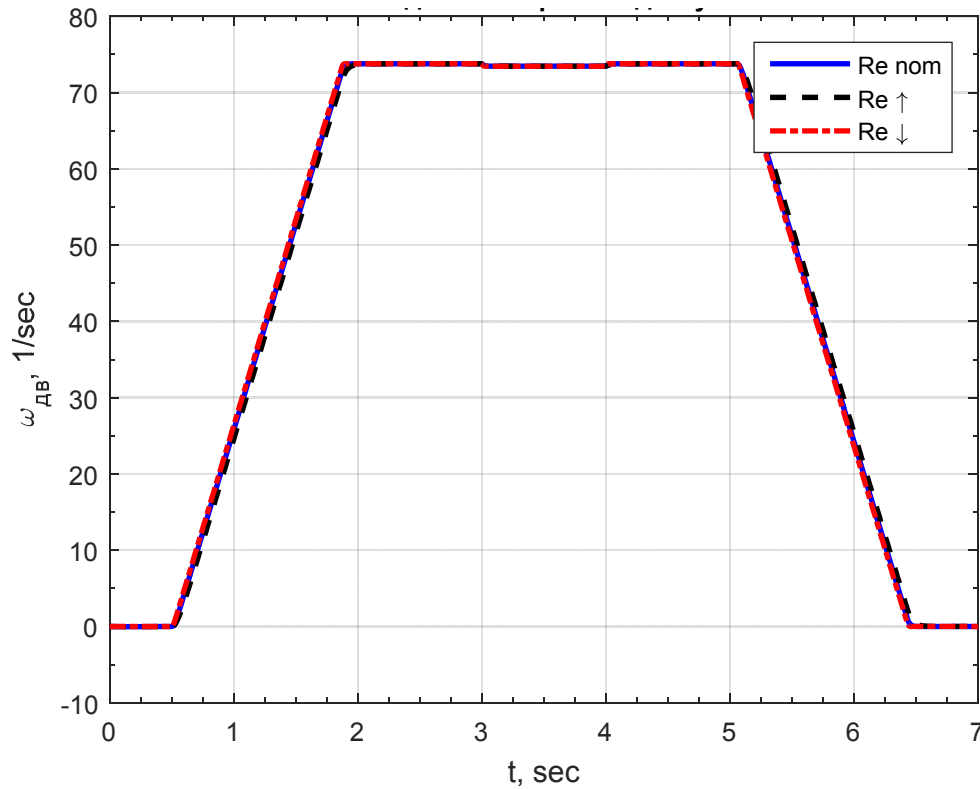


Рисунок 4.14 – Графіки переходного процесу швидкості двигуна при зміні  $J'_\Sigma$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

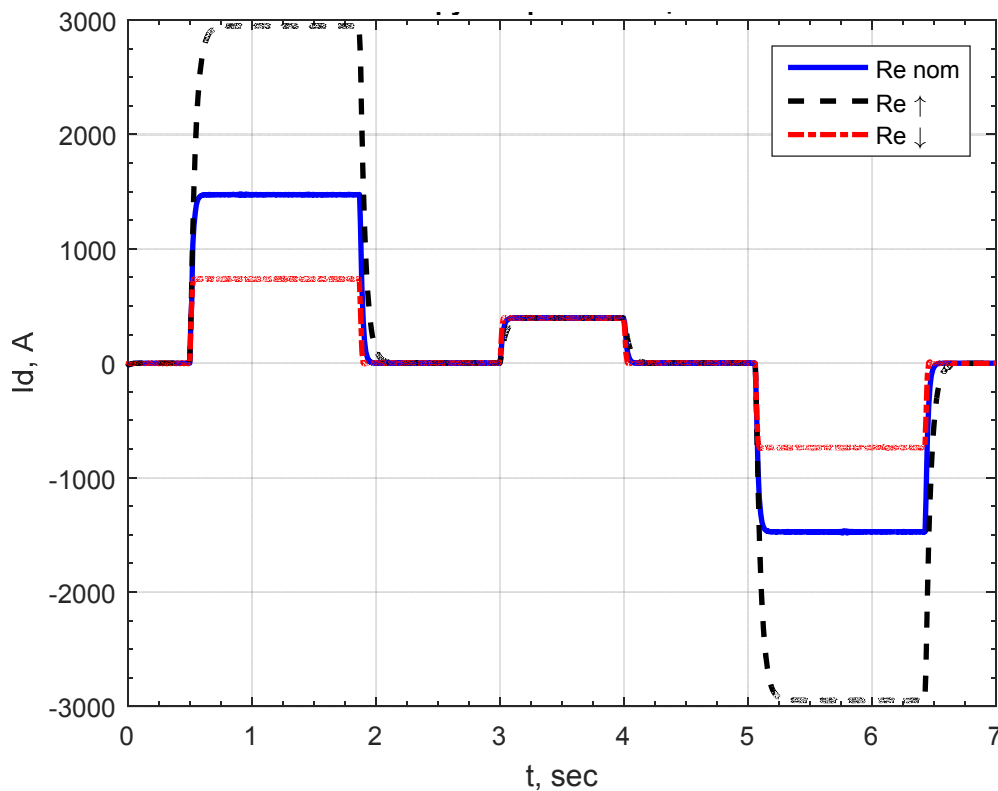


Рисунок 4.15 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні  $J'_\Sigma$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

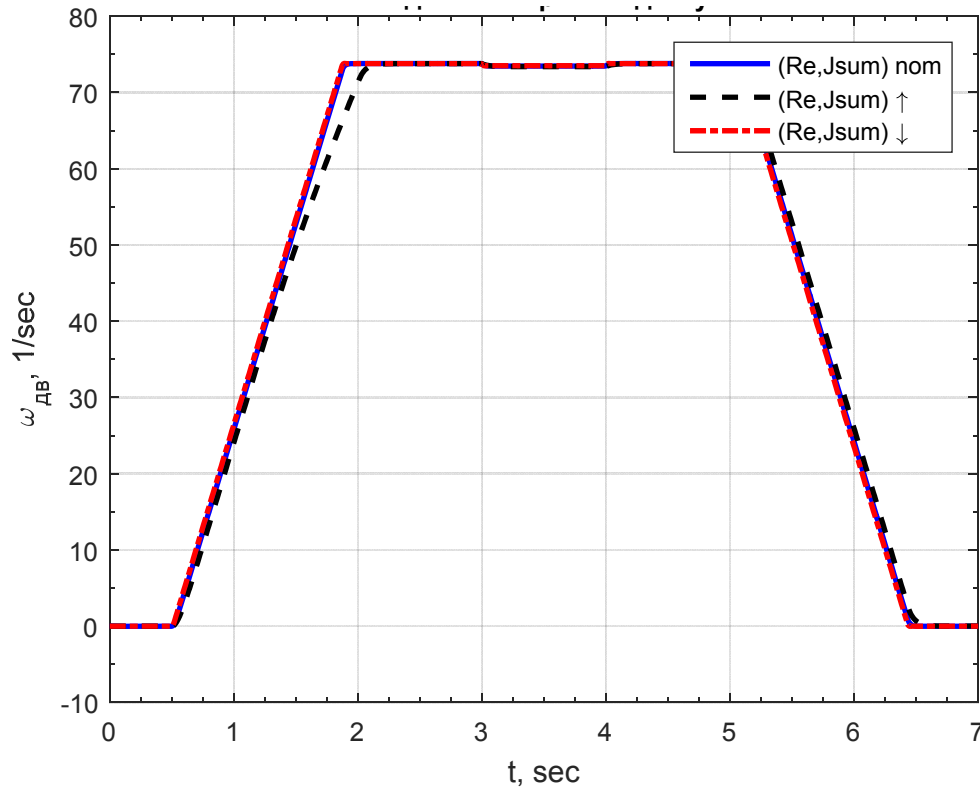


Рисунок 4.16 – Графіки перехідного процесу швидкості двигуна при сумарній зміні  $R_e$  та  $J'_\Sigma$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

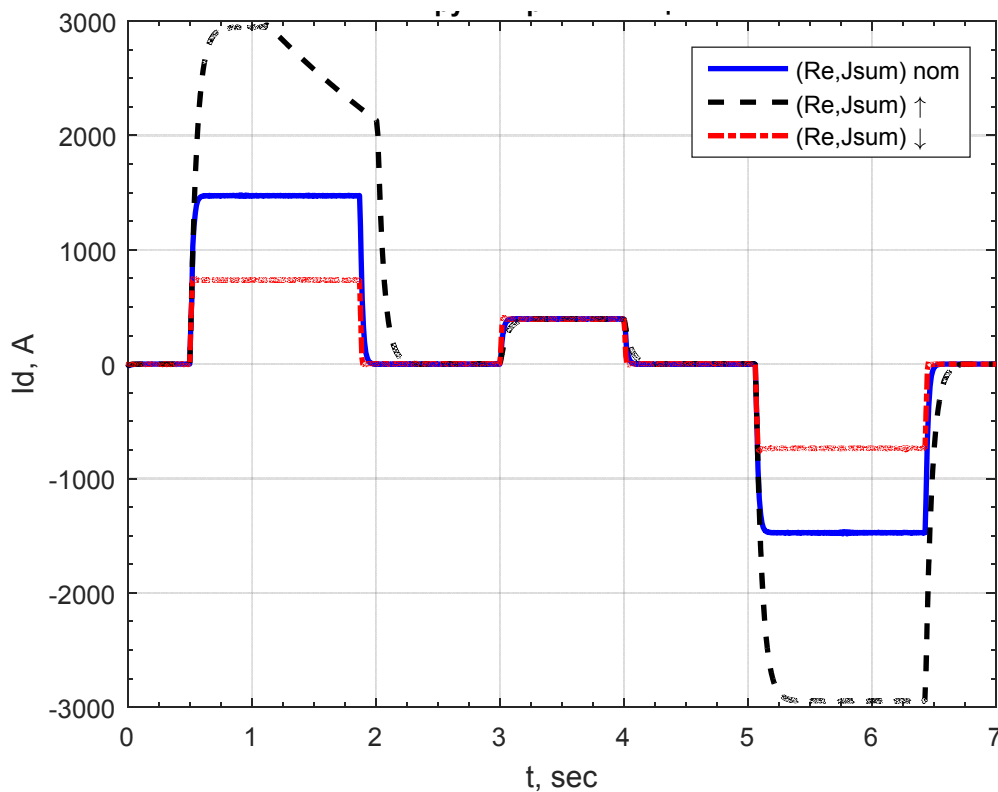


Рисунок 4.17 – Графік перехідного процесу струму якоря при сумарній зміні  $R_e$  та  $J'_\Sigma$  на 50% (струм навантаження  $I_c = 0,4I_H$ ) в релейній системі керування ЕП ножиць

#### **4.4 Синтез двомасової системи ЕП з використанням структурування передатних функцій**

Синтез двомасової системи електроприводу, використовуючи структурування передатних функцій, є важливим етапом у розробці ефективних та стійких систем керування. Даний підхід дозволяє аналізувати та оптимізувати динамічні характеристики системи, забезпечуючи високу точність та стійкість у різних умовах експлуатації.

Структурування передатних функцій у контексті двомасової системи електроприводу включає в себе визначення взаємозв'язків між різними елементами системи, такими як двигун, редуктор, маси, та інші. Основною метою є створення математичних моделей, що відображають динаміку кожного компонента та їх взаємодію в системі.

Для синтезу такої системи можна використовувати методи оптимального керування, де аналіз та настройка передатних функцій відбувається з метою досягнення оптимальних параметрів системи. Також важливо враховувати динамічні ефекти, такі як затримки часу, несталість параметрів, та інші, що можуть впливати на ефективність системи у реальних умовах.

Отже, синтез двомасової системи електроприводу з використанням структурування передатних функцій включає в себе ретельний аналіз та налаштування динамічних моделей для досягнення високих показників якості та стійкості системи у робочих умовах.

Системи підпорядкованого регулювання (СПР) здобули велику популярність завдяки своїм перевагам, але не завжди доцільно намагатися використовувати їх як основу для систем, які відрізняються від них в структурному плані чи плані якості регулювання. Зокрема, це стосується випадків, коли спробують адаптувати рішення СПР для одномасових систем до електроприводів з двомасовою механічною частиною, можливо, з невеликими корекціями. У випадках значних відмінностей між очікуваними та фактичними результатами, важливо відмежуватися від усталених стереотипів та шукати зовсім нові підходи до вирішення проблем.

Розглянемо задачу оптимізації системи регулювання пружного моменту в ЕП постійного струму, використовуючи систему керованого перетворювача напруги - двигун, механічна частина якого може бути описана як двомасова. Під оптимізацією ми розуміємо пошук структури та параметрів замкненої системи автоматичного керування (САК), побудованої на основі заданої (незмінної) частини. Ми маємо на увазі, що ця САК повинна забезпечити задані налаштування коефіцієнтів передатної функції утвореної САК, враховуючи обрані критерії оптимізації.

Після зведення до осі двигуна, механічна частина електроприводу може бути описана двома масами з моментами інерції  $J_1$  і  $J_2$ , які з'єднані пружним валом. Вал має еквівалентну приведену жорсткість  $c_{12}$  та коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя  $\beta_{12}$ . За допомогою математичної моделі можна подати решту системи. Керований перетворювач напруги (КП) є інерційною ланкою 1-го порядку з коефіцієнтом підсилення  $k_{\text{п}}$  та еквівалентною сталою часу  $T_{\text{п}}$ . Двигун постійного струму розглядається як ланка другого порядку з електромагнітною сталою часу  $T_{\text{я}}$ , електромеханічною сталою часу  $T_{\text{м1}}$ , конструктивною сталою  $c$  та опором кола якоря  $R$ .

Для отримання різноманітних рішень застосовуємо системний підхід, який був запропонований у джерелі [72]. Згідно з цим підходом, коефіцієнти передатної функції системи можна модифікувати через використання зовнішніх координат та проміжних величин, а також застосування послідовних коректуючих пристроїв. Хоча вплив Зовнішніх Збурень (33) можна однозначно замінити дією послідовних коректорів, зворотний процес не є однозначним. Таким чином, на початковому етапі синтезу ми обмежимося повною структурною схемою, включаючи 33, але без послідовних коректорів, щоб спростити отримання рішень.

Щоб розширити можливості впливу зовнішніх завад (33) на коефіцієнти ПФ, розглянемо випадок, коли ці завади можуть включати диференціюючі та інтегруючі компоненти потрібних порядків. Такий підхід дозволяє охопити різноманітні варіанти, маніпулюючи лише обмеженою кількістю незалежних параметрів. На наступному етапі синтезу деякі з цих 33 можуть бути замінені

послідовними ланками, особливо це можливо для гнучких ЗЗ. У розглядуваній системі координат для введення ЗЗ можуть використовуватися напруга УП перетворювача, струм двигуна  $I$ , швидкості  $\omega_1$  мас і  $\omega_2$ , а також пружній момент. Аналіз показує, що поставлену задачу можна вирішити без ЗЗ за швидкостями мас, тому в цьому випадку ці ЗЗ не розглядаються.

На першому етапі синтезу розглядаємо структурну схему системи автоматичного керування (САК) із спільним суматором, на вхід якого подаються сигнали ЗЗ за напругою перетворювача  $k_n(s)$ , за струмом двигуна  $k_c(s)$  та за пружним моментом  $k_M$ . Для спрощення використовуються пропорційні до реальних координат величини, такі як  $I$ ,  $R$ , і  $\omega_1$  і  $\omega_2$ .

У виразах для передатної функції (ПФ) вводяться наступні позначення:  $\beta = C^2 / R$  - жорсткість механічної характеристики двигуна;  $T_{m1} = J_1 \beta$ ;  $T_{m2} = J_2 / \beta$  - еквівалентні електромеханічні сталі часу. Розглядаючи цю структуру САК, ми отримуємо відоме рішення, що астатичне регулювання струму можливе при введенні критичного додаткового ЗЗ за напругою перетворювача. Величину можна змінити, вводячи гнучкий ЗЗ за напругою. Ці ЗЗ (жорсткий та гнучкий) можна буде замінити одним послідовним ПІ-регулятором на наступному етапі синтезу. Таким чином, приймаємо  $k_H = -1 / k_{II}$ . Зауважимо, що внутрішній ЗЗ за ЕРС двигуна (при  $T_{M1} > 4T_{Я}$ ) можна ігнорувати. Враховуючи це, ПФ системи матиме наступний вигляд:

$$W(s) = \frac{\alpha(bs+1)}{\frac{\alpha}{k_n} \beta_1 T_n T_{Я} T_{M1} s^4 + \frac{\alpha}{k_n} T_n \left( \frac{b}{\mu} T_{Я} + \beta_1 T_{M1} \right) s^3 + \frac{\alpha}{k_{II}} \left( T_{II} \frac{T_{Я} + b}{\mu} + (1 + k_{II} k_c) \beta_1 T_{M1} \right) s^2 + \left( \frac{\alpha}{k_n} \frac{T_{II}}{\mu} + b \right) s + 1}$$

де  $\alpha = \mu k_{II} / (1 + k_{II} (k_c + \mu k_M))$  - коефіцієнт підсилення системи;  $\mu = T_{M2} / (T_{M1} + T_{M2})$ ;  $\beta_1 = \beta / c_{12}$ ;  $b = b_{12} / c_{12}$ .

Вираз (4.1), представлений в основі, служить вихідною точкою для отримання широкого спектру часткових рішень, з яких виокремлюються граничні варіанти. Ці граничні випадки можуть бути умовно поділені на дві категорії: системи з завадами тільки за струмом двигуна і системи з завадами



тільки за пружним моментом. Зазначимо, що вираз також застосовується до випадку одномасової системи, де  $\mu = 1$ ,  $b = 0$  і  $i = 0$ .

У системах підпорядкованого регулювання (СПР) вивчають поведінку систем автоматичного керування (САК) з оцінкою величин співвідношень між  $a$  і сталими часу інтегрування вкладених один в одного контурів. У випадку нашого аналізу, відсутність таких вкладених контурів не дозволяє застосувати цю оцінку, але їх можна уявити, подаючи характеристичний поліном передатної функції (1) у вигляді:

$$A(s) = A_1 s \left( \frac{A_2}{A_1} s \left( \frac{A_3}{A_2} s \left( \frac{A_4}{A_3} s + 1 \right) + 1 \right) + 1 \right) + 1.$$

Отримуємо:

$$A_4/A_3 = T_0 = T_x / \left( \frac{b_{12}}{\mu\beta} \frac{T_x}{T_{M1}} + 1 \right); \quad A_3/A_2 = a_1 T_0; \quad A_2/A_1 = a_1 a_2 T_0; \quad A_1 = a_1 a_2 a_3 T_0. \quad (4.2)$$

Після заміни виразів для  $z$  (4.1) в (4.2) виникає система рівнянь, що дозволяє отримати різні варіанти розв'язків. Досягнення бажаних налаштувань системи автоматичного керування стає можливим, якщо кожна величина і кожна стала часу мають власний варійований параметр, який відрізняється від інших. Така структура передатної функції (ПФ) дозволяє аналізувати поведінку САК для будь-якої структури за різними значеннями коефіцієнтів уявної регулярної структури, аналогічної тим, що притаманні системам підпорядкованого регулювання (СПР). У роботі [73] представлено ряд варіантів стандартних передатних функцій систем 4-го порядку, які відповідають різним критеріям оптимальності. В [74] наведено коефіцієнти для цих функцій, які приймають значення від 0.3 до 4 для 30 різних критеріїв. Ці параметри, таким чином, можна розглядати як універсальні і використовувати їх для вираження коефіцієнтів у відносних одиницях. На даному етапі не буде розглядатися розв'язання системи (2) через її складність. Замість цього ми проаналізуємо можливість незалежного налаштування коефіцієнтів характеристичного полінома ПФ (1).

У даному випадку можна налаштувати жорсткий зовнішній зворотний зв'язок за струмом для визначення значення коефіцієнта  $A_2$ . Очевидно, що при

введенні цього зворотного зв'язку із диференціальними та інтегральними компонентами, ці елементи перетворюються в відповідні коефіцієнти  $A_3$  і  $A_1$ . Ці коефіцієнти можна використовувати для подальшого налаштування. На даному етапі синтезу величини  $T_n$  і  $T_y$  розглядаються як параметри, які можна змінювати за умовно розрахунковими значеннями. Згідно з формулою (1), можна змінювати коефіцієнт  $A_1$  шляхом модифікації  $T_n$ , а коефіцієнт  $A_3$  – за допомогою впливу на  $T_y$ . У випадку паралельної корекції цього можна досягти за допомогою гнучких зворотних зв'язків. Важливо відзначити, що при малих значеннях коефіцієнта внутрішнього в'язкого тертя  $\beta_{12}$  необхідно збільшувати величину  $A_1$  для налаштування коефіцієнта  $T_n$ . При цьому, згідно з формулою (4.2), величина  $T_0$  і, відповідно, швидкодія, залишається незмінною, незалежною від  $T_n$ . Але згідно з (2), при малих значеннях коефіцієнта  $\beta_{12}$ , величина  $T_0$  збільшується і стрімко наближається до  $T_y$ , що може бути надто великим. У такому випадку зменшення величини  $T_y$  буде належним заходом.

Перейдемо до наступного етапу синтезу, що включає практичну реалізацію системи автоматичного керування.

У розглянутому варіанті, де використовуються додатні жорсткі зворотні зв'язки за напругою керованого перетворювача та гнучкі зворотні зв'язки за струмом і напругою  $T_n$  і  $T_y$  для зміни параметрів, можна розглянути ефективну заміну їхньої дії однією послідовною коректор-регулятора, яка має передавальну функцію:  $W_p(s) = (T_{n^*}s + 1)(T_{y^*}s + 1) / T_{n^*}^* (T_{y^*}^* + 1)$ .

На вхід цього елемента подаються від'ємні жорсткі зворотні зв'язки за струмом якоря двигуна та за пружним моментом. Якщо бажана передавальна функція системи обрана тільки за її знаменником, то для компенсації диференціюючої складової чисельника в кільце завдання САК може бути введений відповідний фільтр. Також доцільно розглянути можливість використання бажаної (оптимальної) передавальної функції із нулем.

## ВИСНОВОК

На підставі результатів теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Стосовно до об'єкта керування – електропривод механізму ножиць поперечного різання 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 ПОСИЛАНЬ**

- 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, 1981. - 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, 1981. - 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, 1981.- С. 237 - 251.
- 8(65). Ильинский Н.Ф. Основы электропривода / Ильинский Н.Ф. – М.: Издательство МЭИ, 2003. - 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.З. Информационная теория идентификации / Цыпкин Я.З. – 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. 1194-1213.
- 19(15). Борцов Ю.А. Автоматические системы с разрывным управлением / Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. - Л.: Онсргоиздат, 1986. - 168 с.
- 20(88). Макмарри У. Топология схем энергетической электроники / Макмарри У. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 137-150.
- 21(149). Филиппов А.Ф. Система дифференциальных уравнений с несколькими разрывными функциями / Филиппов А.Ф. - Математические заметки, т. 27, №2, 1980. - С. 255 -266.
- 22(168). Backnays I. Investigation on High Speed SRD Incorporating Amorphous Iron / Backnays I. - Proceedings of EPE'95,1995. pp. 382 - 395.
- 23(2). Айзерман М. А. Краткий очерк становления и развития классической теории регулирования и управления / Айзерман М.А. - Автоматика и телемеханика №7, 1993. - 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.З. Релейные автоматические системы / Цыпкин Я.З. – 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. 56-63.

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, 1981. - 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.120-123.

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: 05.09.03. – 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.

51. Гарнов Б. К., Рабинович В. В., Вишневецкий Л. М. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. – М.: Металлургия, 1971. – 215 с.

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

53. Летов А. М. Математическая теория процессов управления. – М.: Наука, 1981. – 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. 436-441.

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. Зеленов А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов: Учебное пособие / А.Б. Зеленов. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.
63. Альбом 02047.11. Рабочая документация: электроприводы. Ножницы поперечной резки / ЗАО «Струм». – Харьков, 2003.
64. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.В. Третьяков, В.И. Зюдин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
65. Королев А.А. конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.
66. Леонов И.С. Ножницы для резки сортового и листового проката / И.С. Леонов, Г.П. Фуга, Г.Л. Крылов, В.Г. Песоцкий. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.
67. Технологическая инструкция по прокатке металла в толстолистовом стане 3000.
68. SIEMENS: SIMOREG DC-MASTER 6RA70: Цифровые встраиваемые преобразователи тока: Каталог. – DA 21.1, 2001 – 151 с.
69. SIEMENS: SIMOREG DC MASTER 6RM70: Преобразователи шкафного исполнения: Каталог. – DA 22, 2002 – 50 с.
70. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник/ И. Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. Наук В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.: ил.
71. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниково-вых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
72. Лозинський О.Ю., Бойчук Б.Г. Структурно-параметричний синтез керування систем електроприводів. Вісник Нац. Ун-ту «ХП»: Зб. Наук. праць. Темат. Вип.11. – Харків, НТУ «ХП», 2002. – т.2. С.345 - 347.

73. Осичев А.В., Котляров В.О., Марков В.С. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе // Вісник ДТУ «ХП». «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: Основа. – 1997. С. 104 – 109.

74. Бойчук Б.Г., Паранчук Я.С. Аналіз динаміки САК 4-го порядку за коефіцієнтами їх характеристичних поліномів. Збірник наук праць Дніпродзержинського ДТУ. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика». – 2007. – С.334 – 337.

75. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. Кишинев: Штиинца, 1982. 224 с.

76. . Поляков В.Н. Экстремальное управление асинхронным электроприводом при ограничении тока и напряжения / В.Н. Поляков, А.А.Таран, Р.Т. Шрейнер // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: материалы науч.-техн. конф. с международным участием. Новосибирск: НГТУ, 2003. С. 56-61.

77. . Мищенко В.А. Оптимизация частотно-управляемого асинхронного электропривода по минимуму тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Мищенко. Свердловск, 1969. 17 с.

78. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 420 с.