

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Опис технологічного процесу обтискного стану 1250 та технічна характеристика механізму .....	7
1.1 Характеристика обтискного стану 1250 .....	7
1.2 Опис роботи механізму рольгангу .....	9
1.3 Технічні дані механізму рольгангу .....	11
1.4 Вимоги до електроприводу рольгангу перед ножицями обтискного стану 1250 .....	12
2 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна рольгангу перед ножицями.....	14
2.1 Розрахунки моментів статичних опорів .....	14
2.2 Перевірка двигуна по завантаженню .....	20
2.3 Час керування електроприводом .....	21
2.4 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріванню.....	28
3 Вибір силової та перетворювальної техніки рольганга перед ножицями .....	29
3.1 Вибір та обґрунтування силової частини системи та способу керування електроприводом .....	29
3.2 Вибір комплектного тиристорного електропривода й силового трансформатора .....	33
3.3 Вибір згладжувального дроселя .....	39
3.4 Опис принципової схеми рольганга перед ножицями .....	43
4 Синтез системи підпорядкованого керування електроприводом рольгангу перед ножицями .....	47
4.1 Математичний опис об'єкту керування.....	47
4.2 Розрахунок основних параметрів елементів системи електроприводу .....	48
4.3 Синтез регулятора струму .....	51
4.4 Синтез регулятора швидкості .....	55
4.5 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості.....	59

5	Моделювання системи підпорядкованого керування електроприводом рольгангу перед ножицями в середовищі MATLAB/SIMULINK.....	63
6	Охорона праці .....	74
6.1	Інструкція з охорони праці в прокатному виробництві .....	74
6.2	Вимоги безпеки перед початком роботи .....	76
6.3	Вимоги безпеки під час роботи .....	76
6.4	Вимоги безпеки після закінчення робіт .....	78
6.5	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	79
6.6	Протипожежні заходи.....	79
	Висновок.....	82
	Перелік джерел посилання .....	83
	Додаток А .....	85

## ВСТУП

Рольганги призначені для транспортування металу до прокатного стану, для завдання металу у валки і приймання його з валків, для пересування металу до ножиць, пил, правильним і іншим машинам. Загальна довжина рольгангів досить значна, а вага їх досягає 20-30% від загальної маси механічного обладнання прокатного стану. За призначенням рольганги діляться на робочі та транспортні.

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

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

Об'єкт розробки відноситься до транспортних рольгангів.

В даний час одними з найбільш поширених і масово виготовлених промисловістю є системи керування електроприводом, побудовані за принципом підпорядкованого регулювання. Порівняно з попередніми їм системами вони володіють великою швидкодією, виконані на базі уніфікованих елементів, що полегшує проектування і складання.

В умовах швидкого зростання питомої ваги регульованих електроприводів при суворій економії матеріальних і трудових ресурсів гідності електроприводу оцінюються не тільки по ефекту, досягнутого в технологічній сфері, але і по тому, якою ціною вони були досягнуті у сфері виробництва і експлуатації обладнання. Тому існує тенденція до глибокої уніфікації пристроїв керування.

Об'єктом розробки в даній дипломній роботі є автоматизований електропривод рольганга перед ножицями обтискного стану 1250. Вимоги до електропривода та початкові дані для проектування наведені у відповідних розділах.

# 1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБТИСКНОГО СТАНУ 1250 ТА ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМУ

## 1.1 Характеристика обтискного стану 1250

На обтискному стані 1250 прокочуються блюмси, осьова й ковальська заготовки перетином від 200× 200 мм до 400× 400 мм і сляби шириною від 590× 1250 мм при товщині від 110 до 320 мм, довжині від 1200 до 6000 мм. Максимальне розважування сляба 11,2 т.

Будівля цеху складається із прольоту нагрівальних колодязів, прольоту перекидних клапанів, станового прольоту, машинного залу й трьох складів блюмів і слябів шириною по тридцять метрів.

Злитки подаються складами зі стріперного відділення мартенівського цеху в проліт нагрівальних колодязів, де проводиться посад, нагрів й видача злитків у прокатку.

Регенеративні нагрівальні колодязі обслуговують кліщові крани. Двигуни кліщових кранів живляться від мережних генераторів постійного струму напругою в 230 В. Режим роботи при подачі злитків дуже важкий, і тому застосовуються двигуни постійного струму. Керування двигунами здійснюється релейно-контакторною апаратурою. Подача злитків до прийомного рольганга проводиться злитковозним візком, який складається із двох платформ і дозволяє подавати на прийомний рольганг по 4 злитка. Для зіштовхування злитків із платформ візка служить зіштовхувач. Із прийомного рольганга, що приводиться за допомогою двигунів постійного струму типу Д-814 потужністю 110 кВт злиток подається на, що підводить рольганг із аналогічним електроприводом. З рольганга, що підводить, злиток подається на розкатний рольганг, на ваги, потім на робочий, потім на станинні ролики, які безпосередньо подають злиток у валки. За станом є 8 роликів, з яких перші три мають індивідуальний привод, а інші п'ять приводяться двома двигунами постійного струму типу SHC21C1 потужністю 126 кВт. Живлення двигунів здійснюється по системі ТП-Г (тип КТЕ460/500). Для поліпшення злитка валками кліті або розкату перед кліттю й за нею встановлені по два станинні

ролики. Привод станинних роликів здійснюється від двигунів П2Р-560 потужністю 150 кВт. Керування двигунами здійснюється по системі ТП-Д (тип КТЕ460/500). Станинні ролики й робочий рольганг за умовами технологічного процесу вимагає швидкого розгону й гальмування. Цим пояснюється застосування такого привода.

Прокатка злитків проводиться реверсивною робочою кліткою відповідно до заданих схем прокатки. Привод валків клітки індивідуальний і здійснюється двигунами типу П-23/165-5,9 потужністю 5000 кВт і обертами 50 - 90 об/хв, при номінальній напрузі 850 В і струмі 6300 А. Момент, що розбудовується на валу двигуна дорівнює 89700. Двигуни живляться по системі ТП-Д. Вибір системи керування диктується найкращим використанням механічних якостей даної клітки, що веде до збільшення загальної продуктивності стану. Обтиснення при прокатці проводиться за допомогою натискного пристрою. Привод натискного пристрою складається із двох двигунів МПВ-640-700 загальною потужністю  $2 \times 640$  кВт і номінальною напругою 600 В. Двигуни встановлені на робочій клітці у вертикальному положенні, їх живлення здійснюється по системі ТП-Д. До натискного пристрою висуваються дуже високі вимоги: велика кількість включень у годину, швидкий розгін і гальмування, реверсування.

Перед станом і за ним встановлені маніпулятори із вбудованими в праві лінійки кантователями. Маніпулятор служить для пересування розкатів від калібру до калібру й для виправлення скривленого розкату, якщо такий виходить у процесі розкочування. Управління маніпулятором по системі ТП-Д, тип двигуна 32AS6260F/10 потужністю 620 кВт. Кантователі служать для установки розкату на ребро при прокатці слябів і перекидання розкату для проходження його в черговому калібрі. Кантування здійснюється на  $90^\circ$  уздовж осі прокочуваної штуки. Привод переднього кантователя здійснюється від двигунів потужністю 300 кВт тип 32AS5858F/10. Привод безредукторний – 37об/хв. Керування двигунами кантователів здійснюється по системі ТП-Д. Після прокатки метал транспортується на ножиці розкатним або відвідним рольгангом. Ножиці приводяться в рух за допомогою двох двигунів типу

2AS6862F/16 із сумарною потужністю  $2 \times 3800$  кВт. Керування й живлення двигунів проводиться по системі ТП-Д.

Привод ножиців характеризується частими включеннями. Реверс повинен проводитися за малий час. Щоб не затримувати метал на потоці збиранням обрєзі, за ножицями є рольганг, що відсувається. При обрєзанні кінця розкату з дефектами рольганг відсувається, утворюючи вікно шириною 900 мм, у яке провалюється обрєзь і по жолобу, установленому під рольгангом, що відсувається, направляється на скрапний конвеєр збирання обрєзі. Обрєзь, потрапивши на скрапний конвеєр, подається їм у скрапний проліт до залізничних платформ. Порізка металу в діапазоні від 1.2 до 6 метрів здійснюється за допомогою пересувних упорів. Підйом упорів проводиться приводом із двигунами постійного струму типу SHK 10A1 потужністю  $2 \times 31$  кВт, а привод переміщення упорів здійснюється двигунами постійного струму типу SHK 10A1 потужністю  $2 \times 37$  кВт.

За ножицями встановлені сельсинні вказівники довжини порізанної штуки. Крім того є установка промислового телебачення.

Транспортний рольганг подає блюми й сляби до клеймовочної машини. Після клеймування метал надходить на рольганги до збиральних пристроїв, змонтованих у трьох прольотах складу й розташованих перпендикулярно становому прольоту. Лінія збирання складається з рейкового зіштовхувача, привод якого має двигун типу Д 818 потужністю 186 кВт, рольгангів, зникаючих упорів й штабелюючих столів. Привод рольганга, що входять у лінію збирання, здійснюється від двигуна типу Д 810 потужністю 55 Вт. столи, що штабелюють, вантажопідйомністю 30 тонн приводяться двигуном типу Д 812 потужністю 75 кВт. На збиральних пристроях відбувається сортування металу по марках і розмірам. Готова продукція перевозиться кранами на склад.

## **1.2 Опис роботи механізму рольгангу**

Рольганг № 9 перед ножицями обтискного стану 1250 призначений для транспортування прокачених блюмсов і слябів до ножиць.

Розсувні лінійки призначені для напрямку прокачаних блюмсів і слябів на порізку й забезпечення перпендикулярності різа.

Рольганг складається із привода, розподільного редуктора, холостої рами, роликів, зубчастих муфт, розсувних лінійок.

Від електродвигуна обертання передається через зубчасту муфту на редуктор. Вихідний вал редуктора зв'язує один з роликів рольганга, який за допомогою косозубих шестерн передає обертання на інші сім роликів.

Ролики – цільнокованні. Діаметр 1-го ролика від ножиців на 20 мм менше – для зниження ударів по підшипниках при різках.

Розсувні лінійки перед ножицями складаються з: привода, коробка лінійок, зубчастих рейок, власне лінійок.

Привод складається із двох приводних вузлів.

Кожна лінійка приводиться в рух самостійно. Приводний вузол складається з рами, редуктора, еластичної муфти.

Коробки лінійок розташовані попарно. У кожній коробці дві шестерні зачіпаються із зубчастими рейками. Верхні шестерні з'єднані зубчастими муфтами з редуктором, нижні шестерні між собою з'єднуються проміжним валом. Ліва нижня шестерня з'єднується з редуктором зубчастою муфтою.

Кожна лінійка насаджена на дві самостійні рейки. Рейки переміщуються на катках, які обертаються по напрямних, розташованих на траверсах рольгангів.

Кожна лінійка складається із двох частин. Передня частина рухлива (направляє метал). Один кінець цієї частини лінійки посаджений обертально на цапфі, установленій на рольгангу, другий кінець з'єднаний з основною частиною лінійки.

Ролики рольганга приводяться в рух через розподільний редуктор і шафу редуктора двигуном постійного струму. Якір двигуна живиться від тиристорного перетворювача. Ланцюгзбудженняживиться від постійної мережі. Температура двигуна спостерігається вбудованими термісторами в механізмі.

### 1.3 Технічні дані механізму рольгангу

Привод рольганга груповий, працюючий без режиму реверсу. Привод працює зі змінною або постійною швидкістю. У таблиці 1.1 наведені основні параметри й характеристики рольганга перед ножицями.

Таблиця 1.1 – Технічні дані рольгангу

<b>Найменування й розмірність параметра</b>	<b>Значення параметра</b>
Перетин слябів максимальний, мм	350× 1250
Перетин блюмсів максимальний, мм	400× 400
Вага заготовки максимальна, т	21
Довжина заготовки максимальна, м	19,2
Максимальна лінійна швидкість на бочці ролика, м/с	2
Цикл прокатки, з	60
Число секцій рольганга, шт	1
Число роликів кожної секції, шт	8
Діаметр ролика, мм	450
Довжина бочки ролика, мм	1700
Крок роликів, мм	1000
Маса ролика, кг	950
Діаметр шийки ролика, мм	240
Передаточне число циліндричного одноступінчатого редуктора	5
ККД редуктора	0,93
Момент інерції механізму, кг·м <sup>2</sup>	27,6
Момент інерції злитка, кг·м <sup>2</sup>	24,8
Час розгону, з	1
Припустимий час відпрацювання (сума часу пуску й гальм.), с	2
Тривалість включення, %	80



На рольгангу встановлений двигун постійного струму серії SHC16B1, 112 кВт, 440 В, 290 А, 460 об/хв. збудження двигуна – незалежне (160 В, 11,9 А).

На рис. 1.1 наведена кінематична схема рольганга перед ножицями.

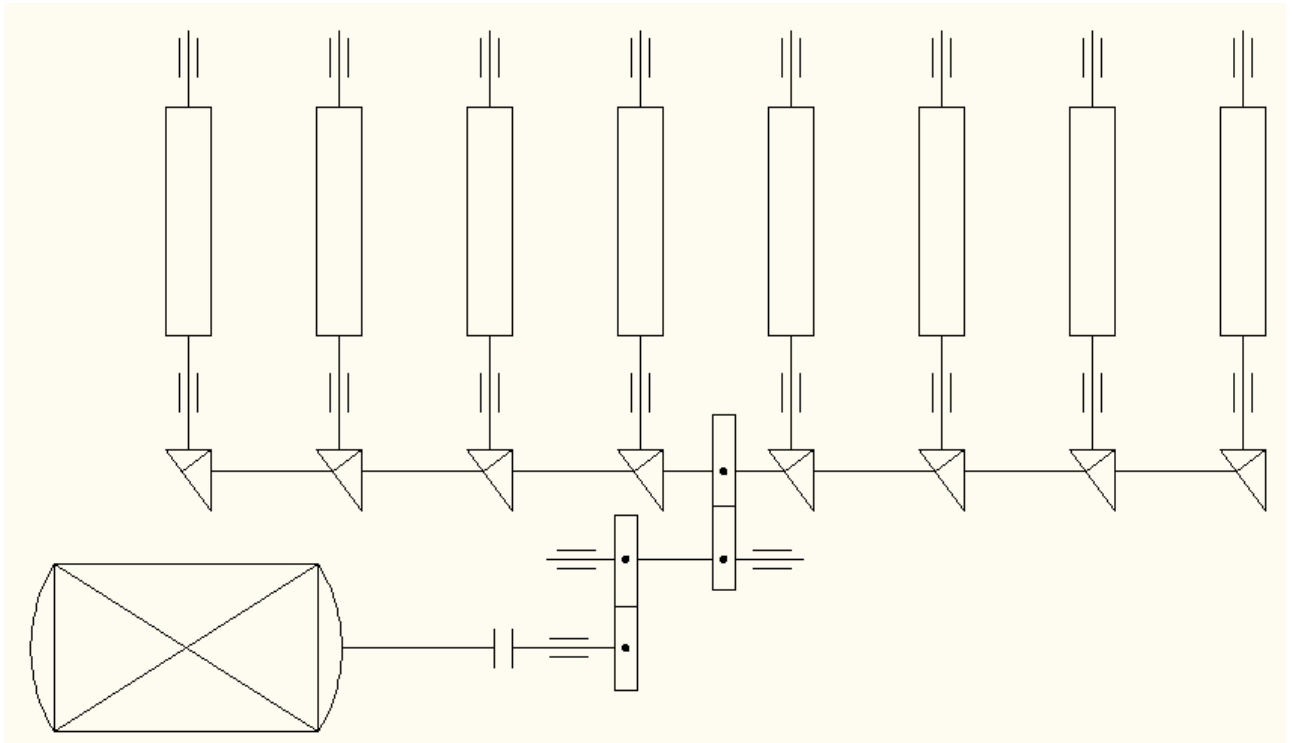


Рисунок 1.1 – Кінематична схема рольганга №9 перед ножицями  
обтискного стану 1250

#### 1.4 Вимоги до електроприводу рольгангу перед ножицями обтискного стану 1250

Рольганг перед ножицями працює в повторно-короткочасному режимі, при цьому число включень у годину становить 360-450 і тривалість включень ПВ=80 %.

Для забезпечення необхідних технологічних режимів роботи й високої продуктивності стану, електропривод рольганга повинен задовольняти основні вимоги:

- час протікання перехідних процесів при заданих значеннях динамічного струму повинне бути мінімальним;
- забезпечувати часті пуски й гальмування;
- забезпечувати необхідний діапазон регулювання швидкості;

- величина прискорення не повинна залежати від швидкості, до якої розганяє двигун;
- мати високу перевантажувальну здатність приводного двигуна по струму й моменту;
- забезпечувати високу надійність роботи системи;
- система керування електроприводом повинна забезпечувати зручності введення керуючих впливів з боку системи автоматики при малій потужності цих впливів.

## 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА РОЛЬГАНГУ ПЕРЕД НОЖИЦЯМИ

### 2.1 Розрахунки моментів статичних опорів

При розрахунках навантаження електродвигунів рольгангів у різних режимах роботи необхідно визначити наступні статичні моменти:

- момент холостого ходу  $M_X$ ;
- момент транспортування металу по роликах  $M_{TP}$ ;
- момент буксування роликів про метал  $M_B$ .

Момент холостого ходу роликів, приведений до вала двигуна

$$M_X = \frac{9,81 \cdot m_p \cdot Z_p \cdot d_{III} \cdot \mu_{III}}{2 \cdot i \cdot \eta_X} \text{ Нм}, \quad (2.1)$$

де  $m_p$  – маса одного ролика, кг;

$Z_p$  – кількість роликів;

$d_{III}$  – діаметр шийки ролика, м;

$\mu_{III}$  – коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках ролика;

$i$  – передаточне число редуктора;

$\eta_x$  – ККД редуктора при холостому ході.

ККД редуктора при холостому ході приймаємо 0,5 від номінального ККД ( $\eta_H$ ):

$$\eta_X = 0,5 \cdot \eta_H = 0,5 \cdot 0,93 = 0,465. \quad (2.2)$$

Тоді

$$M_X = \frac{9,81 \cdot 2122 \cdot 8 \cdot 0,24 \cdot 0,01}{2 \cdot 5 \cdot 0,465} = 85,97 \text{ Нм}$$

Момент транспортування металу по роликах:

$$M_{TP} = \frac{9,81 \cdot m_m \cdot \left( \frac{d_{ш}}{2} \cdot \mu_{ш} + f \cdot 10^{-2} \right)}{2 \cdot i \cdot \eta} \text{ Нм}, \quad (2.3)$$

де  $m_m$  – маса металу, припадаюча на секцію рольганга, що приводиться даним двигуном, кг;

$f$  – коефіцієнт тертя катання металу по роликах;

$\eta$  – ККД редуктора при транспортуванні металу по роликах приймається рівним  $\eta = \eta_x = 0,5 \cdot \eta_H$ , що пояснюється незначним навантаженням на привод у порівнянні з навантаженням холостого ходу.

Надалі розрахунки наведені для максимальної маси металу, припадаючої на секцію рольганга.

$$M_{TP} = \frac{9,81 \cdot 11000 \cdot \left( \frac{0,24}{2} \cdot 0,01 + 0,15 \cdot 10^{-2} \right)}{2 \cdot 5 \cdot 0,465} = 62,66 \text{ Нм}$$

Повний статичний момент при транспортуванні

$$M_{СТ.макс} = M_X + M_{TP} \text{ Нм} \quad (2.4)$$

$$M_{СТ.макс} = 85,97 + 62,66 = 148,63 \text{ Нм.}$$

Двигуни рольгангів перед ножицями повинні забезпечувати момент, достатній для пробуксовки роликів об метал.

Момент буксування, приведений до валу двигуна

$$M_B = \frac{9,81 \cdot m_m \cdot D_P \cdot \mu_B}{2 \cdot i \cdot \eta_H} \quad (2.5)$$

де  $D_P$  – діаметр бочки ролика;

$\mu_B$  – коефіцієнт тертя при буксуванні.

$$M_B = \frac{9,81 \cdot 11000 \cdot 0,45 \cdot 0,3}{2 \cdot 5 \cdot 0,93} = 1566,44 \text{ Нм}$$

Статичний момент при буксуванні:

$$M_{C.B} = M_X + M_B \quad (2.6)$$

$$M_{C.B} = 85,97 + 1566,44 = 1652,41 \text{ Нм}$$

Необхідна швидкість двигуна максимальна

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot V_{P.\max} \cdot i}{D_P} \quad (2.7)$$

де  $V_{P.\max}$  – максимальна окружна швидкість на бочці ролика.

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 5}{0,45} = 44,44 \text{ с}^{-1}.$$

Необхідна швидкість двигуна мінімальна:

$$\omega_{\min} = \frac{2 \cdot V_{P.\min} \cdot i}{D_P} \quad (2.8)$$

де  $V_{P.\min}$  – мінімальна окружна швидкість на бочці ролика.

$$\omega_{\min} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 5}{0,45} = 11,11 \text{ с}^{-1}$$

Знаючи необхідні максимальну й мінімальну швидкості двигуна, знайдемо діапазон регулювання швидкості двигуна

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{44,44}{11,11} = 4 \quad (2.9)$$

Момент інерції на валу електродвигуна:

- момент інерції роликів

$$J'_{\text{рол}} = \frac{m_P \cdot D_P^2 \cdot n}{8 \cdot i^2} \quad (2.10)$$

де  $n=8$  – кількість роликів.

$$J'_{рол} = \frac{2122 \cdot 0,45^2 \cdot 8}{8 \cdot 5^2} = 17,192 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

- момент інерції сляба

$$J'_{сл} = \frac{m_{с.мак}}{2 \cdot j^2} \quad (2.11)$$

де  $m_{с.мак}$  – максимальна маса злитка, 21000 кг;

$j$  – спрямляюче число.

$$j = \frac{\omega_{макс}}{V_{р.мак}} = \frac{44,44}{2} = 22,22 \text{ м}^{-1} \quad (2.12)$$

$$J'_{сл} = \frac{21000}{2 \cdot 22,22^2} = 21,262 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

- момент інерції редуктора й трансмісійного валу із шестірнями

$$J'_{мех} = 0,15 \cdot J'_{рол} = 0,15 \cdot 17,192 = 2,579 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (2.13)$$

- сумарний момент інерції з урахуванням сляба

$$\Sigma J_1 = J'_{рол} + J'_{сл} + J'_{мех} \quad (2.14)$$

$$\Sigma J_1 = 17,192 + 21,262 + 2,579 = 41,033 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

- сумарний момент інерції без урахування сляба

$$\Sigma J_2 = J'_{рол} + J'_{мех} \quad (2.15)$$

$$\Sigma J_2 = 17,192 + 2,579 = 19,77 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

При розрахунках електроприводів рольгангів становить інтерес визначення так званого гранично-виправданого моменту на валу двигуна, тобто такого максимального пускового або гальмового моменту, при якому рух смуги, що транспортується, відбувається без пробуксовки.

Гранично-виправданий момент при прискоренні

$$M_{П.О.У} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot i \cdot \mu_B}{D_P} \Sigma J_1 + M_{СТ.мин} \quad (2.16)$$

де  $M_{СТ.мин}$  – повний мінімальний статичний момент при транспортуванні.

$$M_{ТР.мин} = \frac{9,81 \cdot m_{с.мин} \cdot \left( \frac{d_{ш}}{2} \cdot \mu_{ш} + f \cdot 10^{-2} \right)}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (2.17)$$

$$M_{ТР} = \frac{9,81 \cdot 1500 \cdot \left( \frac{0,24}{2} \cdot 0,01 + 0,15 \cdot 10^{-2} \right)}{2 \cdot 5 \cdot 0,465} = 8,544 \text{ Нм}$$

$$M_{СТ.мин} = M_X + M_{ТР.мин} \quad (2.18)$$

$$M_{СТ.мин} = 85,97 + 8,544 = 94,51 \text{ Нм}$$

Тоді

$$M_{П.О.У} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 0,3}{0,45} 41,033 + 94,51 = 2778,07 \text{ Нм}$$

Гранично-виправданий момент при уповільненні

$$M_{П.О.З} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot i \cdot \mu_B}{D_P} \Sigma J_1 - M_{СТ.макс} \quad (2.19)$$

$$M_{П.О.З} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 0,3}{0,45} 41,033 - 148,63 = 2534,93 \text{ Нм.}$$

Необхідний момент інерції електродвигуна при  $i = i_{онт}$

$$J_{Д.треб} = J_M' = 19,77 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.20)$$

Сумарній момент інерції привода

$$J_{\Sigma} = J_{Д.треб} + J_M' = 19,77 + 19,77 = 39,54 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

Перевантажувальна здатність двигуна, гарантуюча його роботу без перегріву:

$$\lambda = \sqrt[4]{1/2 \cdot \varepsilon^2} = \sqrt[4]{1/2 \cdot 0,8^2} = 0,94 \quad (2.22)$$

де  $\varepsilon$  – відносна тривалість включення (ПВ=100%).

Знайдемо необхідний динамічний момент двигуна

$$M_{\text{дин.треб}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{макс}}}{\Delta t / 2} \quad (2.23)$$

$$M_{\text{дин.треб}} = 39,54 \frac{44,44}{2/2} = 1757,37 \text{ Нм}$$

Необхідний момент двигуна з урахуванням статичного навантаження:

$$M_{\text{треб}} = M_{\text{дин.треб}} + M_{\text{СТ.макс}} \quad (2.24)$$

$$M_{\text{треб}} = 1757,37 + 148,63 = 1906 \text{ Нм}$$

Необхідний номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{Н.треб}} = M_{\text{треб}} / \lambda = 1906 / 0,94 = 2027,34 \text{ Нм} \quad (2.25)$$

Необхідна номінальна потужність двигуна:

$$P_{\text{Н.треб}} = M_{\text{Н.треб}} \cdot \omega_{\text{макс}} = 2027,34 \cdot 44,44 = 90103 \text{ кВт} \quad (2.26)$$

На рольгангу перед ножицями встановлений двигун постійного струму серії SHC16B1, 112 кВт, 440 В, 290 А, 460 об/хв. Збудження двигуна – незалежне (160 В, 11,9 А).

В даному дипломного проекту виберемо замість двигуна SHC16B1 двигун постійного струму серії Д814, дані якого наведено в таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 – Номінальні дані електродвигуна Д814

Найменування	Величина
Номінальна потужність двигуна $P_{HD}$ , кВт	110
Номінальна напруга двигуна $U_{HD}$ , В	440
Номінальний струм двигуна $I_{HD}$ , А	274
Номінальна частота обертання $n_H$ , об/хв.	490
Магнітний потік полюса корисний $\Phi$ , мВб	83,7
Опір обмотки якоря й додаткових полюсів $r_{я} + r_{дп}$ , Ом	0,0805
Опір обмотки збудження $r_B$ , Ом	35,2
Число активних провідників якоря N	608
Число паралельних галузей якоря $2a$	8
Номінальний струм порушення $I_{HB}$ , А	6,25
Момент інерції якоря $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	10,25
Кількість полюсів $2p$	4
Опір стабілізуючої обмотки $r_{CO}$ , Ом	0,002

## 2.2 Перевірка двигуна по завантаженню

Перевіряємо обраний двигун за допомогою розрахунків його теплового завантаження. Для початку проведемо уточнений розрахунок, з урахуванням моменту інерції двигуна.

Сумарний момент інерції системи:

$$J_{\Sigma 1} = J_{дв} + J_M' = 10,25 + 19,77 = 30,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (2.27)$$

де  $J_{дв}$  – момент інерції двигуна;

$J_M'$  – момент інерції механізму.

Момент динамічний необхідний:

$$M_{\text{дин.треб1}} = J_{\Sigma 1} \frac{\omega_{\text{макс}}}{\Delta t / 2} \quad (2.28)$$

$$M_{\text{дин.треб1}} = 30,02 \frac{44,44}{2 / 2} = 1334,24 \text{ Нм}$$

Необхідний момент двигуна з урахуванням статичного навантаження:

$$M_{\text{треб1}} = M_{\text{дин.треб1}} + M_{\text{СТ.макс}} \quad (2.29)$$

$$M_{\text{треб1}} = 1334,24 + 148,63 = 1482,87 \text{ Нм}$$

Необхідний номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{Н.треб1}} = \frac{M_{\text{треб1}}}{\lambda} = \frac{1482,87}{0,94} = 1577,27 \text{ Нм} \quad (2.30)$$

Необхідна номінальна потужність двигуна:

$$P_{\text{Н.треб1}} = M_{\text{Н.треб1}} \cdot \omega_{\text{макс}} = 1577,27 \cdot 44,44 = 70093 \text{ Вт} \quad (2.31)$$

Виходячи з уточненого розрахунку, знайдемо коефіцієнт теплового завантаження двигуна:

$$k_{\text{ТЗ}} = \frac{P_{\text{Н.треб1}}}{P_{\text{Н.треб}}} = \frac{70093}{90103} = 0,78 \quad (2.32)$$

Як видно з формули, коефіцієнт теплового завантаження двигуна лежить у припустимих межах, отже двигун задовольняє вимогам технологічного процесу. Трохи завищена потужність дозволить мати резерв при збільшенні продуктивності прокатного стану.

### 2.3 Час керування електроприводом

Час розгону й гальмування електропривода рольганга відповідно:

$$t_{\text{П}} = \frac{\Sigma J \cdot \omega_{\text{н}}}{M_{\text{П}} - M_{\text{С}}} \quad (2.33)$$

$$t_T = \frac{\Sigma J \cdot \omega_H}{M_{II} + M_C} \quad (2.34)$$

де  $M_{II}$  – середній пусковий момент електродвигуна (для розгону рольганга без буксування роликів по заготовці необхідно, щоб пусковий момент не перевищував гранично-виправданого моменту при прискоренні  $M_{II.0.B} = 2778,07$  Нм, для подальших розрахунків приймаємо  $M_{II} = 1,2 M_H = 2573$  Нм);

$M_T$  – середній гальмовий момент електродвигуна, який не повинен перевищувати гранично-виправданого моменту при уповільненні  $M_{II.0.3} = 2534,93$  Нм (для подальших розрахунків приймаємо  $M_T = 1,1 M_H = 2358$  Нм);

$\omega_H = 51,3$  1/с – встановлена швидкість обертання двигуна при транспортуванні заготовки;

$M_C$  – статичний момент навантаження на валу двигуна (при розгоні вхолосту  $M_C = M_X$ , при розгоні або гальмуванні рольганга із заготовкою  $M_C = M_{CT.макс}$ , при гальмуванні, коли заготовка буксує об упор ножиць  $M_C = M_{C.Б}$ );

$\Sigma J$  – сумарний момент інерції на валу електродвигуна (при розгоні в холосту  $\Sigma J = 19,77$  кг·м<sup>2</sup>, при розгоні або гальмуванні рольганга із заготовкою  $\Sigma J = 30,91$ ).

Розрахунки всіх часів і моментів був зроблений у додатку Mathcad 14. Результати розрахунків наведені в таблиці 2.2.

На рис. 2.1 – 2.4 наведені тахограми й навантажувальні діаграми роботи електропривода рольганга (див. табл. 2.2) за цикл роботи обтискного стану, а також для декількох із пропусків.

З даних таблиці 2.2 вираховуємо час циклу й час включення.

Час циклу:

$$t_{II} = \Sigma t_{II} + \Sigma t_Y + \Sigma t_T + \Sigma t_{ПАВЗЫ} \quad (2.35)$$

$$t_{II} = 5,31 + 4,14 + 5,45 + 40 = 54,9 \text{ с}$$

Час включення:

$$\Sigma t_{BKЛ} = \Sigma t_{II} + \Sigma t_{y} + \Sigma t_{T}$$

$$\Sigma t_{BKЛ} = 5,31 + 4,14 + 5,45 = 14,9 \text{ с}$$

Таблиця 2.2 – Розрахунки часу роботи електропривода рольганга

№ пропуску	Розгін			Сталий рух		Гальмування			Пауза
	$M_{II} = 1,2M_H = 2573$ Нм			$M_T = 1,1M_H = 2358$ Нм					
	J, кг·м <sup>2</sup>	M <sub>с</sub> , Нм	t <sub>п</sub> , з	M <sub>с</sub> , Нм	t <sub>y</sub> , з	J, кг·м <sup>2</sup>	M <sub>с</sub> , Нм	t <sub>T</sub> , з	t <sub>ПАУЗЫ</sub> , з
1	19,77	85,97	0,41	0	0	30,91	148,63	0,63	4
2	30,91	148,63	0,65	1652,41	0,36	30,91	148,63	0,63	4
3	29,68	141,74	0,63	1480,10	0,38	29,68	141,74	0,61	4
4	28,46	134,84	0,6	1307,79	0,41	28,46	134,84	0,59	4
5	27,23	127,95	0,57	1135,48	0,43	27,23	127,95	0,56	4
6	26	121,06	0,54	963,17	0,46	26	121,06	0,54	4
7	24,78	114,17	0,52	790,87	0,48	24,78	114,17	0,51	4
8	23,56	107,27	0,49	618,56	0,51	23,56	107,27	0,49	4
9	22,33	100,38	0,46	446,25	0,54	22,33	100,38	0,47	4
10	21,12	93,49	0,44	273,94	0,57	19,77	85,97	0,42	4
Σ	Σ t <sub>II</sub> = 5,31 с			Σ t <sub>y</sub> = 4,14 с		Σ t <sub>T</sub> = 5,45 с			Σ t <sub>ПАУЗЫ</sub> = 40 с

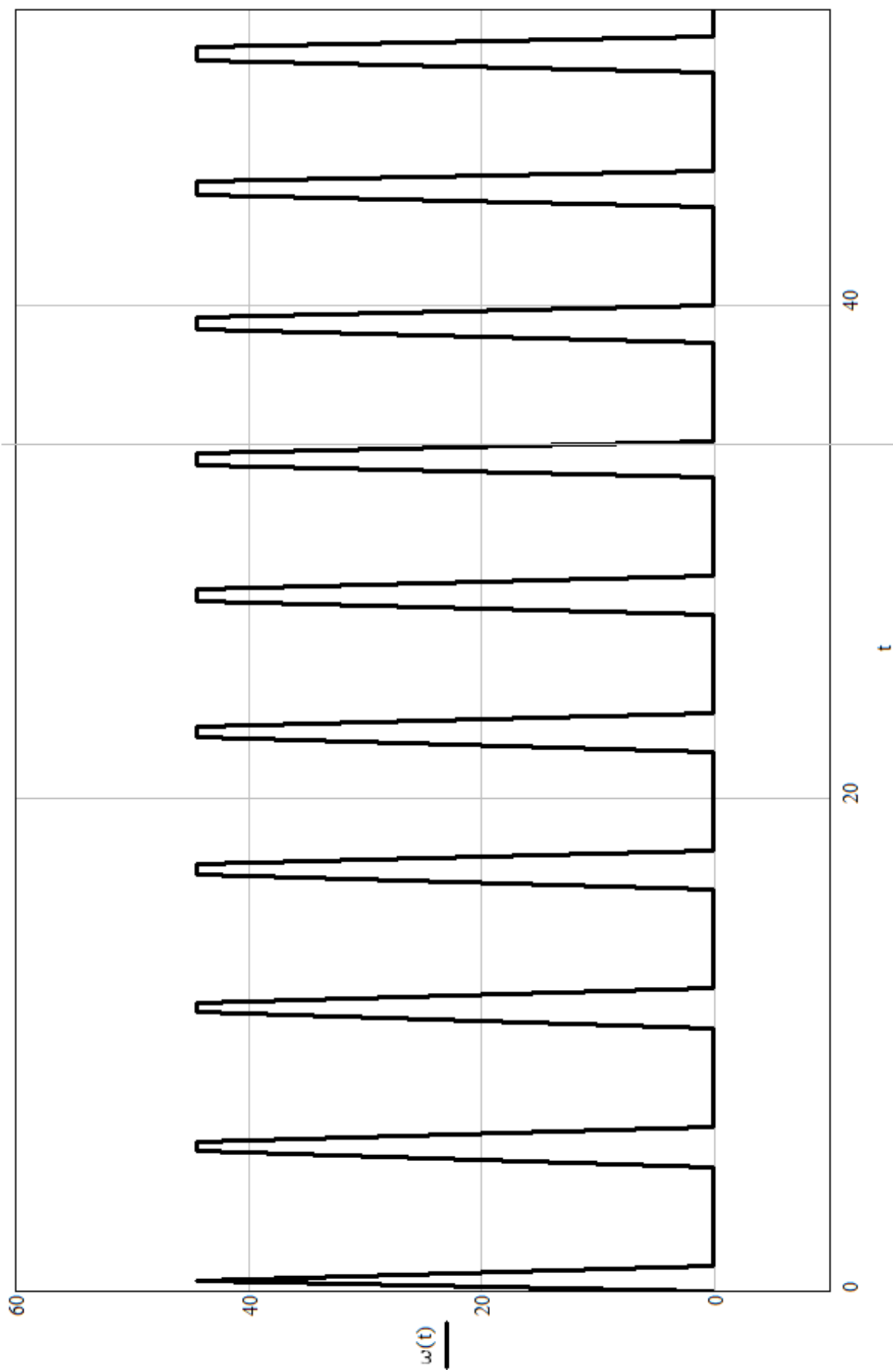


Рисунок 2.1 – Тахограма роботи електропривода ролганга перед ножицями за цикл роботи обтискного стану 1250

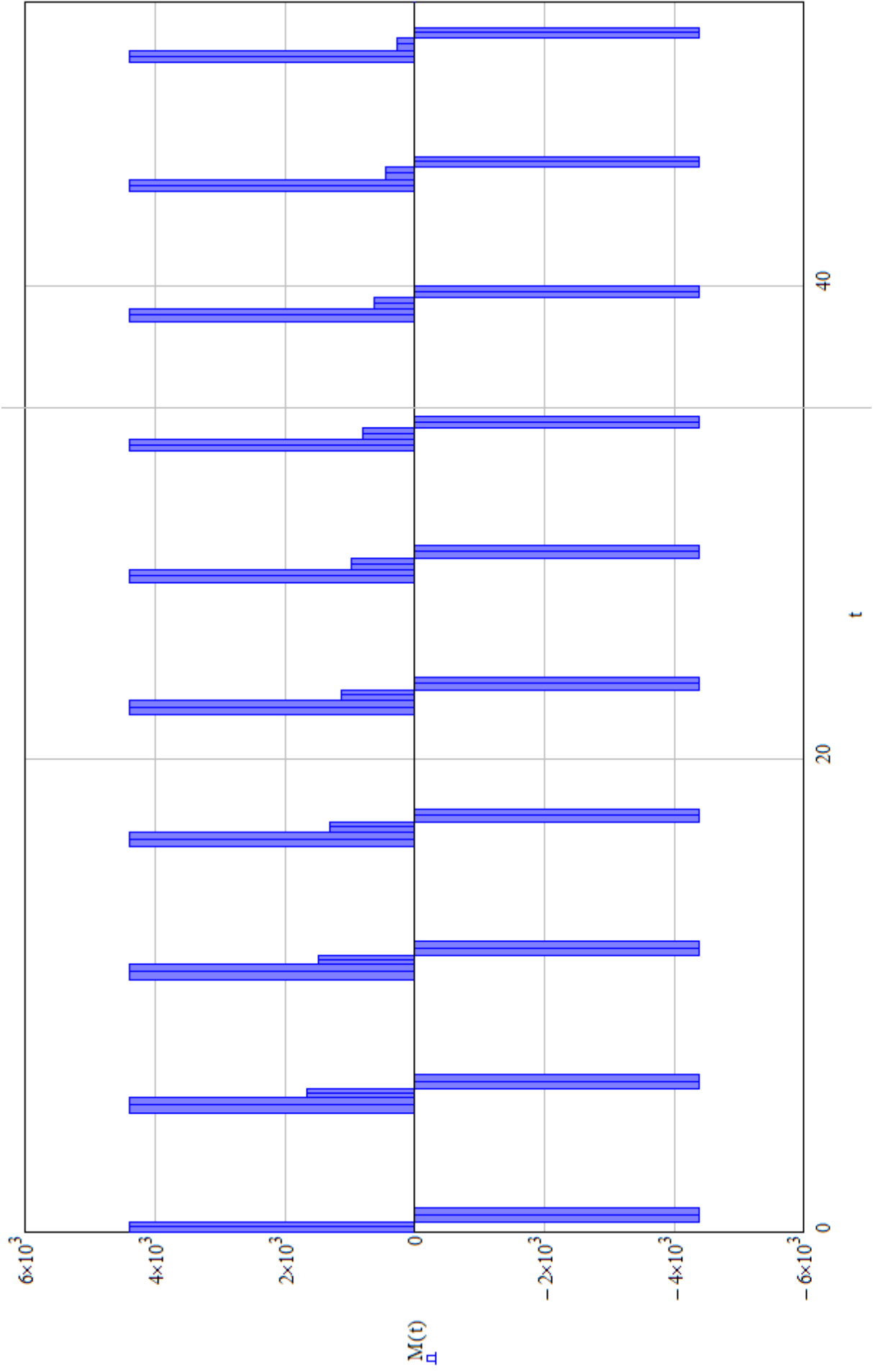
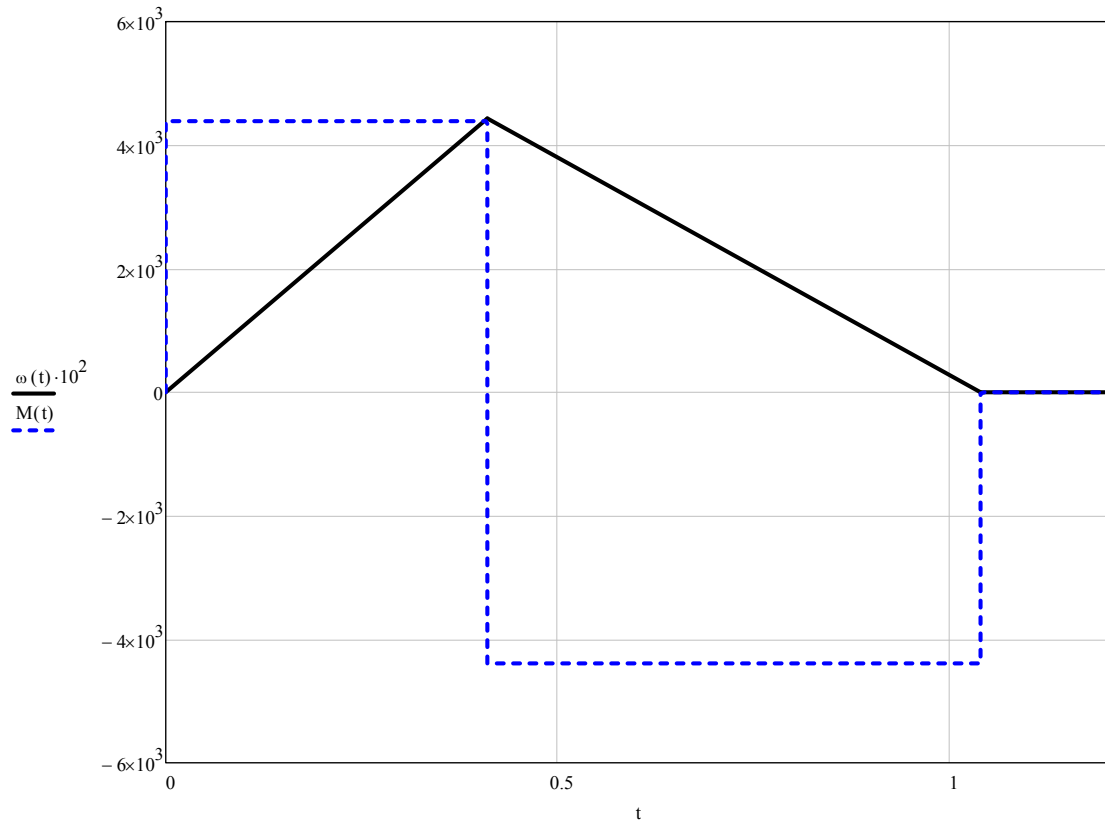
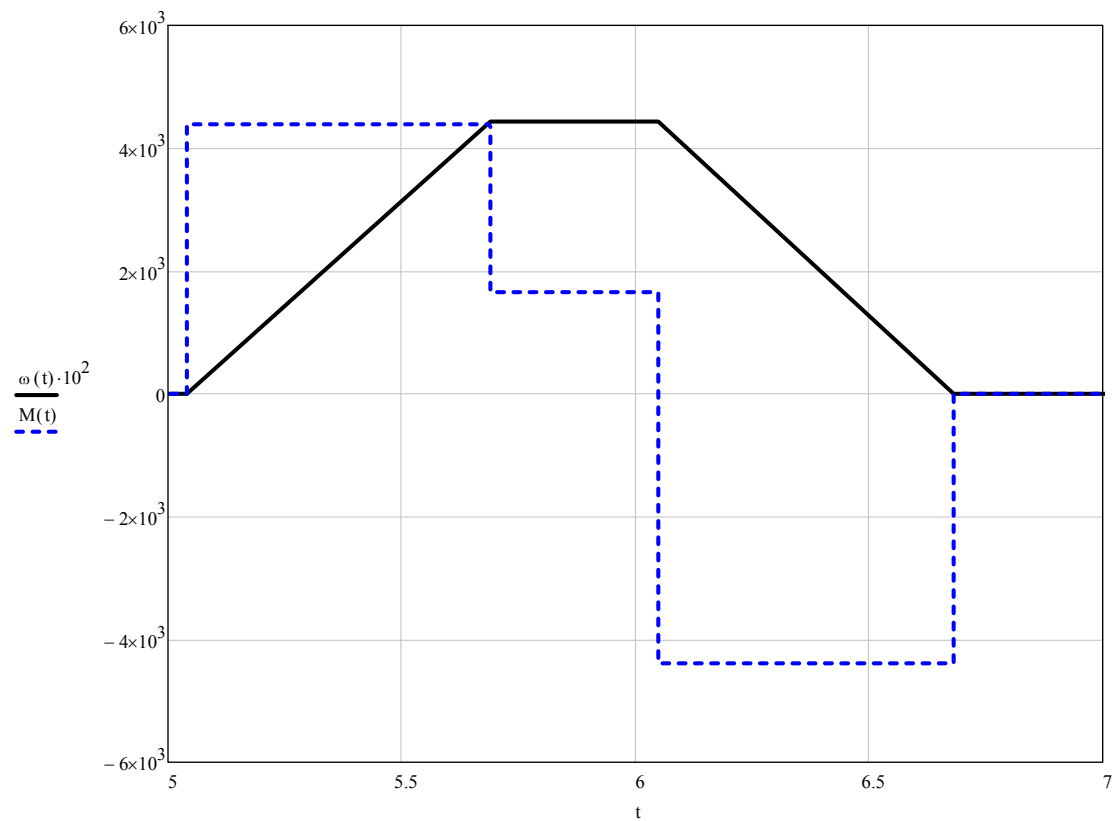


Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма роботи ЕП ролганга перед ножицями за цикл роботи обтискного стану 1250

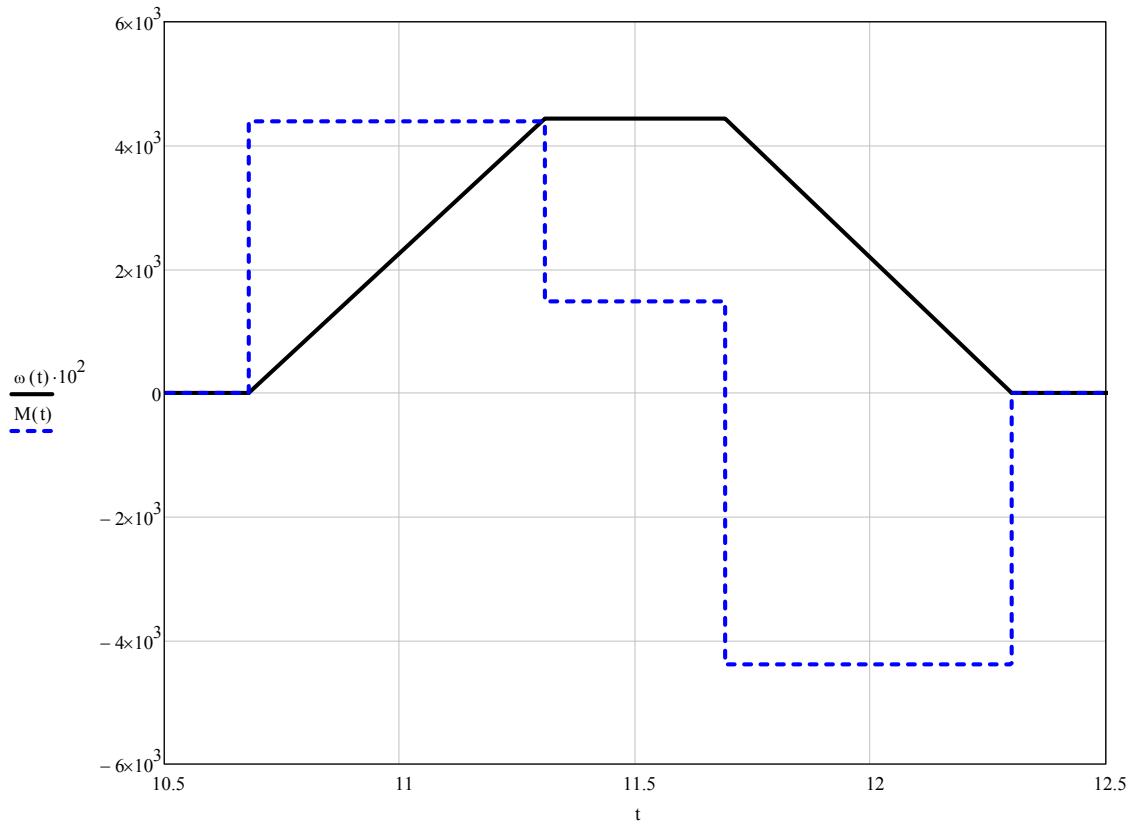


перший пропуск

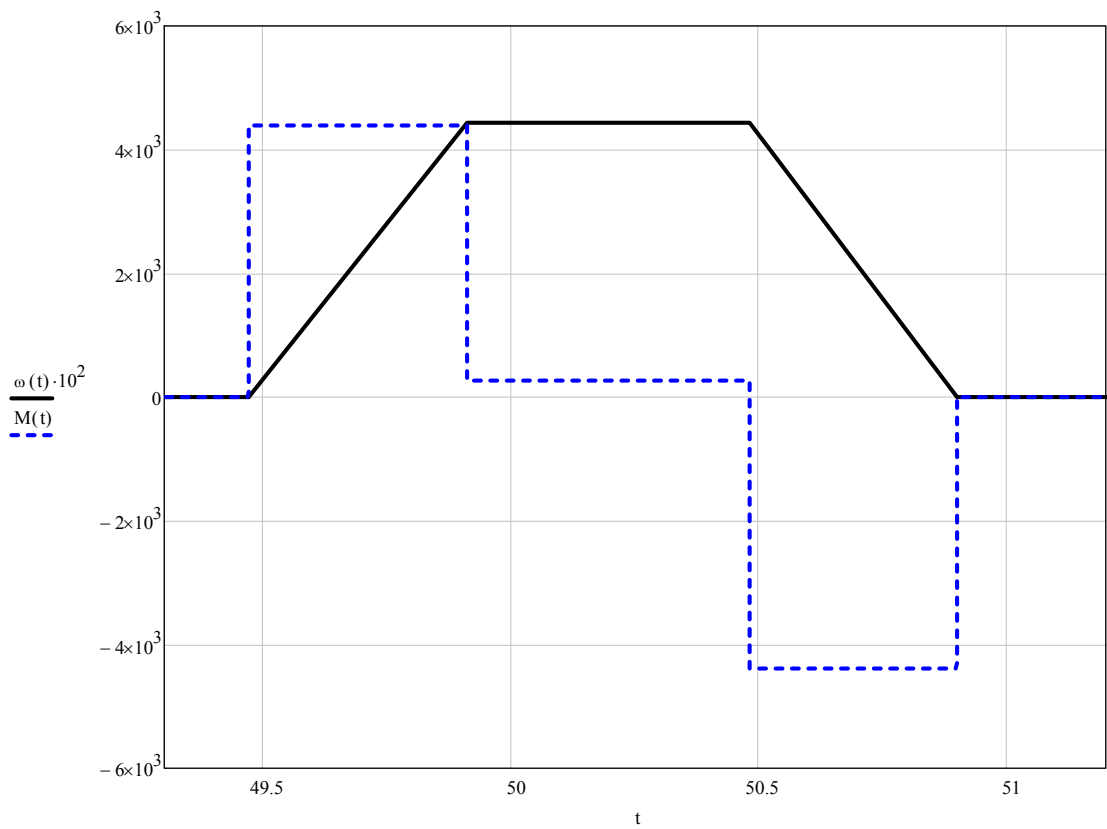


другий пропуск

Рисунок 2.3 – Тахограми й навантажувальні діаграми роботи електроприводу рольганга перед ножицями обтискного стану 1250



третій пропуск



десятий пропуск

Рисунок 2.4 – Тахограми й навантажувальні діаграми роботи електропривода рольганга перед ножицями обтискного стану 1250



## 2.4 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріванню

Перевірку двигуна по нагріванню проведемо методом еквівалентних величин [2]. Для роботи електродвигуна без перегріву повинна виконуватися умова:

$$M_H(I_H) \geq M_{\text{Э}}(I_{\text{Э}}) \quad (2.37)$$

Визначаємо еквівалентний момент електродвигуна

$$M_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{M_{\text{П}}^2 \Sigma t_{\text{П}} + M_{\text{Т}}^2 \Sigma t_{\text{Т}} + M_{\text{СТ}}^2 t_{\text{Y10}} + M_{\text{С.Б}}^2 \cdot (\Sigma t_{\text{Y}} - t_{\text{Y10}})}{\frac{1+\beta}{2} \cdot (\Sigma t_{\text{П}} + \Sigma t_{\text{Т}}) + \Sigma t_{\text{Y}}}} \quad (2.38)$$

де  $\beta = 0,5$  – коефіцієнт погіршення умов охолодження двигуна в періоди пауз [2].

$$M_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{2573^2 \cdot 5,31 + 2358^2 \cdot 5,45 + 148,63^2 \cdot 0,57 + 1652,41^2 \cdot 3,57}{\frac{1+0,5}{2} \cdot (5,31 + 5,45) + 4,14}} = 2481,58 \text{ Нм}$$

Визначимо фактичну тривалість включення електродвигуна за цикл роботи:

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{\sum t_{\text{ВКЛ}}}{t_{\text{Ц}}} = \frac{14,9}{54,9} = 0,3 \quad (2.39)$$

Визначимо еквівалентний момент двигуна, наведений до стандартного значення ПВ = 100%.

$$M_{\text{Э100}} = M_{\text{Э}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\Phi}}{\varepsilon_{\text{СТ}}}} = 2481,58 \sqrt{\frac{0,3}{1}} = 1359,22 \quad (2.40)$$

Припустимий момент двигуна із примусовою вентиляцією дорівнює  $0,9M_{\text{Н}}$ .

Отже

$$0,9M_{\text{Н}} = 1929,6 \geq M_{\text{Э100}} = 1359,22 \text{ Нм} \quad (2.41)$$

З формули (2.41) видно, що обраний двигун проходить по нагріванню, тому остаточно приймаємо його до установки.

## **3 ВИБІР СИЛОВОЇ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ РОЛЬ ГАНГА ПЕРЕД НОЖИЦЯМИ**

### **3.1 Вибір та обґрунтування силової частини системи та способу керування електроприводом**

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

Система Г-Д має гарні регульовальні властивості, порівняно невисоку питому вартість і більшим терміном служби. Основною перевагою цієї системи є високий коефіцієнт потужності, крім того, при роботі системи Г-Д не спотворюється форма напруги живильної мережі змінного струму.

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

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

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

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

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

– високий ККД, тому що втрати потужності на регулюючому елементі

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

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

Разом з тим ШПП властиві й недоліки:

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

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

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

- відсутність обертових частин, безшумність у роботі;
- більш високі швидкодія й ККД (ККД системи ТП-Д становить 0,96 ... 0,98, системи Г-Д – 0,76 ... 0,84);
- більш висока точність регулювання завдяки відсутності інерції, що часто забезпечує механізм більшою продуктивністю і високою якістю продукції;

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

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

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

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

- викривлення форми напруги живильної мережі в результаті комутаційних процесів у ТП, що несприятливо позначається на роботі інших електроустановок, що живляться від цієї мережі, а також на роботі самого ТП, оскільки нерідко сіткова напруга використовується в якості опорного.

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

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

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

При застосуванні паралельної корекції підвищується стабільність характеристик системи за рахунок ланок, охоплених зворотним зв'язком. Вплив

перешкод на коригувальний пристрій, включених в ланцюг зворотного зв'язку, значно менше, чим при включенні його в прямий канал системи, оскільки сигнал знімається з виходу системи, що представляє собою фільтр низьких частот.

Основними недоліками паралельної корекції є відносна складність розрахунків системи й більша трудомісткість настроювання. Контур, утворений зворотним зв'язком, може сам по собі виявитися нестійким, виникають також труднощі з підсумовуванням сигналів. Крім того, цю систему слід завжди розглядати як єдине ціле, тому що в більшості випадків зміна одного з параметрів вимагає перерахунку й перебудови всієї системи.

Системи з послідовною корекцією вигідно відрізняються від систем з паралельною корекцією, особливо при складних структурах об'єкта регулювання, великій кількості регульованих параметрів і високих вимогах до якості регулювання. Прості й зручні для практики способи розрахунків і настроювання контурів систем з послідовною корекцією дозволяють навіть при значних погрішностях у визначенні динамічних параметрів об'єкта регулювання одержати цілком працездатну систему керування електроприводом. Такі системи вводять в експлуатацію методом послідовного настроювання окремих контурів системи керування (на відміну від систем з паралельною корекцією). Більшою перевагою систем з послідовною корекцією є зручність обмеження кожного з регульованих параметрів на заданому рівні.

Створення практично без інерційних тиристорних і транзисторних перетворювачів з малою потужністю керування й операційних підсилювачів постійного струму, застосовуваних у якості активних коригувальних ланок, забезпечило широке впровадження систем з послідовною корекцією для керування практично всіма видами металургійного електропривода постійного струму.

САУ з послідовною корекцією розбивається на ряд контурів, число яких дорівнює числу регульованих параметрів системи. Параметрами регулювання можуть бути: напруга перетворювача, сила струму в головному ланцюзі,

швидкість електродвигуна, кутове або лінійне положення робочого механізму, натяг металу, що прокочується, і ін.

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

### **3.2 Вибір комплектного тиристорного електропривода й силового трансформатора**

Приводи постійного струму найчастіше призначені вирішувати завдання економного використання з перевагами відносно надійності, комфортабельного керування й споживчих якостей. Приводи постійного струму мають такі переваги, як:

- ощадливий режим 4Q;
- тривала робота й повний обертальний момент при малій швидкості обертання;
- високий пусковий момент;
- великий діапазон регулювання швидкості при постійній потужності;
- невелика площа, необхідна для установки;
- надійність.

Основними технічними даними комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм  $I_H$  і напруга  $U_H$ . Номінальний струм електропривода вибирається по струму тиристорного перетворювача й може бути більше номінального струму двигуна.

Номінальна напруга електропривода визначається номінальною напругою електродвигуна. Вона менше номінальної напруги ТП на 5-10 %, що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості й на безпечне інвертування при

зниженні напруги живильної мережі.

Дотримуючись наведених рекомендацій для живлення якірного ланцюга встановленого електродвигуна з каталогу вибираємо реверсивний комплектний тиристорний електропривод SIMOREG DC MASTER концерну Siemens шафового виконання серії 6RM7078-6DS02, дані якого наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні дані перетворювача SIMOREG DC MASTER 6RM7078-6DS02

Найменування параметра	Позначення й чисельне значення
Номінальна живильна 3х фазна напруга, В	$U_{H1\ TP} = 400$
Номінальний вхідний струм, А	$I_{H1\ TP} = 233$
Номінальна випрямлена (постійна) напруга, В	$U_{H\ TP} = 485$
Номінальний випрямлений (постійний) струм, А	$I_{H\ TP} = 280$
Номінальна потужність, кВт	$P_{H\ TP} = 136$
Номінальна напруга порушення, В	$U_{B\ TP} = 325$
Номінальний струм порушення, А	$I_{B\ TP} = 15$
Маса, кг	$m_{TP} = 220$

SIMOREG DC MASTER 6RM70 – перетворювачі з найвищою потужністю й інтегрованим інтелектом. Вони відрізняються найвищим ступенем безпеки й коефіцієнта використання.

Переваги SIMOREG DC MASTER 6RM70:

- високий ступінь інтеграції в будь-якому автоматизованому середовищі;
- можливість розширення завдяки модульній концепції;
- розв'язок завдань від стандартних до екстремальних;
- надлишкові характеристики привода до 12000 А завдяки

інтелектуальному паралельному розв'язку;

- номінальні напруги від 400 до 830 В;
- короткий і простий запуск в експлуатацію завдяки повністю електронному параметруванню всіх налаштувань;
- єдина філософія керування .

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

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

Параметрування перетворювача можна так само здійснювати через стандартний РС при використанні відповідного програмного забезпечення.

ЕОМ підключається до базового блоку за допомогою послідовного інтерфейсу. Цей інтерфейс використовується під час запуску, для збереження параметрів при вимиканні, а так само для діагностики під час роботи. Більше того, оновлене програмне забезпечення перетворювача можна завантажити через цей інтерфейс для зберігання в Flash пам'яті.

В одноквадрантних перетворювачах ланцюг якоря живиться від повністю керованого трифазного мосту, а в чотириквандрантних модулях – від двох повністю керованих трифазних мостів, включених паралельно. На



схему збудження живлення подається через однофазний напівкерований двохполуперіодний міст.

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

Шафа стандартно містить наступні компоненти:

- перетворювач SIMOREG DC MASTER 6RA70 із цифровою мікропроцесорною системою регулювання для ланцюга якоря й ланцюги порушення;

- головний вимикач (=D3-Q11);
- головний контактор (=D 3- ДО11);
- контактор збудження(=G 1- ДО11);
- автоматичний вимикач захисту двигуна;
- автомати захисту допоміжних ланцюгів;
- плавкі запобіжники;
- комутуючі дроселі;
- трансформатор напруги керування ;
- елементи індикації й керування ;
- сполучні клеми.

Однолінійна схема силової частини комплектного електропривода SIMOREG DC MASTER наведено на рис. 3.1, 3.2.

Силовий трансформатор у схемі керованого випрямляча застосовується для узгодження стандартної напруги мережі (~ 380 В; ~6 кВ; ~10 кВ) й напруги навантаження. Зменшення напруги на виході тиристорного перетворювача 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). Для підключення перетворювача до мережі вибираємо з [6] силовий перетворювальний двообмоточний трансформатор із природнім повітряним охолодженням при захищеному виконанні типу ТСЗП- - 400/10 УЗ, дані якого наведено в таблиці 3.2.

With SIMOREG DC MASTER 210 A and 280 A, 400 V

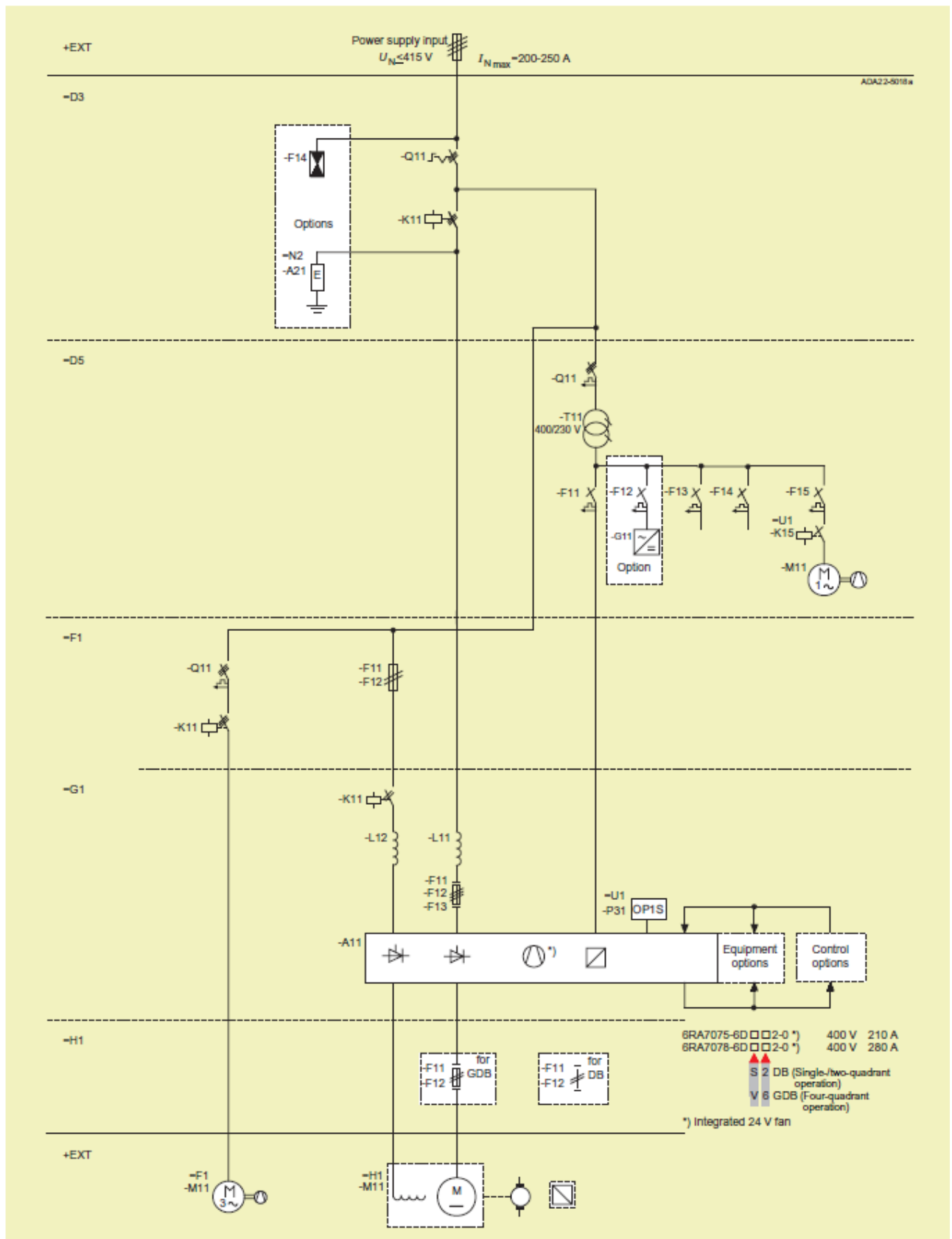


Рисунок 3.1 – Однолінійна схема силової частини комплектного електропривода SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

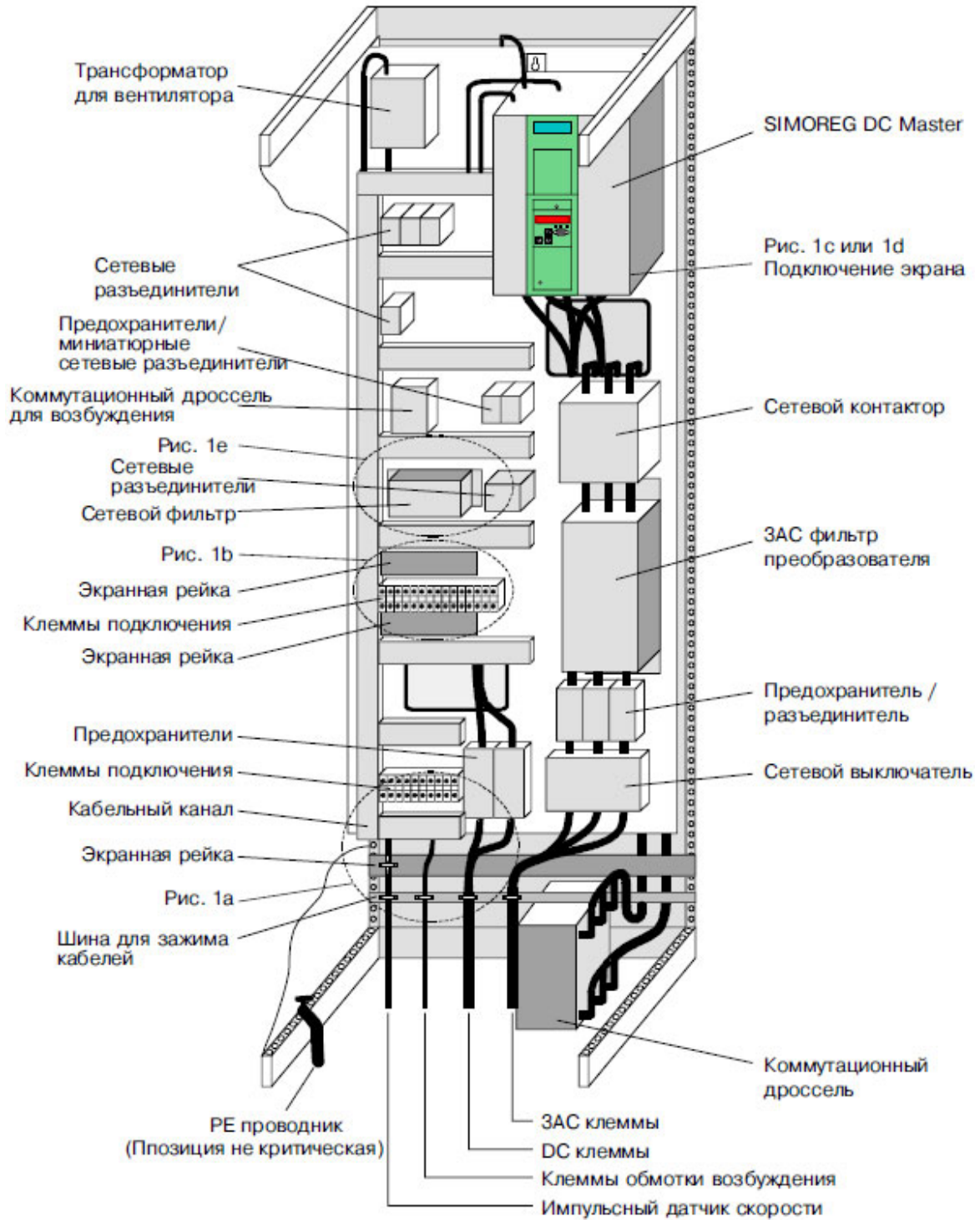


Рисунок 3.2 - Конструкция шкафа комплектного тиристорного электропривода SIMOREG DC MASTER серии 6RM70

Таблиця 3.2 - Технічні дані силового трансформатора ТСЗП-400/10У3 для живлення перетворювача

Найменування параметра	Позначення та значення
Первинна номінальна потужність, кВ·А розрахункове значення $S_{1н} = 1,045 \cdot 1,35 \cdot U_{2тр} \cdot I_{днтр} \cdot 10^{-3}$	$P_{тр} = 364$
Напруга живильної мережі (мережева обмотка), В	$U_{1тр} = 6000$
Номінальна випрямлена напруга (перетворювач), В	$U_{дн} = 460$
Номінальний випрямлений струм (перетворювач), А	$I_{днтр} = 630$
Вторинна лінійна напруга (вентильна обмотка) $U_{2лн}$ , В	$U_{2тр} = 409$
Вторинний лінійний струм (вентильна обмотка) $I_{2лн}$ , А розрахункове значення $I_{2тр} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{днтр}$	$I_{2тр} = 514$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{хх} = 1600$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{кз} = 4500$
Напруга короткого замикання, %	$U_{кз\%} = 5,3$
Струм холостого ходу, %	$I_{хх\%} = 2,5$

### 3.3 Вибір згладжувального дроселя

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

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

- забезпечення безперервності струму якоря двигуна в певному діапазоні

навантажень і частот обертання двигуна;

- обмеження амплітуди змінної складової струму якоря двигуна.

Нижче наведено розрахунок згладжує дроселя [11, приклад 1-24, 1-27].

Значення максимально випрямленої ЕРС (ідеальна випрямлена напруга; напруга на виході перетворювача):

$$E_{d0} = 1,35U_{2 \text{ тр}} = 1,35 \cdot 409 = 552,15 \text{ В} \quad (3.1)$$

де 1,35 - коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2 \text{ тр}}_{\text{тп}}$  - номінальну напругу на вторинній обмотці силового трансформатора, В.

Кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги:

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

де  $f_c$  - частота живильної мережі, Гц;  $m_\phi$  - число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний та повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр}}_{\text{тп}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{2 \text{ тр}}^2}{P_{\text{тр}}^2} = \frac{4500 \cdot 409^2}{(364 \cdot 10^3)^2} = 5,681 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{тр}}_{\text{тп}} = \frac{U_{\text{кз}\%} U_{2 \text{ тр}}}{100 I_{2 \text{ тр}} \sqrt{3}} = \frac{5,3 \cdot 409}{100 \cdot 514 \cdot \sqrt{3}} = 24,349 \cdot 10^{-3} \quad (3.4)$$

$$x_{\text{а тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = \sqrt{(24,349 \cdot 10^{-3})^2 - (5,681 \cdot 10^{-3})^2} = 26,677 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

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

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

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

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

Індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму:

$$L_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{а тр}}}{2\pi f_c} = \frac{23,677 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 75,365 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.6)$$

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

Індуктивність обмотки якоря двигуна визначається за емпіричною формулою [12, с.56]:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{30 \cdot U_{\text{н}}}{\pi \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}} \cdot p} = 0,1 \frac{30 \cdot 440}{3,14 \cdot 490 \cdot 274 \cdot 2} = 1,565 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції електродвигуна ( $k = 0,1$  - для компенсованих машин;  $k = 0,5 \dots 0,6$  – для некомпенсованих машин);

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

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

$p = 2$  – число пар полюсів електродвигуна;

$n_{\text{н}}$  – номінальна частота обертання електродвигуна.

Пульсації випрямленої напруги призводять до пульсації випрямленого струму. які погіршують комутацію двигуна та збільшують його нагрівання. Вплив пульсацій на комутацію двигунів виражається у звужуванні зони темної комутації порівняно з живленням від генератора постійного струму та у появі іскріння під щітками.

Для обмеження нагрівання та поліпшення комутації двигуна з допомогою згладжувальних реакторів обмежують (згладжують) амплітуду змінної складової. При цьому звичайно виходять з допустимого рівня пульсацій випрямленого струму для двигуна при номінальній швидкості та номінальній напрузі. Оцінка ведеться за діючим значенням основної гармоніки, яке повинно складати від 2 до 15 % номінального струму двигуна залежно від його потужності та діапазону регулювання швидкості. Із збільшенням потужності

двигуна, а також при значному діапазоні регулювання швидкості допустимий рівень пульсації випрямленого струму зменшується.

Розрахункову індуктивність згладжувального дроселя, необхідну для забезпечення потрібного рівня пульсацій випрямленого струму можна визначити за наступною формулою [12, с. 56]:

$$L_{\text{сд}} = \frac{e_n E_{\text{д0}}}{i_e \omega_1 I_{\text{н дв}}} - (2L_{\text{тр}} + L_{\text{дв}}) =$$

$$= \frac{0,24 \cdot 552,15}{0,04 \cdot 1884,956 \cdot 274} - (2 \cdot 75,365 \cdot 10^{-6} + 1,565 \cdot 10^{-3}) = 4,7 \text{ мГн} \quad (3.8)$$

де  $e_n$  - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої напруги, може бути підрахована за допомогою рівнянь [11, с. 40], або з графіка [11, с. 47 рис. 1.31]. На цьому графіку зображено залежність  $e_n$  для мостової трифазної схеми випрямлення в функції кута регулювання  $\alpha$ . Приймаємо граничний кут регулювання  $\alpha_{\text{max}} = 90$  ел. град, тоді значення  $e_n = 0,24$ ;

$E_{\text{д0}}$  - значення максимально випрямленої ЕРС, В;

$i_e$  - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої струму.  $i_e = 0,02 \div 0,05$ , нижня межа береться для електроприводу середньої і великої потужності, а верхній - для електроприводу малої потужності [11, с. 46, 59];

$\omega_1$  - кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги, Гц;

$I_{\text{н дв}}$  - номінальний струм якоря електродвигуна (струм навантаження перетворювача), А (див. табл. 1.3);

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

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

З довідника [10, 12] вибираємо згладжувальний дросель, технічні дані якого наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні данні згладжувального дроселя типу ФРОС-1000/0,5УЗ

Найменування параметра	Позначення та чисельне значення
Номінальний постійний струм, А	$I_{н\ cд} = 800$
Номінальна індуктивність, мГн	$L_{н\ cд} = 5$
Активний опір, мОм	$r_{сд} = 7,2$
Вага, кг	$m_{сд} = 510$

### 3.4 Опис принципової схеми рольганга перед ножицями

Принципова схема силового ланцюга рольганга перед ножицями обтискного стану 1250 на рис. 3.3.

У якості резервного агрегату UZR, для живлення електродвигуна застосований комплектний тиристорний електропривод SIMOREG DC MASTER 6RM7078-6DS02. Схема перемикання на резервний перетворювач наведена на рис. 3.3. Перемикання електродвигуна на живлення від резервного тиристорного перетворювача проводиться при відключеному живленні основних ланцюгів і зупиненому приводі.



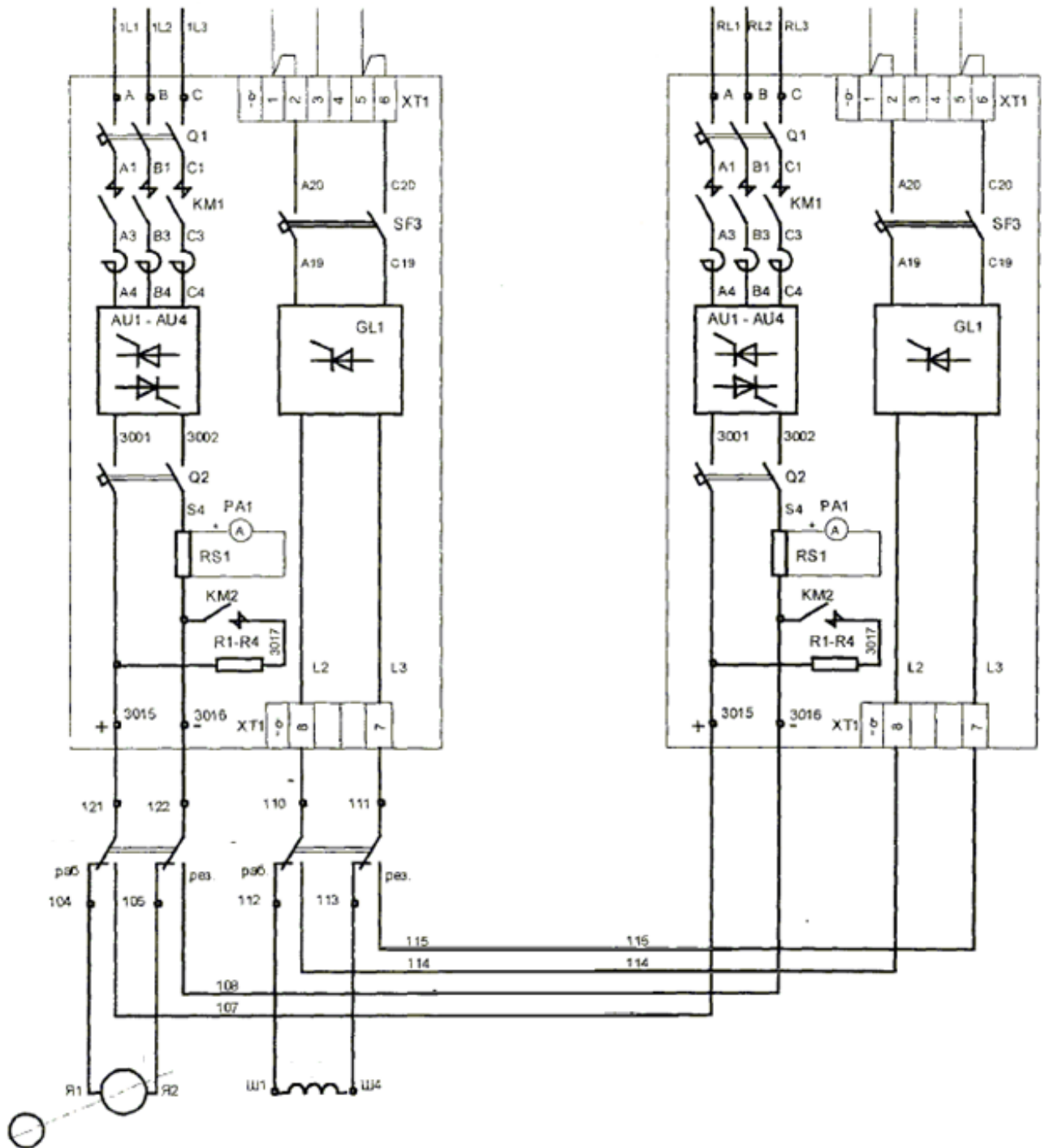


Рисунок 3.3 – Принципова схема силового ланцюга електропривода  
рольгангу перед ножицями обтискного стану 1250

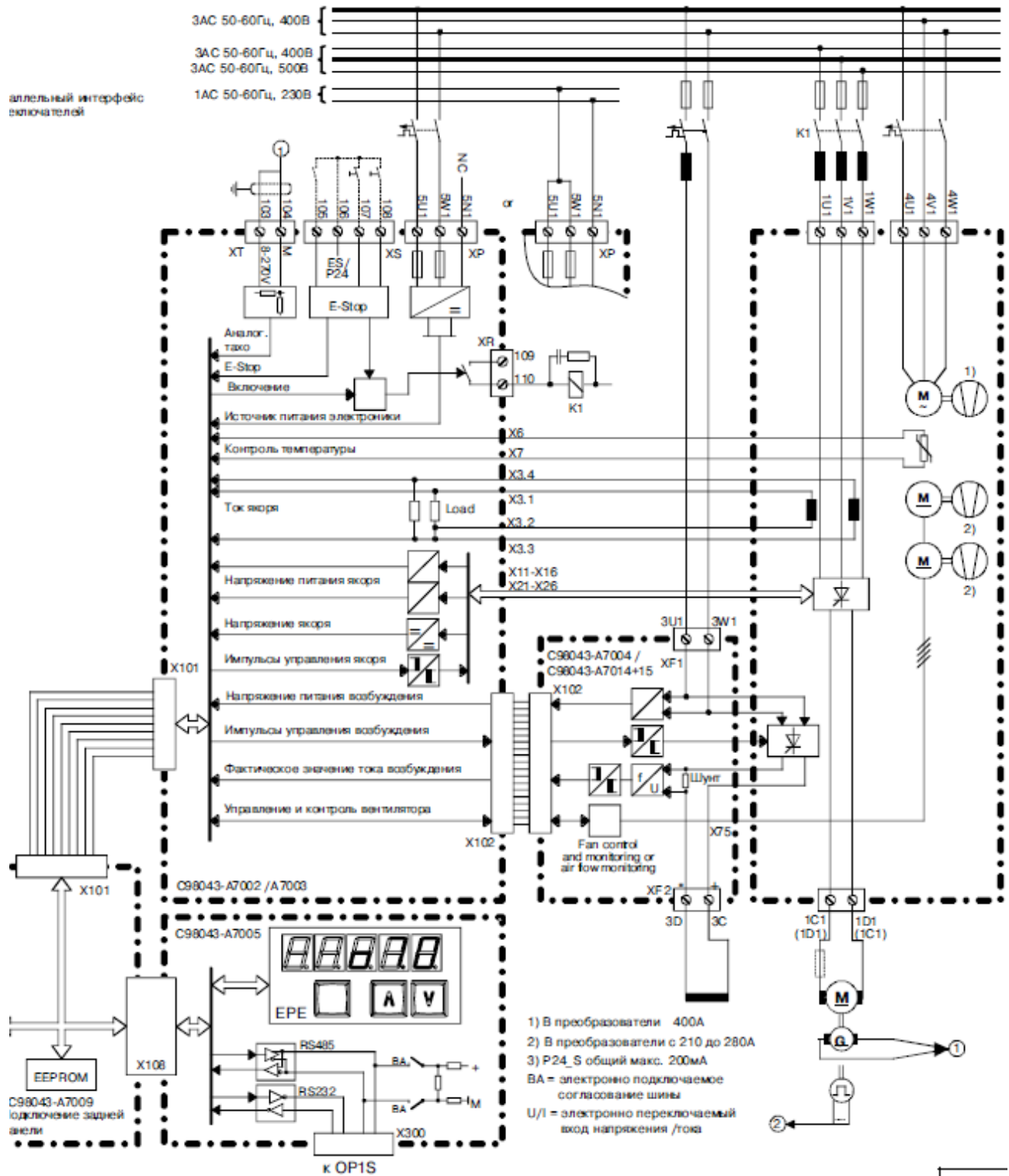


Рисунок 3.4 - Функціональна схема підключення (силова схема) тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

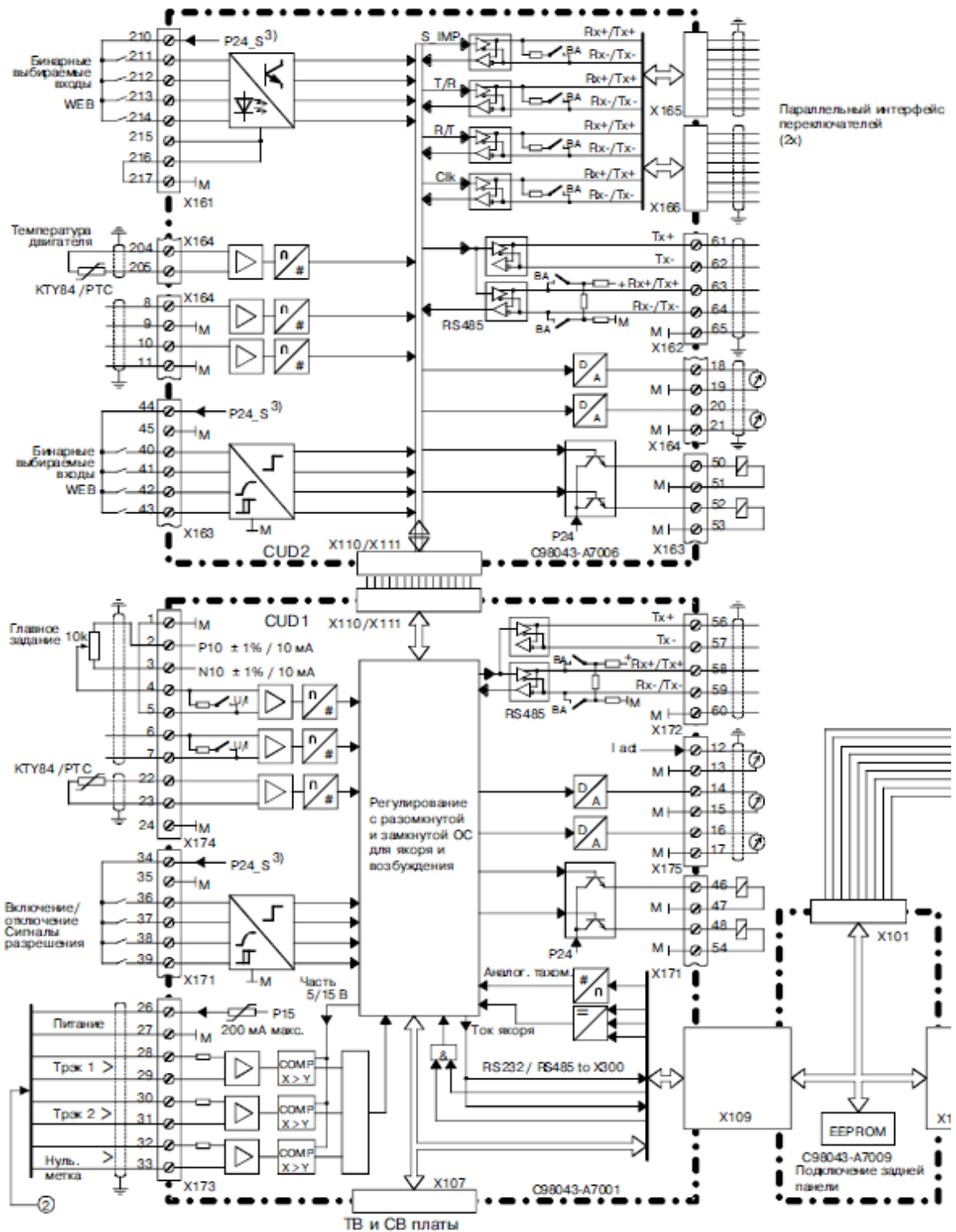


Рисунок 3.5 - Функціональна схема підключення (схема керування) тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

## 4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РОЛЬГАНГУ ПЕРЕД НОЖИЦЯМИ

### 4.1 Математичний опис об'єкту керування

При синтезі системи керування приймаються звичайні для систем електроприводу допущення, лінійризуючі силову частину об'єкта керування - двигун і регульоване джерело живлення ланцюга якоря. При математичному описі не враховується вплив пружних елементів, вплив гістерезису, вихрових струмів і реакції якоря. Коефіцієнти передач і постійні часу структурних елементів електроприводу приймаються незмінними.

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

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

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

У зв'язку з цим повне дослідження динамічних характеристик ТП є складним завданням, і на практиці застосовують різного роду спрощення. Найбільшого поширення набули два види моделей тиристорних перетворювачів: безперервна, в якій ТП представляється аперіодичною ланкою з коефіцієнтом  $k_{\text{ТП}}$  та сталої часу  $\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$  та імпульсна. Надалі, при синтезі

САУ буде використана безперервна модель тиристорного перетворювача.

Система регулювання обраного тиристорного перетворювача двопроцесорна, всі регулятори (струму якоря, швидкості, ЕДС двигуна, струму

збудження і т.п.) побудовані з функціональних блоків, реалізованих програмно. Внаслідок того, що швидкодія мікропроцесорів досить високу ресурсів, яких до того ж вистачає для реалізації системи захистів і сигналізації, здійснення моніторингу стану електроприводу, діагностики збоїв і попереджень, інтерфейсу оператора і т.п., синтез системи регулювання може бути здійснений відповідно до традиційного налаштування контурів за модульним і симетричними оптимумами, причому сама система регулювання вважається безперервною. Детальні структурні схеми відповідних контурів регулювання перетворювача SIMOREG DC Master будуть представлені в наступних розділах при синтезі САР.

Таким чином, електродвигун представимо у вигляді трьох типових ланок (рис. 4.1): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина двигуна) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативним зворотним зв'язком по ЕРС двигуна [13-14].

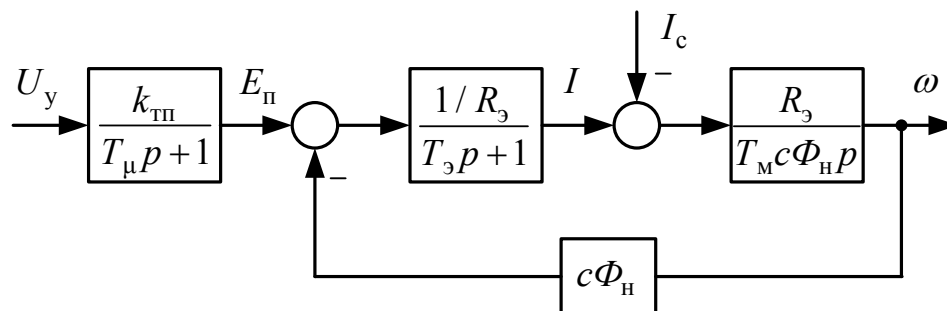


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електроприводу

## 4.2 Розрахунок основних параметрів елементів системи електроприводу

Сумарний опір якірного ланцюга електродвигуна:

$$r_{я.дв} = \beta(r_{я} + r_{дп} + r_{ко}) = 1,32(0,0805 + 0,002) = 0,109 \text{ Ом} \quad (4.1)$$

де  $\beta = 1,32$  - температурний коефіцієнт двигуна, що враховує зміну опору при нагріванні машини на  $80^{\circ}\text{C}$ ;

$r_{я}$  - опір обмотки якоря (холодний) при  $20^{\circ}\text{C}$ , Ом;

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

$r_{ко}$  - опір компенсаційної обмотки (холодний), Ом;

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_k = \frac{m_\phi \cdot x_a}{2\pi} = \frac{6 \cdot 23,677 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 22,609 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (4.2)$$

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

$x_a$  - повний опір силового трансформатора.

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

$$k_{\text{ТП}} = \frac{E_{d0}}{U_{y \text{ max}}} = \frac{552,15}{10} = 55,21 \quad (4.3)$$

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

$E_{d0}$  - значення максимально випрямленою ЕРС.

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_\Sigma &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_{\text{сд}} + r_k + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,109 + 2(5,681 \cdot 10^{-3}) + 7,2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 22,609 \cdot 10^{-3} + 10,9 \cdot 10^{-3} = 0,172 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $r_{\text{я.дв}}$  - активний опір якірного ланцюга двигуна;

$r_{\text{тр}}$  - активний опір силового трансформатора;

$r_{\text{сд}}$  - активний опір згладжувального дроселя;

$r_k$  - комутаційний опір;

$r_{\text{ш}} = 0,1r_{\text{я.дв}} = 0,1 \cdot 0,109 = 10,9 \text{ мОм}$  - активний опір шин або кабелю, що

з'єднують ТП з якорем двигуна.

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{дв}} + 2L_{\text{тр}} = 1,565 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 75,365 \cdot 10^{-6} = 0,002 \text{ Гн} \quad (4.5)$$

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

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} + J_{\text{см}} = 10,25 + 19,77 + 2 = 32,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.6)$$

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

$J_{\text{мех}} = 19,77 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції механізму;

$J_{\text{см}} = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції сполучних муфт.

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я,дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{440 - 274 \cdot 0,1289}{51,3} = 8 \text{ Вс} \quad (4.7)$$

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

Електромагнітна стала часу системи ТП-Д:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,002}{0,172} = 0,012 \text{ с} \quad (4.8)$$

Електромеханічна стала часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = \frac{J'_{\Sigma} R_{\Sigma}}{c\Phi_{\text{н}}^2} = \frac{32,02 \cdot 0,172}{8^2} = 0,086 \text{ с} \quad (4.9)$$

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

Співвідношення електромеханічної постійної часу до електромагнітної  $T_{\text{м}} / T_{\text{е}} = 0,086 / 0,012 = 7,2$ .

### 4.3 Синтез регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму враховуємо, що електромеханічна постійна часу  $T_M$  набагато більша електромагнітної постійної часу  $T_3$ . Також будемо зневажати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, розглядаючи його її як збурюючим впливом у контурі струму [12, 18].

Структурна схема контуру струму представлено на рисунку 4.2.

У якості малої постійної часу контуру струму приймаємо малу постійну ТП  $T_\mu = 5$  мс, що обирається, виходячи з необхідної швидкодії та завадостійкості системи регулювання. Налаштовуємо контур струму на модульний оптимум.

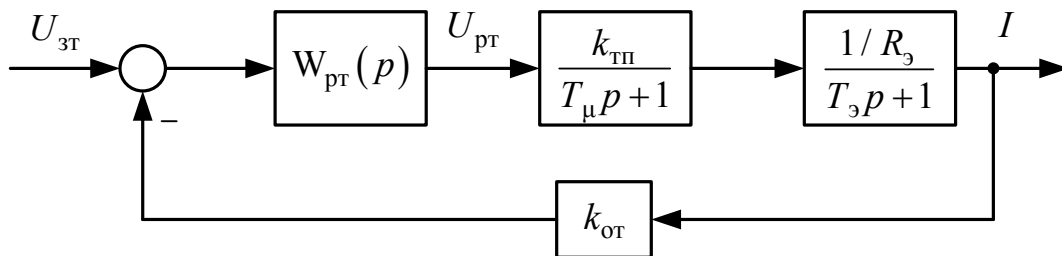


Рисунок 4.2 - Структурна схема контуру струму

На підставі структурної схеми, наведеної на рис. 4.2, та методики, викладеної в [18], можна отримати формули для визначення параметрів ПІ-РТ і передавальну функцію (ПФ) контуру регулювання струму (КРС), налаштованого на модульний оптимум (МО):

$$W_{рТ}^M(p) = \frac{R_3(T_3 p + 1)}{k_{тП} k_{от} 2T_\mu p} = \frac{R_3(T_3 p + 1)}{k_{тП} k_{от} T_{от} p} = k_{рТП} + \frac{k_{рТИ}}{p} \quad (4.10)$$

Пропорційна та інтегральна частина ПІ-регулятора струму:

$$k_{рТП} = \frac{R_3 T_3}{k_{тП} k_{от} T_{от}} = \frac{0,172 \cdot 0,012}{55,21 \cdot 0,014 \cdot 0,01} = 0,253 \quad (4.11)$$

$$k_{рТИ} = \frac{R_3}{k_{тП} k_{от} T_{от}} = \frac{0,172}{55,21 \cdot 0,014 \cdot 0,01} = 21,32 \text{ 1/c} \quad (4.12)$$



де  $T_9$  - електромагнітна стала часу системи ТП-Д;

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

$$k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зг.мах}}}{I_{\text{мах}}} = \frac{10}{685} = 0,014 \text{ В/А} - \text{коефіцієнт передачі ланки зворотнього}$$

зв'язку по струму;

$U_{\text{зг.мах}} = 10 \text{ В}$  - максимальний сигнал завдання на струм;

$I_{\text{мах}} = 2,5I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 274 = 685 \text{ А}$  - максимально допустимий струм якоря двигуна (струм упору);

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

Функціональна схема контуру регулювання струму якоря, реалізована в перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.3. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора струму при налагодженні електроприводу необхідно встановити в параметрах P155.F і P156.F відповідно.

Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якоря двигунів використовується канал аналогового входу (клеми X174.4 і X174.5 на рис. 4.4), на які подається напруга з датчика напруги, підключеного до вимірювального шунту. Шунт необхідно встановити в якірному ланцюзі двигуна. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем А/D, нормується за величиною до 100% параметром P701.F і далі при необхідності інвертується за допомогою параметра P703, програмно фільтрується і на виході конектора К0011 виходить програмний сигнал, пропорційний реальному току.

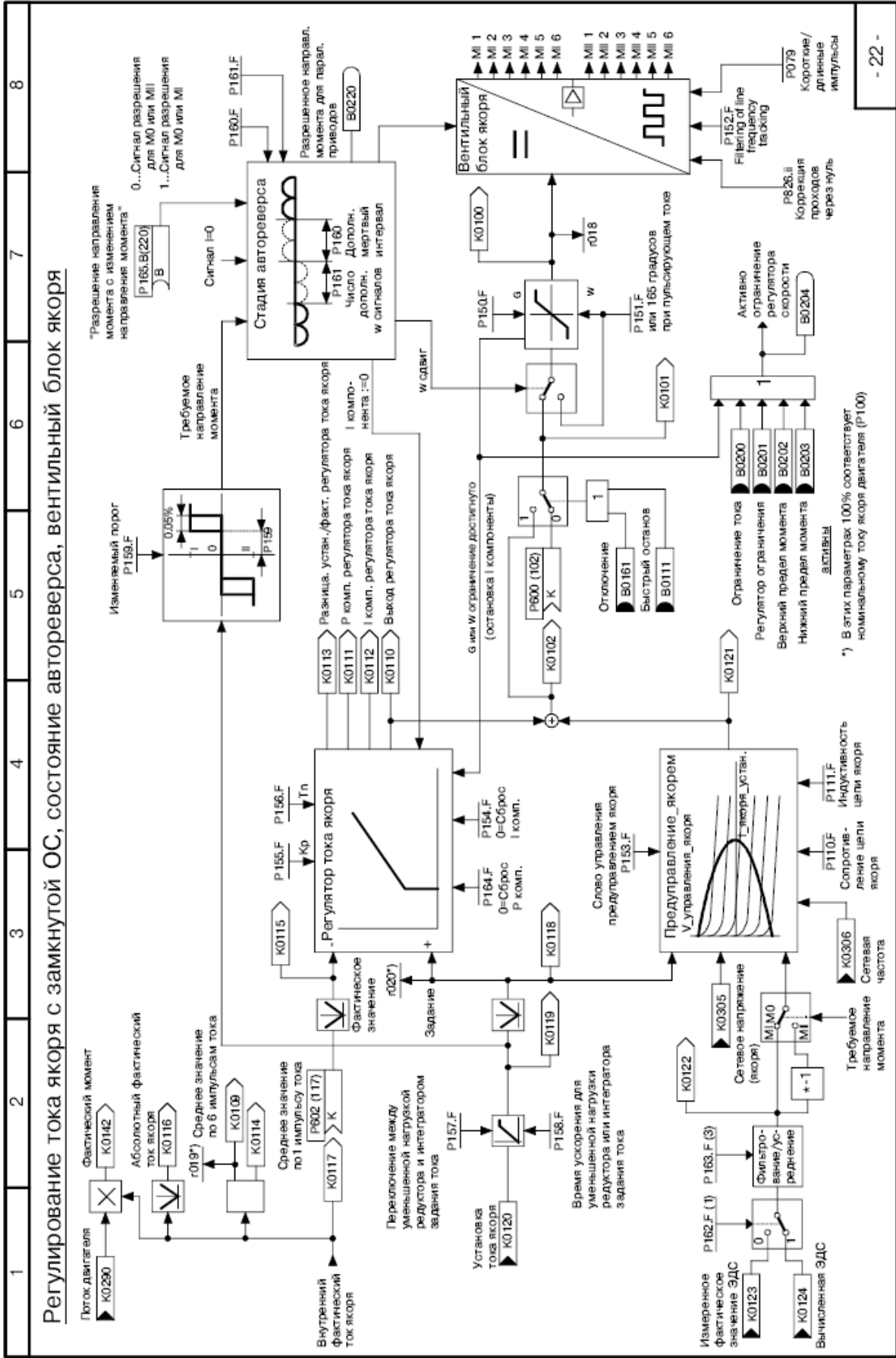


Рисунок 4.3 – Функціональна схема контуру регулювання струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

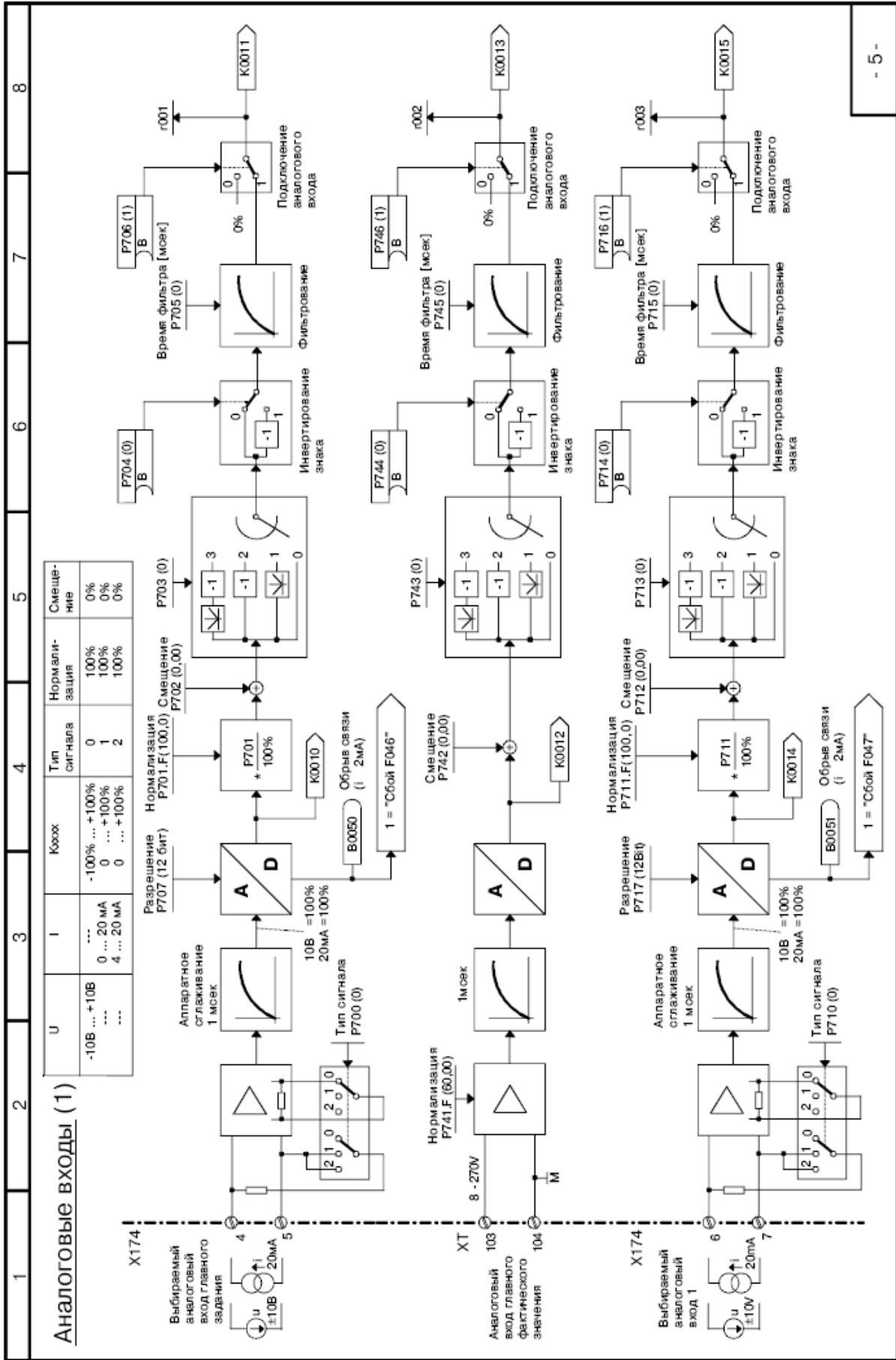


Рисунок 4.4 – Канал формирования сигнала возвратного зв'язку по струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

#### 4.4 Синтез регулятора швидкості

Структурна схема контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки  $T_\mu$  - мала стала часу, то добутком  $T_{от}T_\mu$  можна знехтувати) приведена на рисунку 4.5.

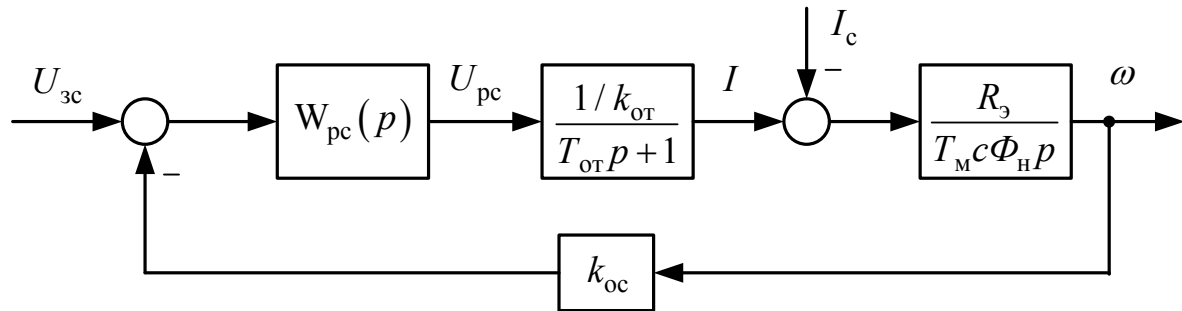


Рисунок 4.5 - Структурна схема контуру швидкості

Регулятор швидкості організований по пропорційно-інтегральному (ПІ) закону керування з настроюванням на симетричний оптимум. Регулятор для забезпечення необхідних динамічних параметрів повинен компенсувати електромеханічну постійну часу системи  $T_m$ , а також малу постійну часу контуру швидкості  $T_{ос}$ . У цьому випадку передатна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{pc}^c(p) = \frac{T_m c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{от}} \frac{4T_{от}p + 1}{4T_{от}p} = \frac{T_m c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} \frac{2T_{ос}p + 1}{2T_{ос}p} = k_{pc\Pi} + \frac{k_{pcИ}}{p} \quad (4.13)$$

Пропорційна та інтегральна частини ПІ-регулятора швидкості:

$$k_{pc\Pi} = \frac{T_m c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} = \frac{0,086 \cdot 8 \cdot 0,014}{0,172 \cdot 0,195 \cdot 0,02} = 15,01 \quad (4.14)$$

$$k_{pcИ} = \frac{1}{T_{pc}} = \frac{T_m c \Phi_H k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{ос}^2} = \frac{0,086 \cdot 8 \cdot 0,014}{0,172 \cdot 0,195 \cdot 2 \cdot 0,02} = 375,1 \text{ 1/c} \quad (4.15)$$

де  $T_m$  – електромеханічна постійна часу системи ТП-Д;

$$k_{ос} = \frac{U_{зс.max}}{\omega_{max}} = \frac{10}{51,3} = 0,195 \text{ Вc} - \text{коєфіцієнт передачі ланки зворотного}$$

зв'язку по швидкості;

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

$\omega_{маx} = \omega_H = 51,3$  1/с - максимальна швидкість електродвигуна;

$T_{ос} = 2T_{от} = 2 \cdot 0,01 = 0,02$  с - стала часу інтегрування контуру швидкості

при налаштуванні на симетричний оптимум.

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

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} \quad (4.16)$$

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

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.6. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора швидкості при налагодженні електроприводу необхідно встановити в параметрах P550.F, P225.F і P226.F відповідно.

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

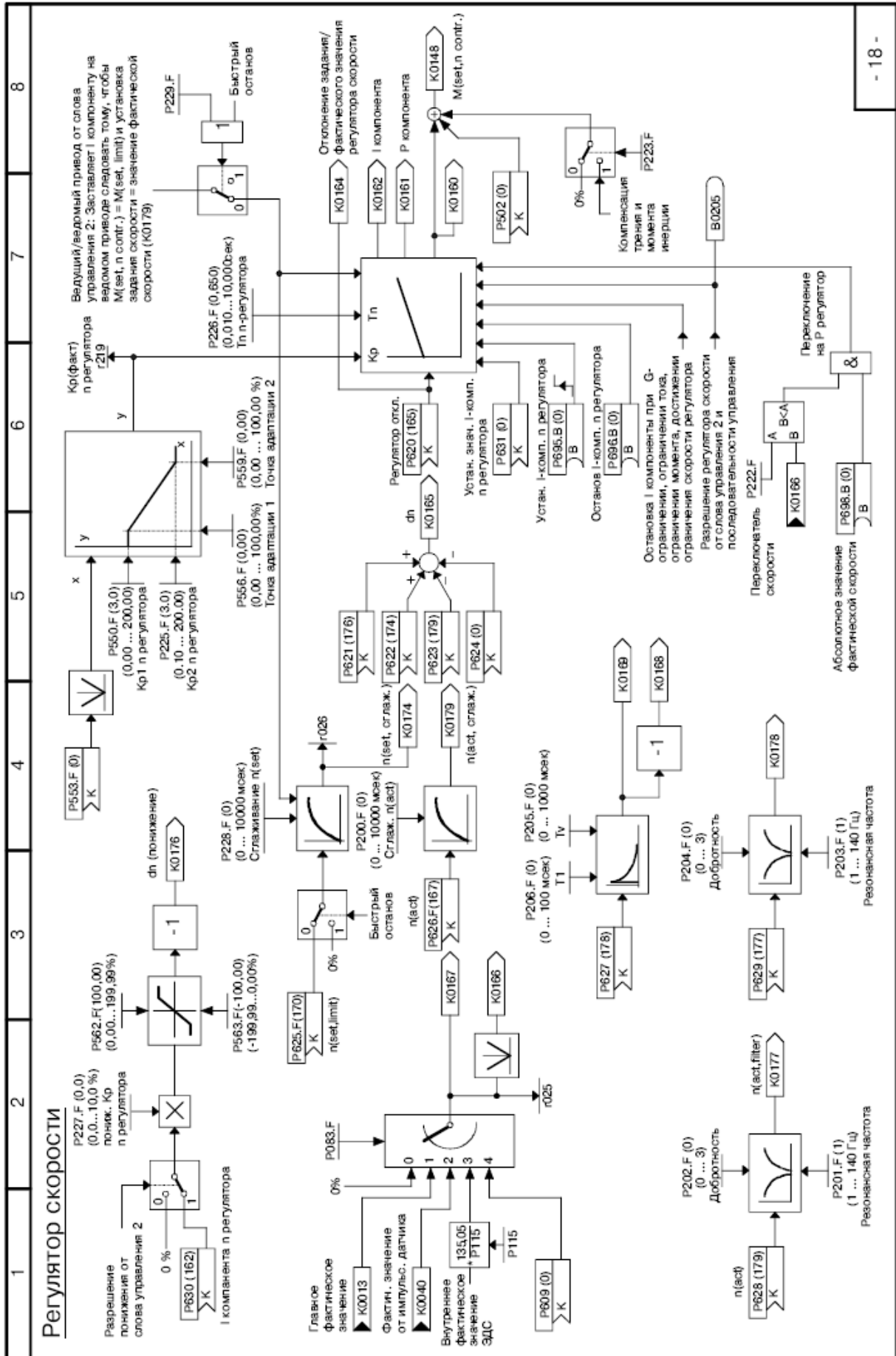


Рисунок 4.6 – Функціональна схема регулятора швидкості в перетворювачі SIMOREG DC Master

### Оценка импульсного датчика скорости

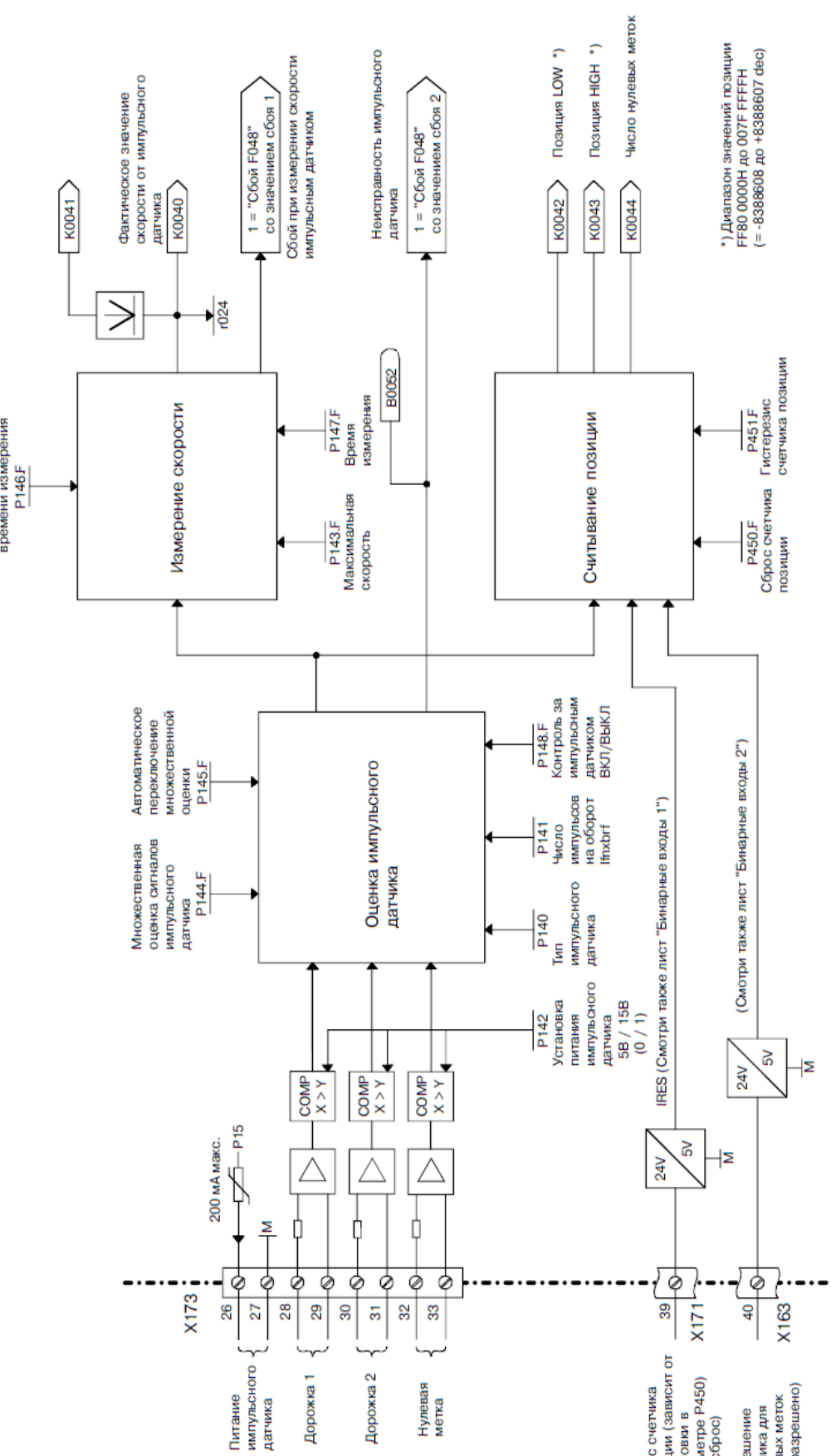


Рисунок 4.7 – Канал формування сигналу зворотному зв'язку по швидкості в перетворювачі SIMOREG DC Master

#### 4.5 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону і гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки струмообмеження ( $I_{\max} = 2,5I_H$ ) необхідно на вході регулятора швидкості встановити задатчик інтенсивності швидкості (ЗІШ). Він перетворює ступінчастий сигнал завдання швидкості в сигнал, що лінійно змінюється в часі. Стале значення напруги виходу ЗІШ, яке подається на вхід регулятора швидкості, так само вхідного сигналу. Структурна схема задатчика інтенсивності приведена на рисунку 4.8.

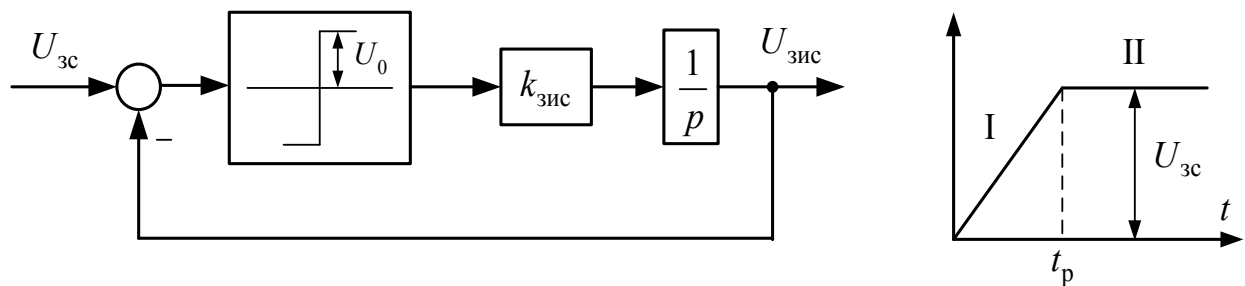


Рисунок 4.8 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідну напругу задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

$$U_{\text{зис}}^I = U_0 k_{\text{зис}} t_p = \frac{R_э}{T_M c \Phi_H} \frac{I_{\text{дин}} U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{з.уст}}} t_p \quad (4.17)$$

II ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{II} = U_{\text{зс}} \quad (4.18)$$

де  $I_{\text{дин}} = 1,5I_H$  А - заданий динамічний струм;

$\omega_{\text{з.уст}}$  - стала швидкість (швидкість транспортування злитка), відповідна

$U_{\text{зс}}, 1/\text{с};$

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

$U_0 = 10$  В - полиця релейного елемента.



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

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_H}{R_\omega} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} = \frac{0,086 \cdot 8}{0,172} \cdot \frac{16,75}{411} = 0,5 \quad (4.19)$$

Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p} \quad (4.20)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.8.

На рисунку 4.9 наведена структурна схема швидкісний системи підпорядкованого керування електроприводу.

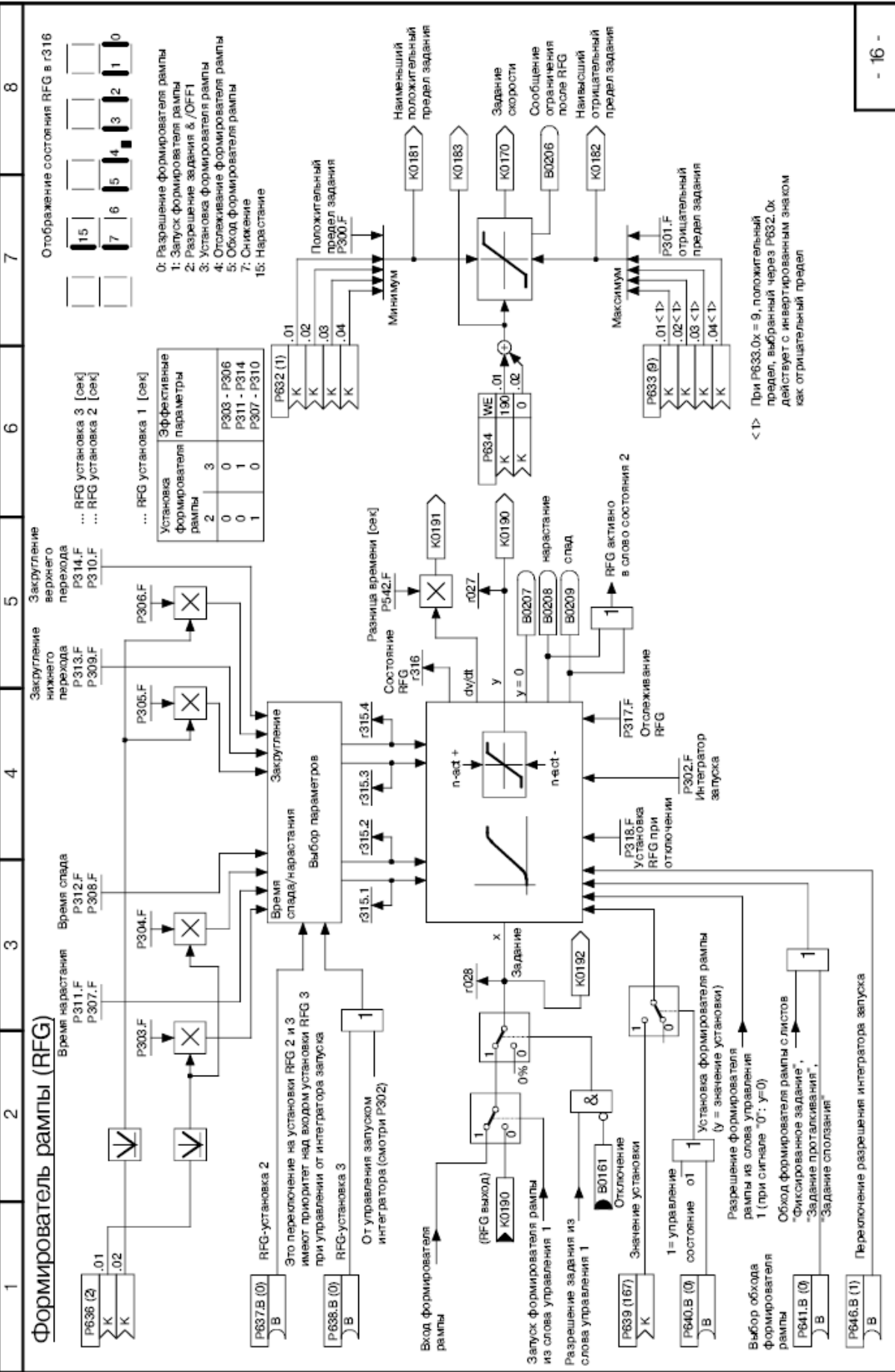


Рисунок 4.8 – Функціональна схема задатчика інтенсивності в перетворювачі SIMOREG DC Master

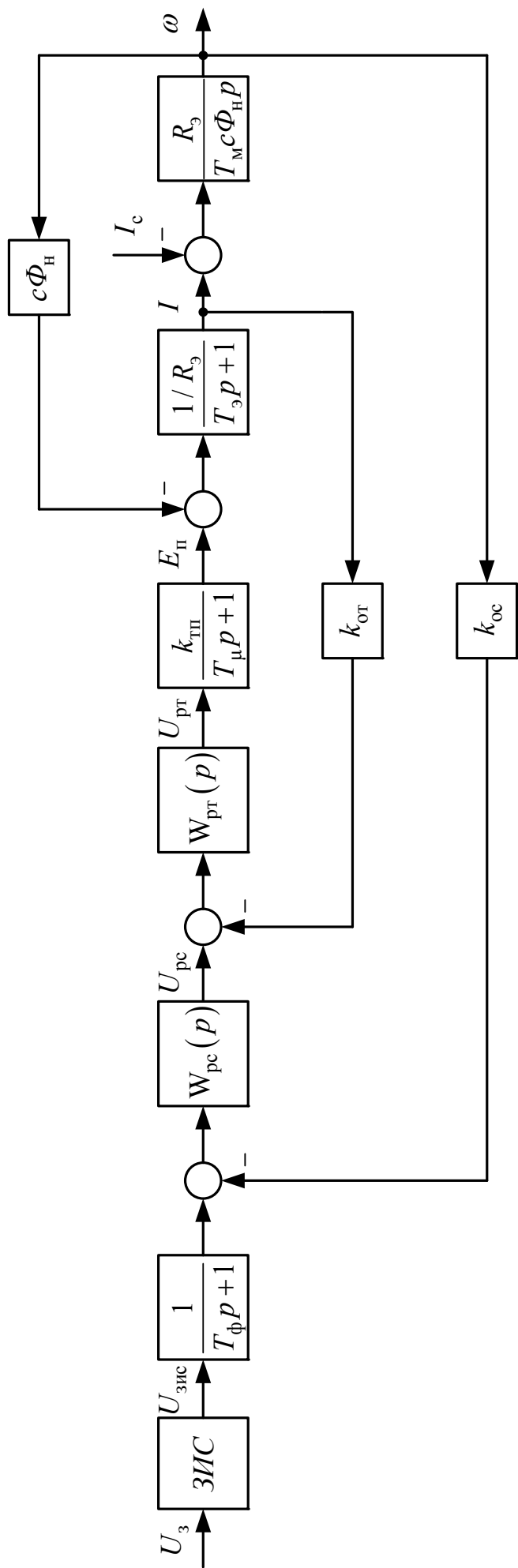


Рисунок 4.9 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

## 5 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РОЛЬГАНГУ ПЕРЕД НОЖИЦЯМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Цифрове моделювання розрахованої системи здійснюється в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводом робочого рольганга, що має у своєму складі ПІ-регулятор струму, П-регулятор швидкості й задатчик інтенсивності швидкості наведена на рис. 5.1. Внутрішні структури підсистем (Subsystem) типових вузлів схеми наведені на рис.5.2 - 5.4.

При реалізації регуляторів струму й швидкості в цифровій моделі враховувалося їх 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 Liner неприпустимо. Моделі регуляторів коректно враховують поріг насичення регулятора  $U_{y,max} = 10$  В (див. рис. 5.2).

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 їх варіації наведено на рис.5.5 - 5.17.

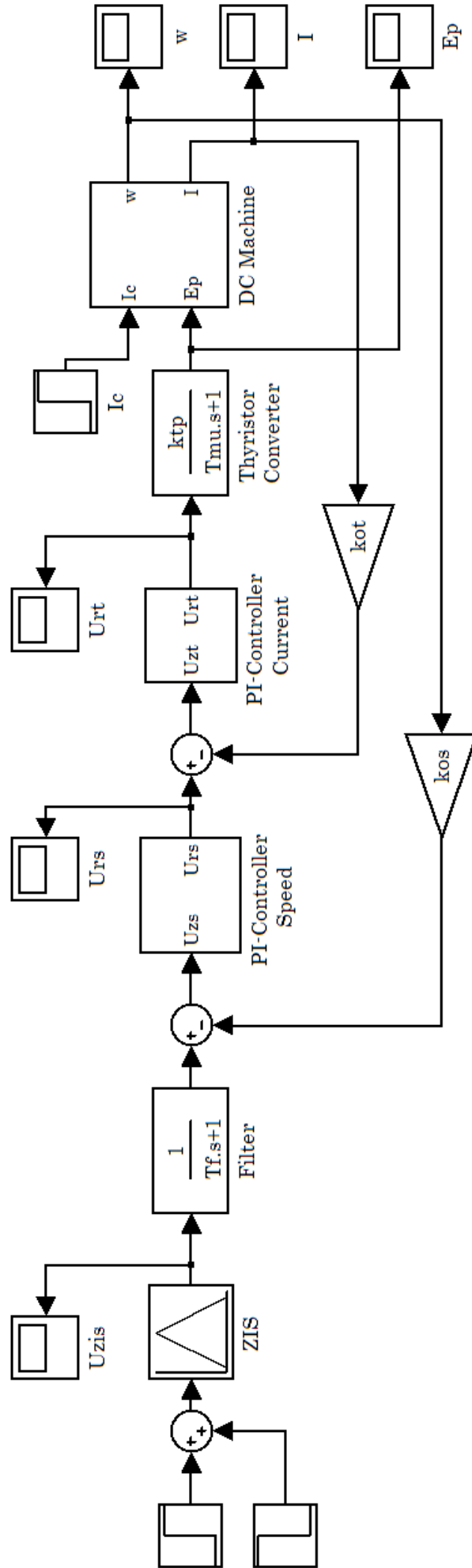


Рисунок 5.1 – Simulink-модель швидкісної системи підрядкованого керування

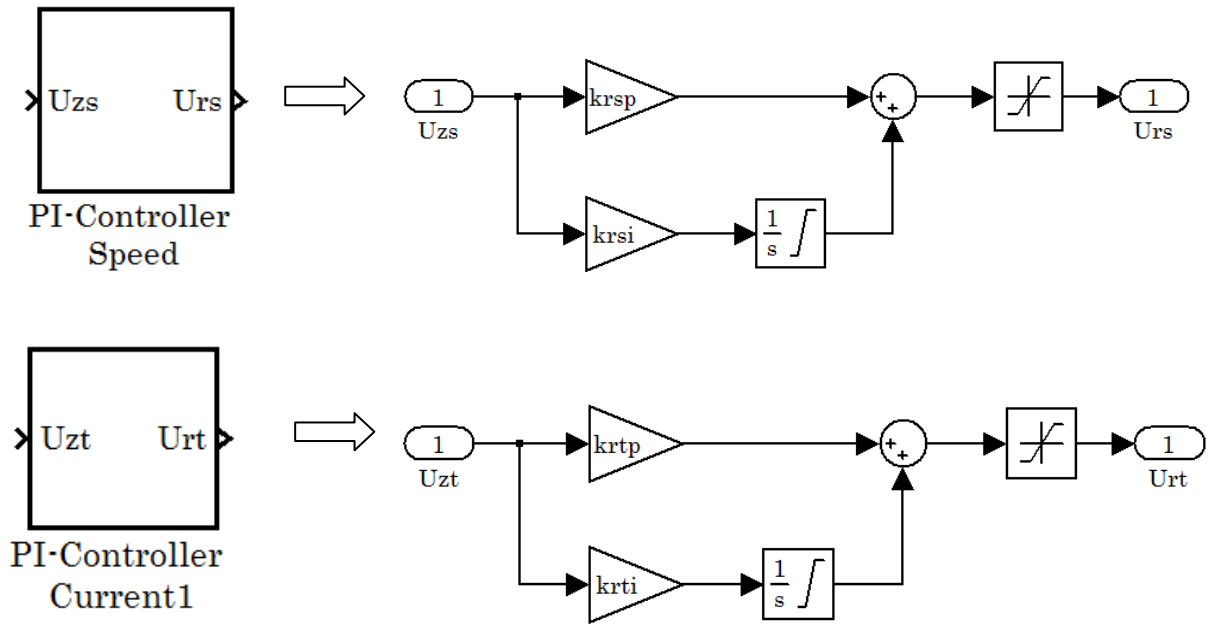


Рисунок 5.2 - Підсистема «ПІ-регулятор» струму (Pi-controller Current) і швидкості (Pi-controller Speed), що враховує поріг насичення регулятора

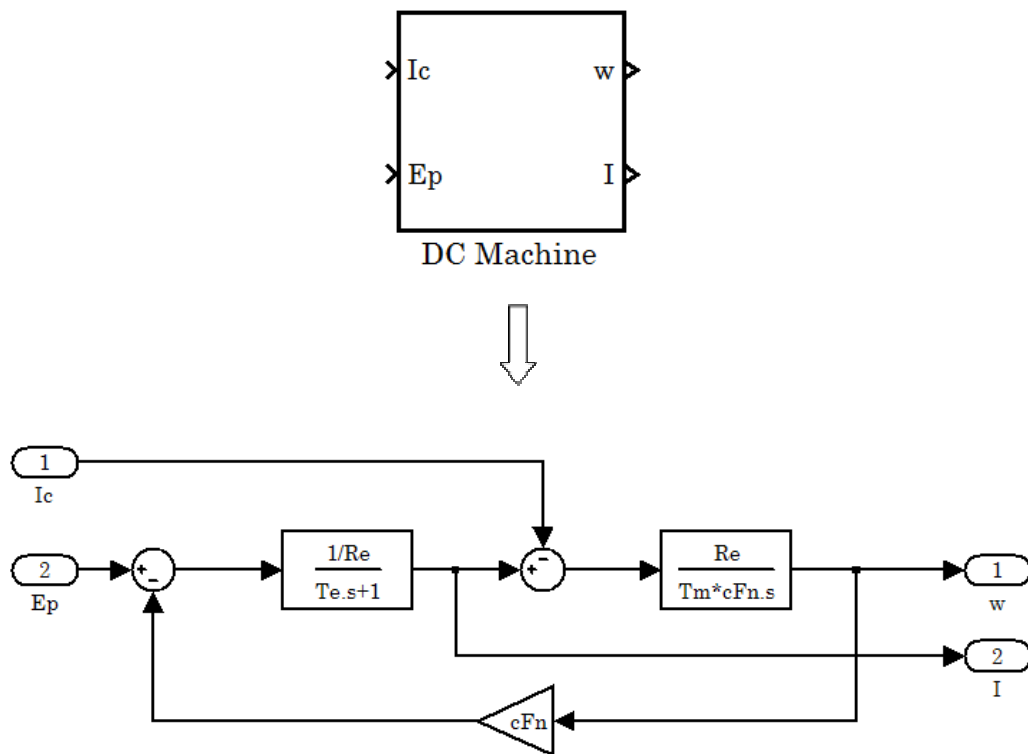


Рисунок 5.3 - Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

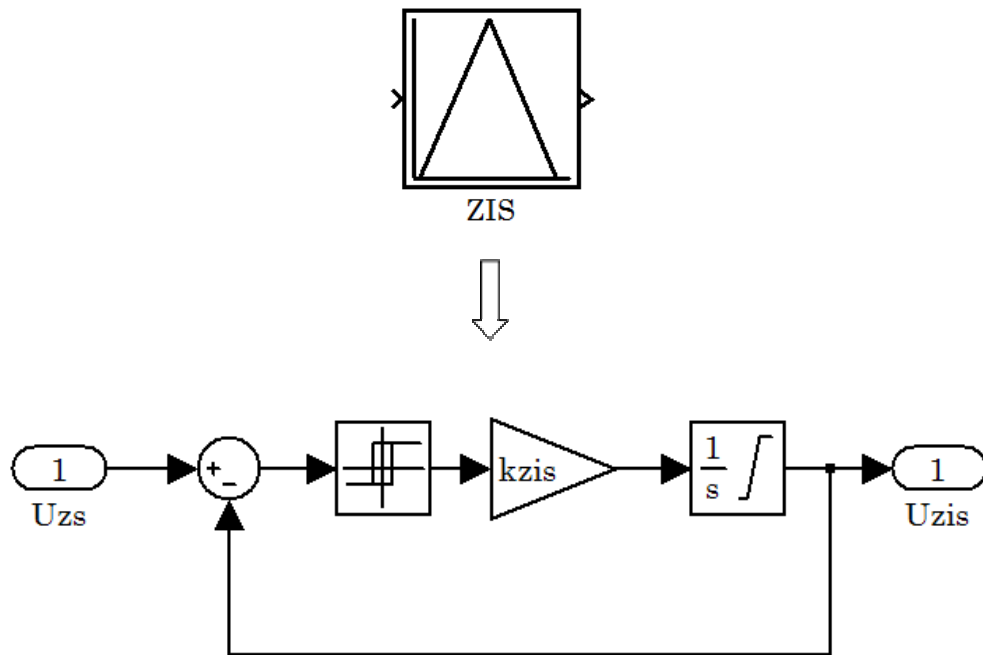


Рисунок 5.4 - Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), що реалізує раціональну динаміку

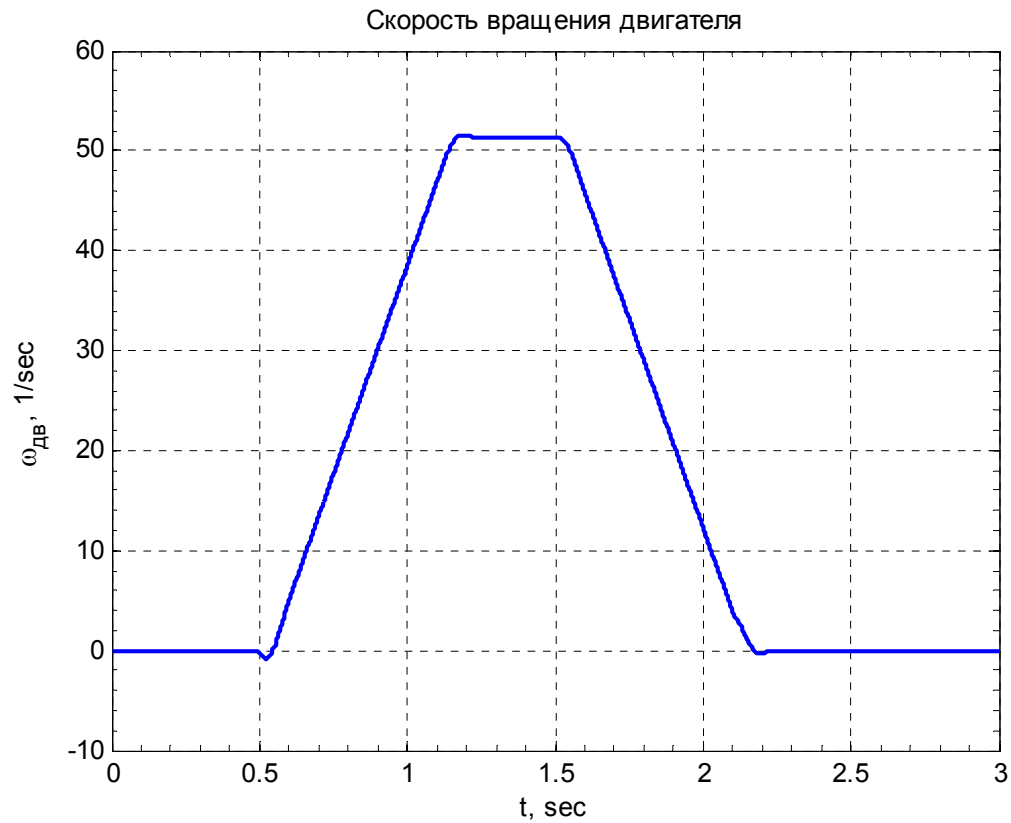


Рисунок 5.5 – Графики переходного процесса швидкості обертання двигуна ( $I_c = 0,3I_H$ )

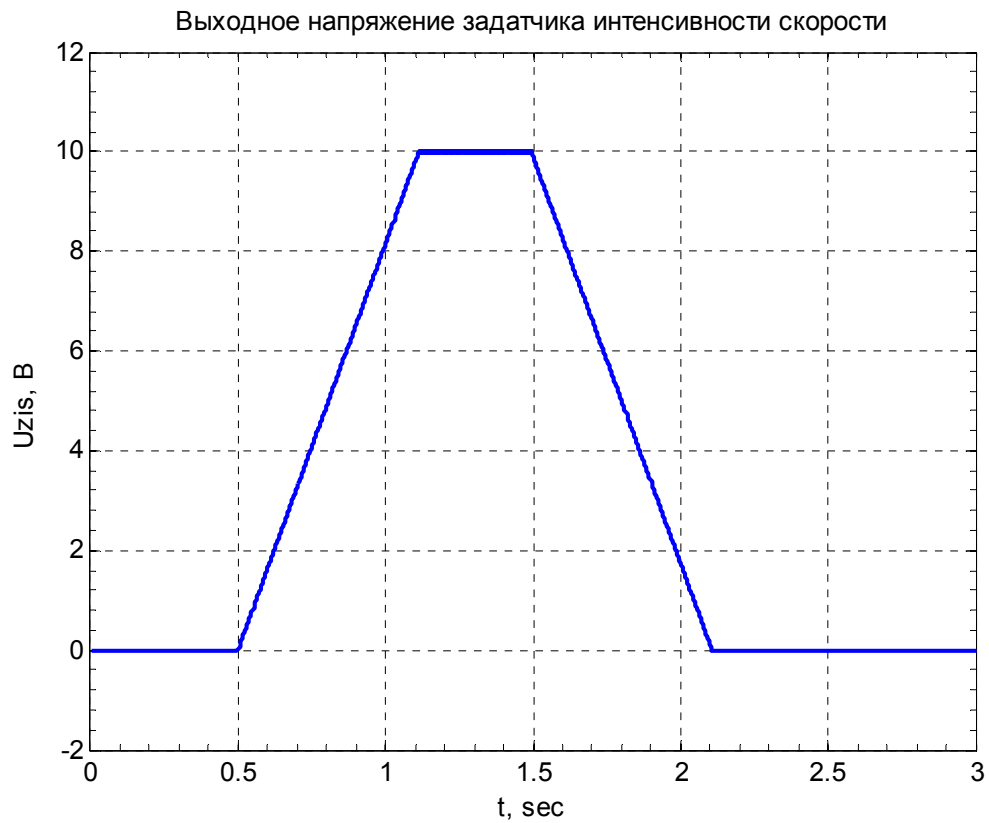


Рисунок 5.6 – Графік переходного процесу напруги датчика інтенсивності швидкості ( $I_c = 0,3I_H$ )



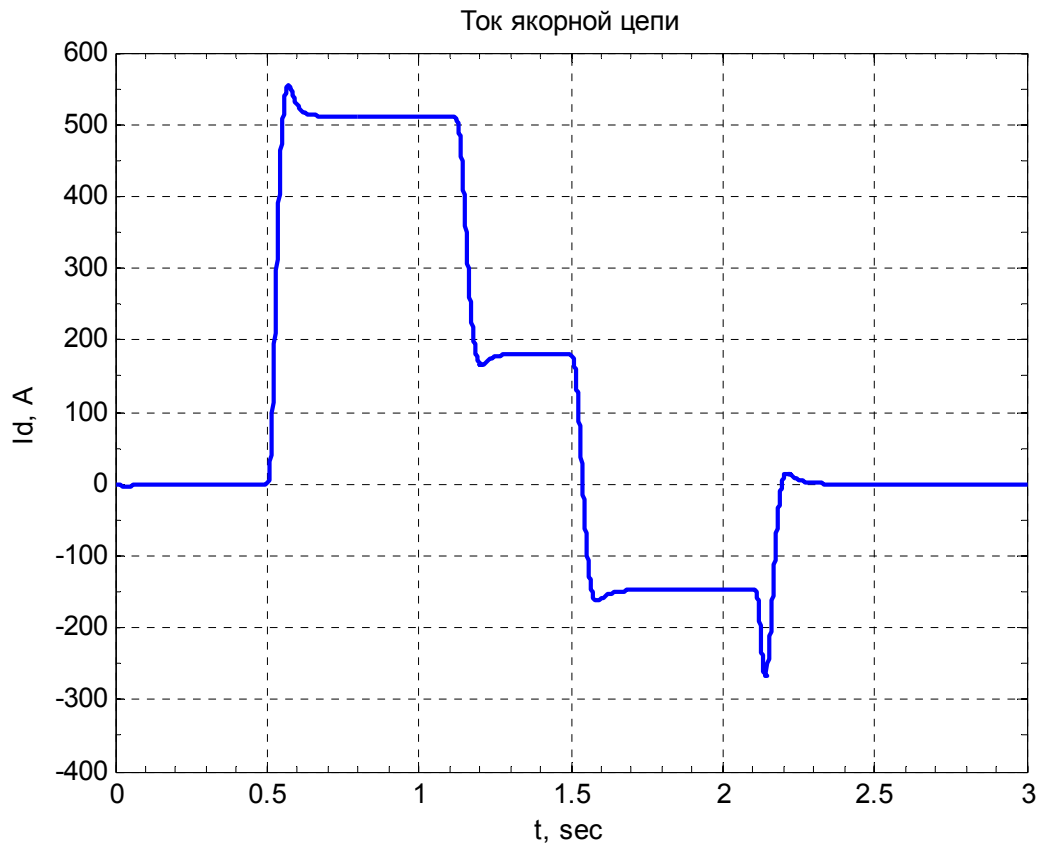


Рисунок 5.6 – Графік перехідного процесу струму якоря ( $I_c = 0,3I_H$ )

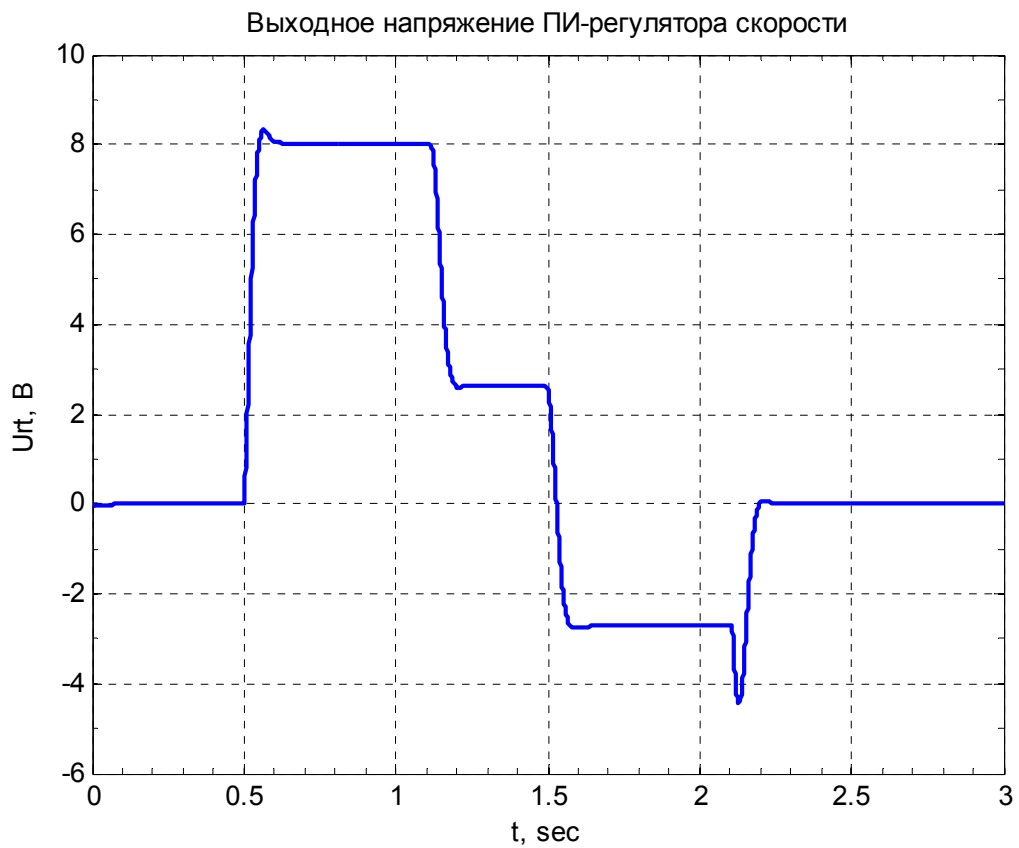


Рисунок 5.7 - Графік перехідного процесу напруги ПІ-регулятора швидкості ( $I_c = 0,3I_H$ )

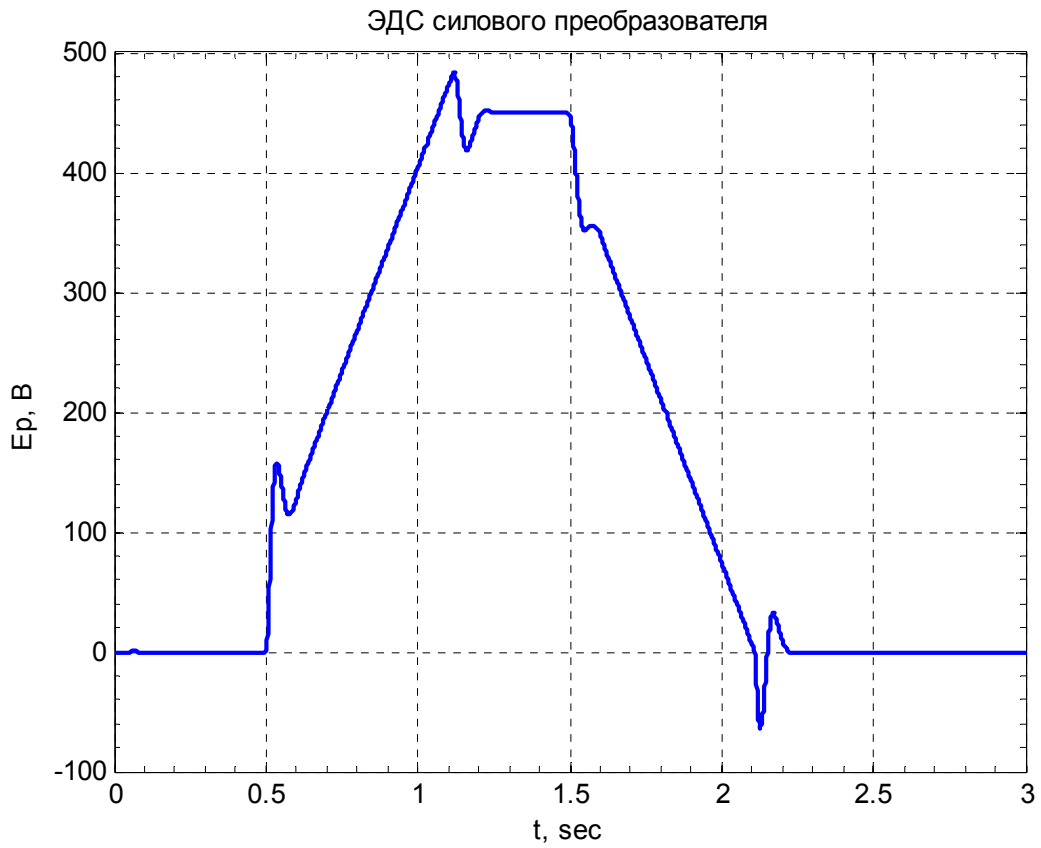


Рисунок 5.8 - Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного перетворювача ( $I_c = 0,3I_H$ )

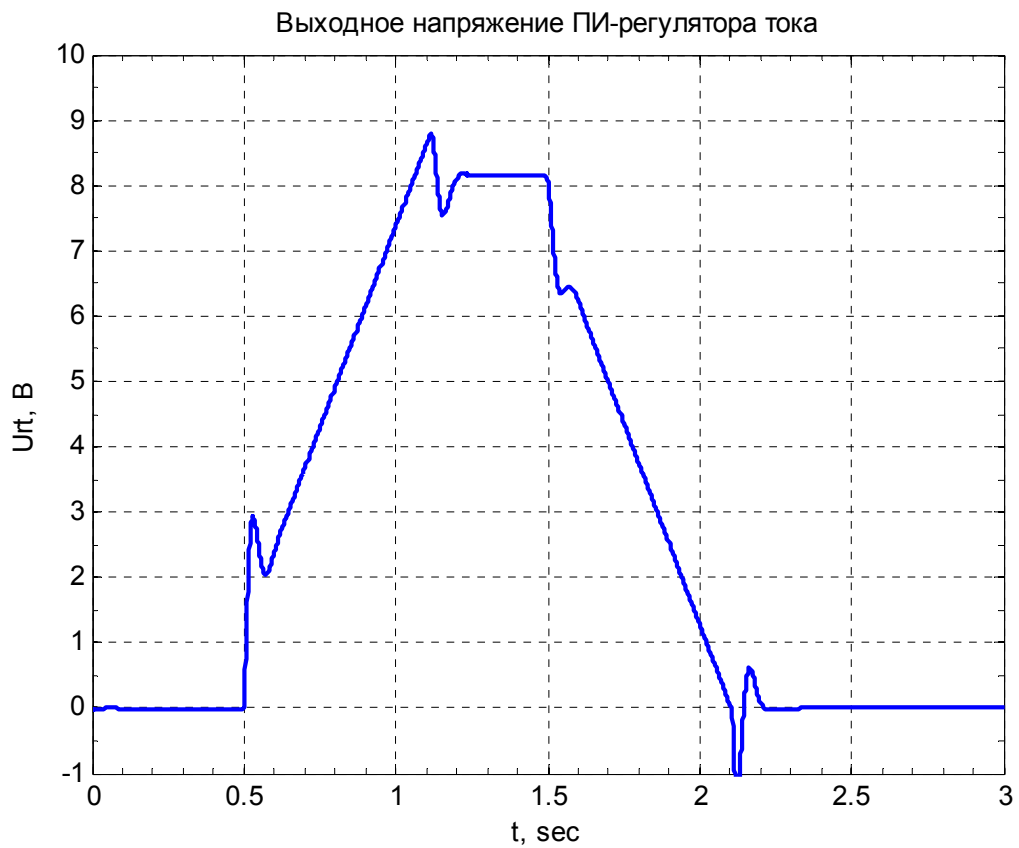


Рисунок 5.9 - Графік перехідного процесу напруги ПІ-регулятора струму ( $I_c = 0,3I_H$ )

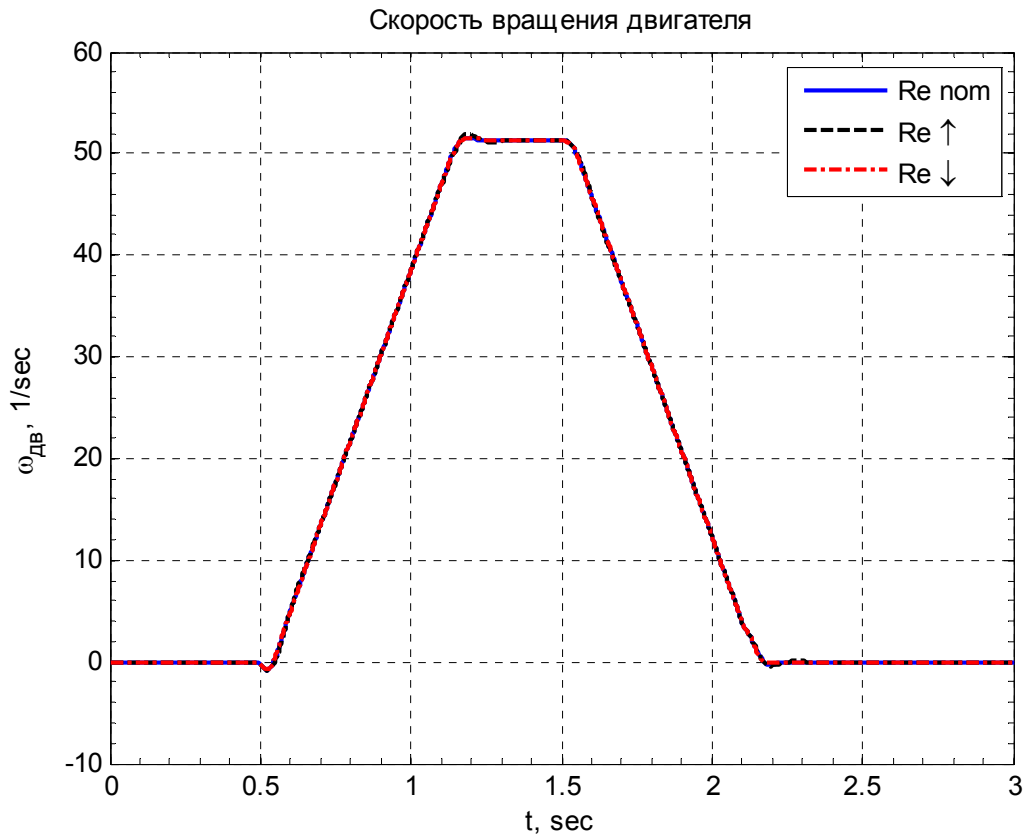


Рисунок 5.10 – Графики переходного процесса швидкості обертання двигуна при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

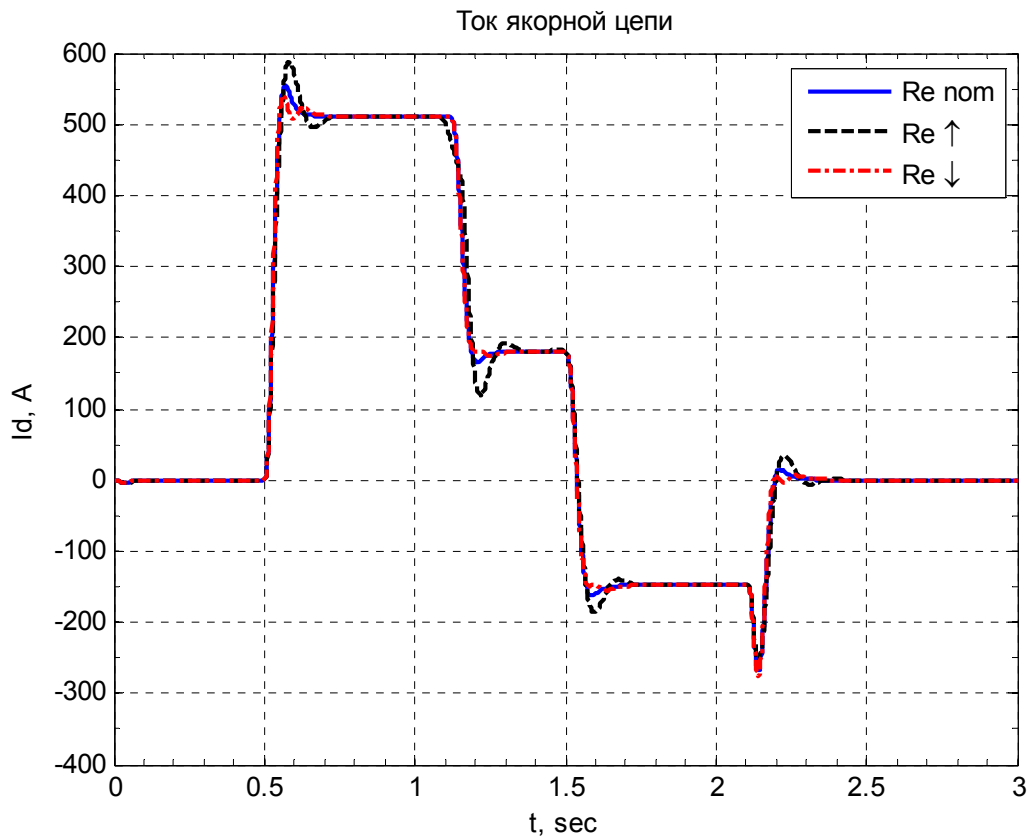


Рисунок 5.11 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

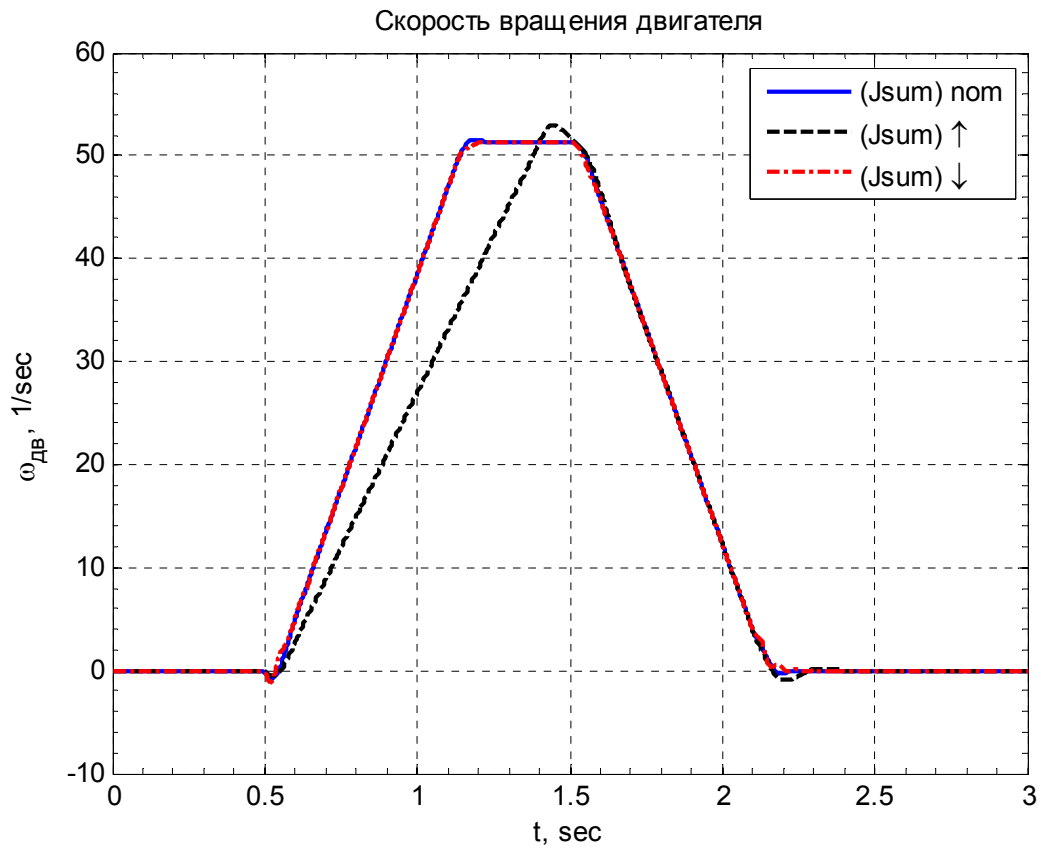


Рисунок 5.12 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

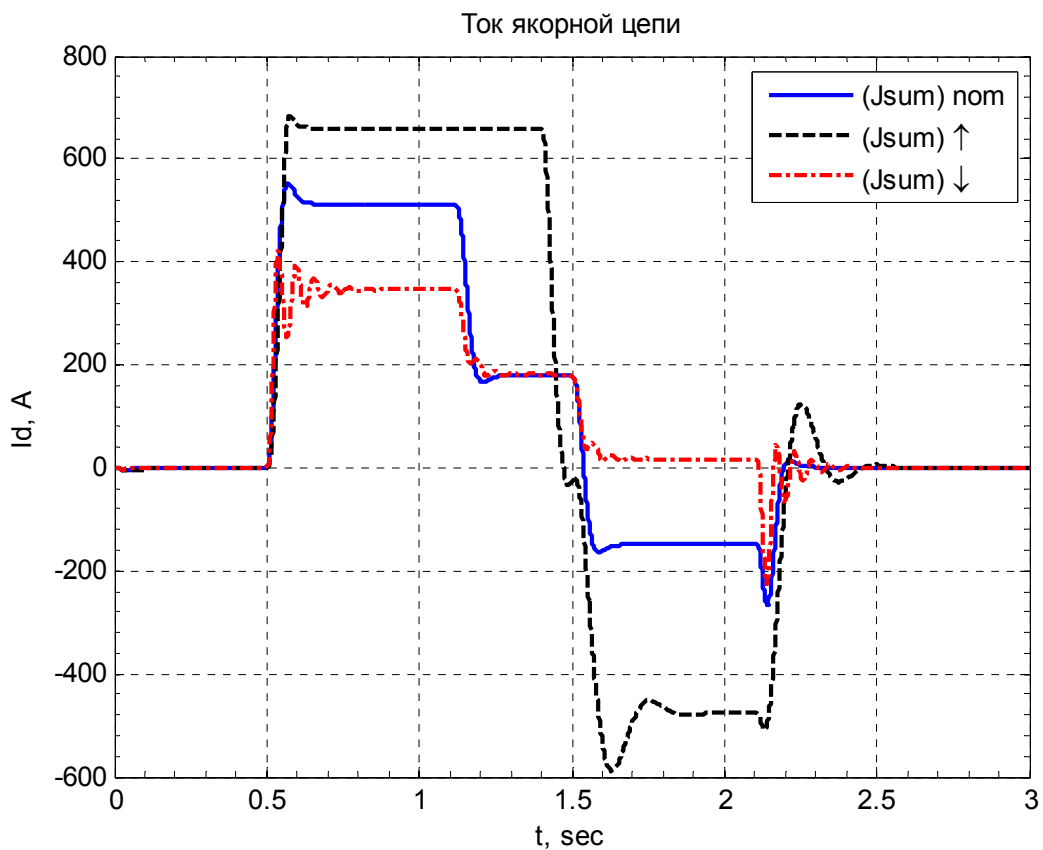


Рисунок 5.13 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

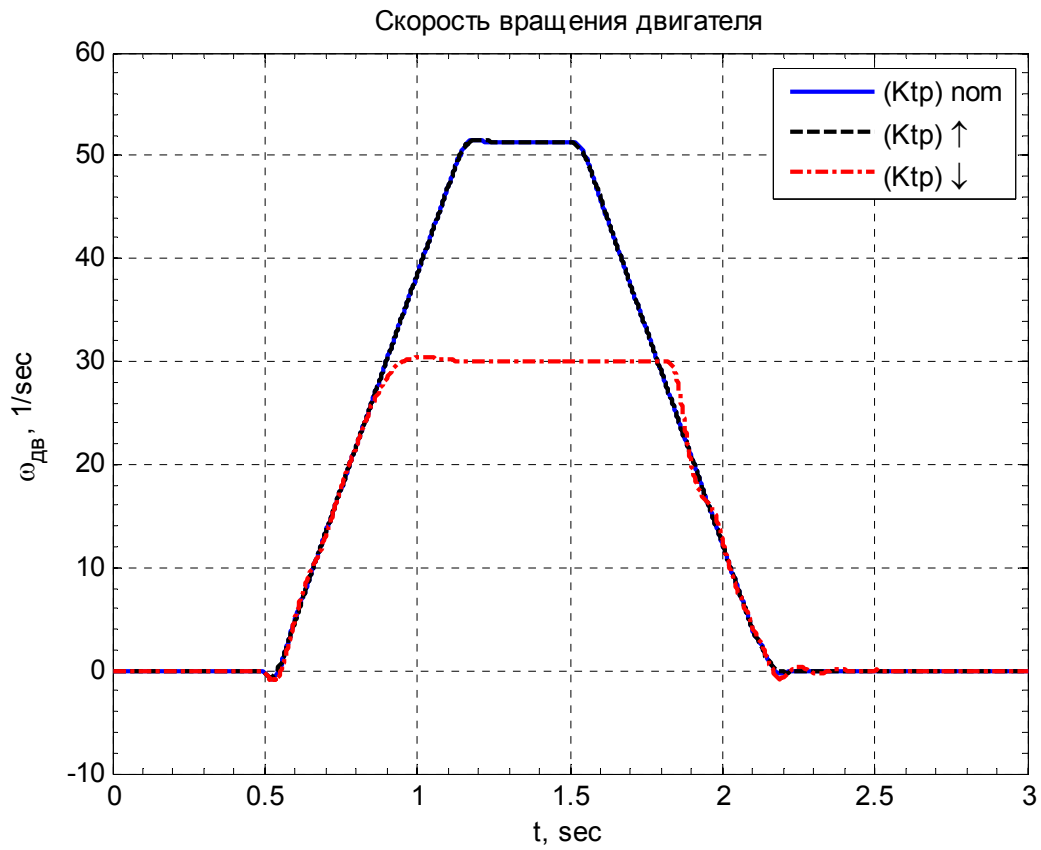


Рисунок 5.14 – Графики переходного процесса скорости вращения двигателя при зміні коефіцієнта передачі ТП в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

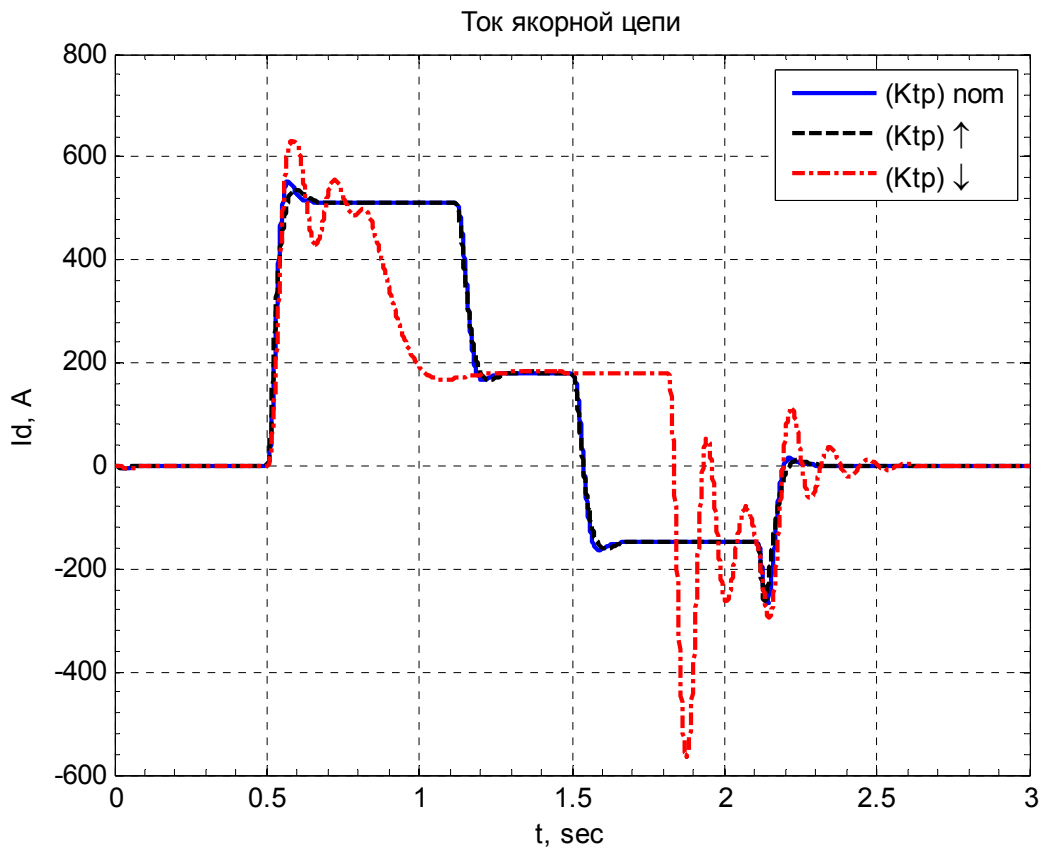


Рисунок 5.15 – Графік переходного процесу струму якоря при зміні коефіцієнта передачі ТП в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ )

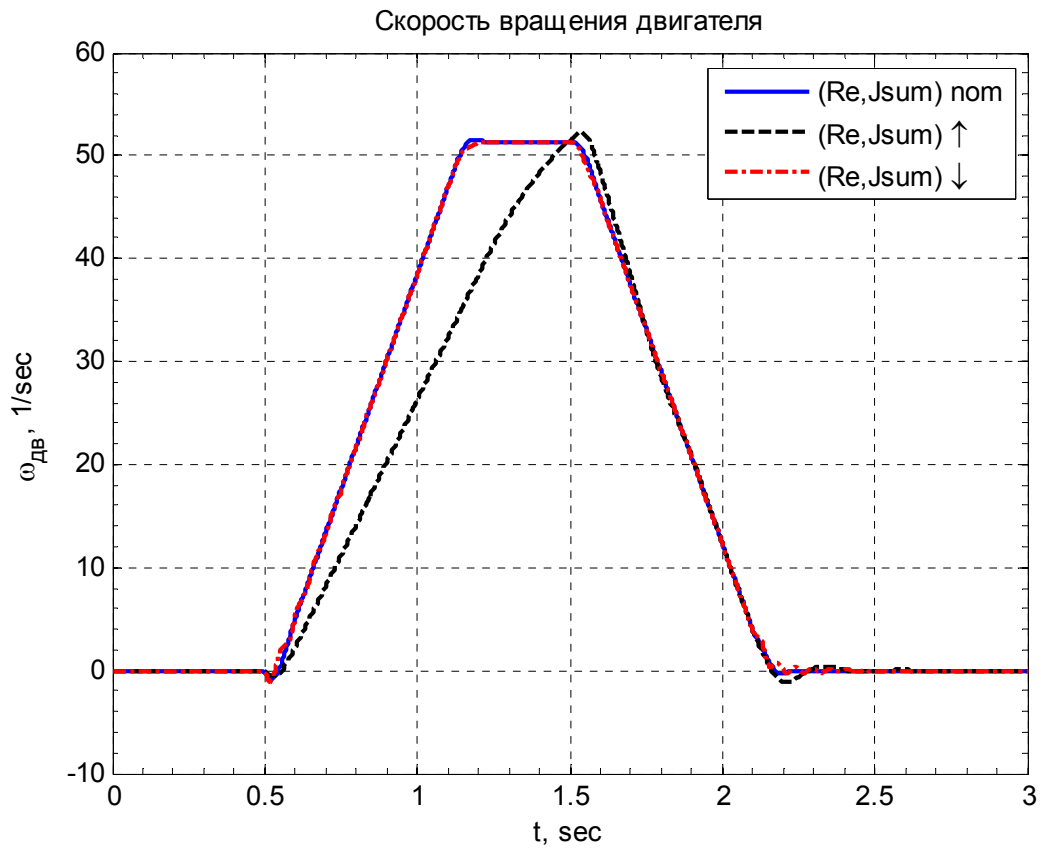


Рисунок 5.16 – Графики переходного процесса швидкості обертання двигуна при одночасній зміні  $R_3$  й  $J'_\Sigma$  в 2 рази

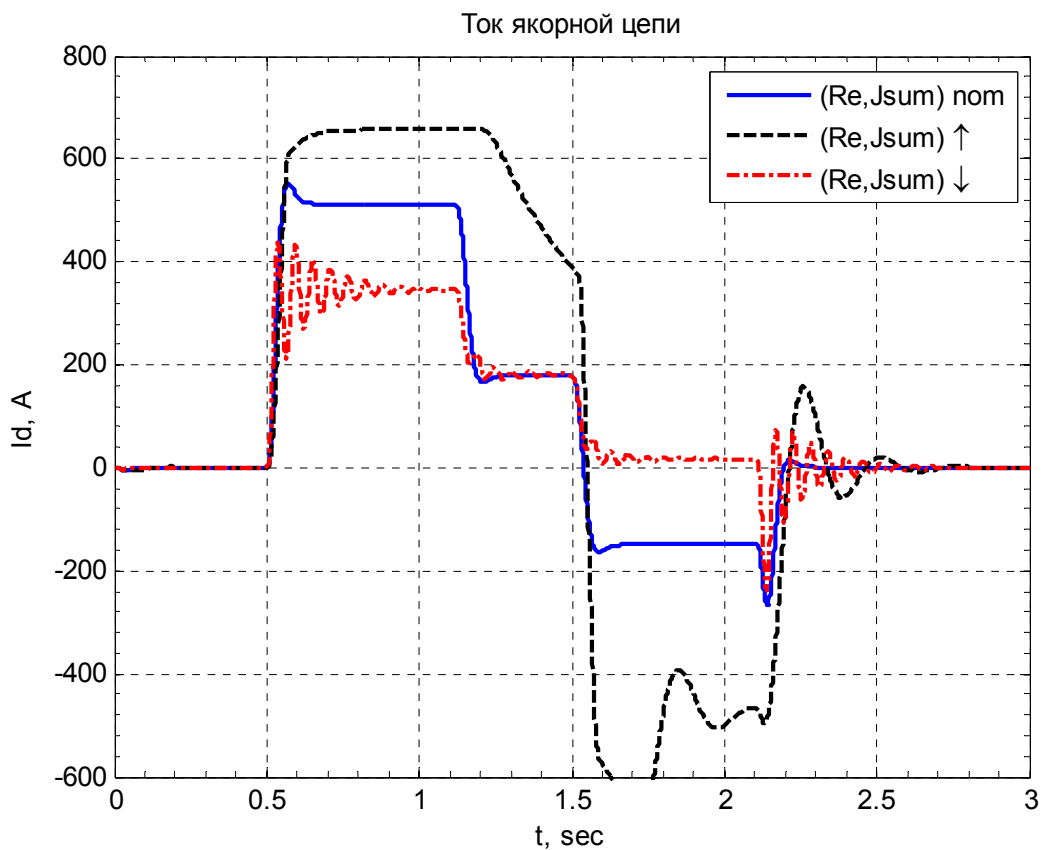


Рисунок 5.17 – Графік переходного процесу струму якоря при одночасній зміні  $R_3$  й  $J'_\Sigma$  в 2 рази

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1 Інструкція з охорони праці в прокатному виробництві

У діючих прокатних цехах для безпечного пересування працівників у відповідних місцях влаштовують проходи, перехідні містки та тунелі, виходи з яких повинні бути розташовані поза зоною дії мостових кранів.

Для переходу через головний з'єднувальний вал кожної лінії прокатних станів необхідно споруджувати перехідні містки. На безперервних станах споруджується один місток вздовж усіх клітей зі спуском до кожної з них.

Робочі кліті всіх станів (за винятком невеликих клітей дрібносортовних, дровових і тонколистових станів) повинні мати майданчики і сходи з поручнями. На невеликих станах можливе застосування переносних драбин.

Майданчики, призначені для обслуговування устаткування, повинні мати: відстань від настилу до конструктивних елементів приміщення не менше 2 м; у галереях, тунелях і на естакадах — 1,8 м; ширину — не менше 1 м, огороження по периметру висотою не менше ніж 1 м з суцільною металевою обшивкою на висоту 0,15 м від настилу та з додатковою огорожувальною планкою на висоті 0,5 м від настилу. Вимоги цього пункту розповсюджуються також на розміщені у приміщеннях відкриті галереї, містки та майданчики, призначені для переходу через устаткування або комунікації.

Робочі місця, проходи та проїзди не дозволяється захащувати сировиною, напівфабрикатами, готовою продукцією, іншими матеріалами. Межі проходів, проїздів або майданчиків для складування повинні бути позначені.

Підлога у прокатних цехах має бути рівною, стійкою до механічних і теплових впливів і мати неслизьке покриття.

Прибирання робочих місць і виробничих приміщень необхідно проводити після закінчення роботи зміни або в міру забруднення.

У прокатному виробництві на працівників можуть впливати такі шкідливі фактори:

- випромінювання в оптичному діапазоні (ультрафіолетове, видиме, інфрачервоне). При відсутності захисту можлива поразка органів зору;
- теплове (інфрачервоне) випромінювання виробів прокатного виробництва, інтенсивність якого залежить від температури попереднього підігріву виробів, їх габаритів, а також типу нагрівального пристрою. При відсутності засобів індивідуального захисту вплив теплового випромінювання може привести до порушень терморегуляції, навіть до теплового удару. Контакт із нагрітим металом може викликати опіки;
- іскри, бризки і викиди розплавленого металу і шлаку можуть стати причиною опіків;
- електромагнітні поля. Характер їх впливу на організм визначається інтенсивністю і тривалістю такого впливу;
- ультразвук, джерелами якого є різні ультразвукові установки. Дія ультразвуку залежить від його спектральної характеристики, інтенсивності і тривалості впливу;
- шум, джерелами якого є вентилятори, пневмопроводи, джерела живлення та ін. Вплив шуму на організм залежить від спектральної характеристики і рівня звукового тиску;
- напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- іонізація повітря робочої зони з утворенням позитивно та негативно заряджених іонів;
- статичне навантаження. У результаті перенапруги можуть виникати захворювання нервово-м'язового апарату плечового поясу.

У місцях переходу працівників через рольганги, шлепери, конвеєри та інші технічні пристрої необхідно встановлювати перехідні містки з поручнями.

Містки для переходу через зони з гарячим металом повинні мати теплоізолюючий настил, а з боків повинні бути перекриті щитами висотою не менше 1,8 м з листового заліза чи густої металевої сітки.

Підлога на робочих місцях біля ножиць, штемпельних пресів, фрезерних і свердлильних верстатів і інших агрегатів холодної обробки металу повинна



бути накрита ґратчастими дерев'яними настилами з відстанню між планками не більше 30 мм.

## **6.2 Вимоги безпеки перед початком роботи**

Пуск стана повинен здійснюватися після подавання двох відповідних звукових сигналів та одночасно світлової сигналізації, які добре чути і видно на усіх робочих місцях стана та на його допоміжних агрегатах.

До подачі сигналу про пуск стана уповноважена особа зобов'язана перевірити справність стана, всіх його огорожувальних і запобіжних пристроїв.

Розпорядження про пуск стана може бути дано тільки після узгодження з відповідною посадовою особою та після виведення працівників з устаткування стана.

Не дозволяється пуск зламаного стана, а також при наявності несправностей огорожувальних і запобіжних пристроїв.

Дозвіл про пуск стана може дати тільки відповідальна посадова особа, яка керує прокатуванням.

Для попередження травмування працівників прокатних станів необхідно щомісячно проводити змащення підшипників і муфт шпинделів, суворо дотримуватися режиму нагрівання зливоків і заготовок відповідно до інструкцій підприємств-виготовлювачів устаткування. Не дозволяється подавати для прокатування нерівномірно прогріті заготовки та зливки.

Не дозволяється застосовувати вивідні проводки без бокових лінійок.

## **6.3 Вимоги безпеки під час роботи**

У процесі прокатування необхідно слідкувати за станом кінця заготовки, що подається у кліть. При незадовільному стані кінець заготовки повинен бути обрізаний. При неможливості обрізання бракованого кінця заготовка не повинна допускатися до прокату.

Замірювання профілю прокатуваного металу під час роботи стана дозволяється здійснювати лише дистанційно, за допомогою відповідних

вимірювальних приладів.

Усі єднальні шпинделі, муфти та корінні вали прокатних станів повинні огороджуватися заготованими або суцільними щитами чи кожухами не тільки з боків, а й зверху. На великосортних і високошвидкісних станах запобіжні кожухи повинні витримувати удари шматків муфт, які розірвалися. Шпинделі блюмінгів і слябінгів повинні огороджуватися щільним бар'єром з обладнанням майданчика з поручнями для зручності обслуговування.

Непрацюючі калібри валків повинні бути закриті щитами.

Перевірку калібрів, зазору між валками, а також положення проводок потрібно проводити за допомогою відповідних пристроїв. Не дозволяється проводити ремонт стана під час його роботи.

На дрібносортних станах лінійного типу робочі місця необхідно огороджувати запобіжними стінками.

На велико- і середньосортних станах лінійного типу прокатне поле повинне огороджуватися суцільними бортами з ухилом у бік заготовки висотою, що на 200 мм перевищує висоту найбільшого прокатуваного профілю.

Для захисту від відлітаючих, під час прокату часток окалини, осколків металу та бризок шлаку перед валками на станині, необхідно влаштовувати надійні сітчасті щити чи щільні ланцюгові завіси, а вздовж лінії стана, проти прорізу у станині робочих рольгангів, — знімні щити з густої міцної сітки.

Проміжок між валками з боку, протилежного з'єднувальним шпинделям, закривається запобіжним щитом.

Для забезпечення умов безпеки у процесі прокатки повинна бути справна привалкова арматура (направляючі коробки з пропусками, вивідні проводки, проводкові столи, лінійки тощо). Ввідні коробки сортових станів повинні бути без бокових регулюючих болтів.

При ручному подаванні металу у валки кліщі вальцювальників повинні відповідати сортаменту прокатуваного металу та бути у справному стані. Для охолодження кліщів біля станів повинні бути встановлені ємності з проточною водою, температура якої не повинна перевищувати 45°C.

Настил підлоги в місцях прокатування і прибирання металу від лінійного

стана повинен бути рівним та виготовленим з негорючих матеріалів.

Шафи з автоматами електродвигунів рольгангів або інших механізмів станів і агрегатів повинні розташовуватися у доступних місцях.

Не дозволяється під час роботи стану:

- проводити огляд і ремонт механізмів, розміщених під підйомно-хиткими столами, які на час ремонту повинні бути надійно закріплені;

- входити в зону переміщення нагрітого металу;

- перебувати всередині огороження клітей.

Не дозволяється ходити по рольгангах. Переходити через них дозволяється тільки перехідними містками, настил яких повинен футеруватися вогнетривкою цеглою.

#### **6.4 Вимоги безпеки після закінчення робіт**

О всех неисправностях, обнаруженных во время работы станка, станочник должен поставить в известность мастера цеха и своего сменщика.

Средства индивидуальной защиты станочник должен сдать в кладовую.

Прибирання недокатів і браку, а також витяг зламаних валків повинні проводитися з дотриманням вимог безпеки та під керівництвом уповноваженої особи.

Недокати і брак повинні вчасно прибиратися у спеціально відведене для цього місце.

Під час прибирання окалини відкриті отвори над колодязями необхідно огороджувати переносними бар'єрами.

Не дозволяється прибирання окалини вручну з-під робочих клітей станів і рольгангів під час прокатування та ремонту.

Під час перевалки валків, прибирання недокатів або браку робота між операторами та працівниками повинна бути узгодженою.

Прибирання стружки від верстатів та з діляниць вальцетокарних майстерень, як правило, повинно бути механізованим.

## **6.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

Для уникнення аварійних ситуацій на прокатних станах необхідна установка автоматизованих систем контролю за роботою основного механічного й електричного устаткування з використанням електронно-обчислювальних машин.

Аварійно-рятувальні шляхи та аварійні виходи повинні бути вільні від сторонніх предметів і являти собою найкоротший можливий шлях до вільного простору, безпечної зони або до безпечного пункту збору чи евакуації.

Двері аварійних виходів повинні відчинятися назовні. Вони повинні замикатись так, щоб у разі потреби їх можна було легко відчинити без допоміжних засобів.

Аварійно-рятувальні шляхи та аварійні виходи, а також підходи і двері, що ведуть до них, повинні завжди бути вільними від сторонніх предметів і готовими до використання.

Аварійно-рятувальні засоби повинні зберігатись у готовому до використання стані в легкодоступних місцях і мати позначення відповідно до вимог до сигналів і знаків у підземних виробках і на шахтному транспорті.

## **6.6 Протипожежні заходи**

Забезпечення пожежної безпеки є частиною виробничої діяльності керівників усіх рівнів, робітників, що знаходить своє відображення в трудових договорах.

Керівники підприємств визначають обов'язки підпорядкованих керівників усіх рівнів щодо забезпечення пожежної безпеки, призначають відповідальних за пожежну безпеку ділянок і виробництв, технологічного й інженерного обладнання.

Загальні положення:

- усі нові робочі вступники до обжимоного цеху інженерно-технічні служачі робітники інструктуються про заходи пожежної безпеки. Особи, які не пройшли інструктаж, до роботи не допускаються;

- первинний протипожежний інструктаж проводиться майстром на робочому місці до початку виробничої діяльності робітника й оформляється в його особистому листі;

- повторний протипожежний інструктаж проводиться на робочому місці з усіма робітниками цеху кожний квартал по програмі первинного інструктажу.

Заходи пожежної безпеки для машинних залів і електромайстерень:

- машинні зали й електромайстерні з пожежної безпеки відносять до категорії «Г»;

- приміщення електрообладнання повинні втримуватися в чистоті. Електрообладнання необхідно чистити від пилу, масла й ін.;

- проходи й проїзди до механізмів повинні бути відкритими;

- збирання приміщень і встаткування із застосуванням керосину, бензину й інших легкозаймистих речовин забороняється;

- зберігання спецодягу на робочому місці заборонене;

- паління в електротехнічних приміщеннях дозволене лише в спеціально відведених для цього місцях;

При експлуатації електрообладнання заборонено:

- експлуатувати кабелі й проводи з ушкодженою ізоляцією;

- залишати під напругою електричні проводи й кабелі з оголеними кінцями;

- експлуатувати ушкоджені розетки, сполучні коробки, рубильники й т.п.;

- застосовувати нестандартні електронагрівальні прилади;

- ушкоджене електрообладнання необхідно негайно відключити, і не включати в приведення його в пожежонебезпечний стан.

Обслуговування й експлуатація технічних засобів пожежогасіння:

- кожний машинний зал і електромайстерні повинні бути укомплектовані щитом з набором протипожежного реманенту;

- розміщати вогнегасники необхідно в легкодоступних місцях, де виключене влучення на них сонячних променів та дія нагрівальних приладів;

- використані вогнегасники необхідно негайно відправляти на перезарядження;

- ящики для піску повинні бути укомплектовані совками й заповнені піском;

- пожежний реманент необхідно періодично оглядати;

- система пожежної сигналізації повинна постійно втримуватися в працездатному стані. Особливості гасіння пожежі на електрообладнанні:

- при викритті гнізда загоряння електриком повинен негайно повідомити головного по зміні й диспетчера цеху про місце й характер запалу. Оперативний персонал повинен негайно зняти напругу з електрообладнання яке зайнялося й приступитися до гасіння пожежі;

- при запаленні обмотки електрична машина повинна бути негайно відключена. Гасіння пожежі виконується вуглекислотними вогнегасниками, сухим піском;

- при запалі кабелів необхідно зняти напругу із щита керування й приступитися до гасіння пожежі, не допускаючи переходу вогнища на сусідні панелі й щити керування ;

- у випадку неможливості швидко зняти напругу, гасіння пожежі в електроустановці до 1000 В можна проводити без зняття напруги вуглекислотними вогнегасниками або піском;

- у випадку наступного поширення вогню негайно викликається пожежна команда.

Вогнегасники перебувають у спеціально відведених для них місцях.

Як організаційні заходи передбачені також проведення протипожежного інструктажу й призначення відповідальних осіб, що стежать за справним станом і постійною готовністю засобів пожежогасіння й сигналізації.

У холодний і перехідний періоди року кабіна опалюється електронагрівником, у теплий період провітрюється природною вентиляцією.

## ВИСНОВОК

В ході проектування була розглянута технологія роботи, призначення та особливості роботи електроприводу рольганга перед ножицями обтискного стану 1250. Була розрахована/перевірена потужність двигуна, динамічні та статичні моменти навантаження. У результаті розрахунку було обрано/перевірено двигун типу Д 814.

У ході розрахунку були знайдені необхідні значення динамічного моменту розгону і гальмування електропривода, що забезпечують необхідну динаміку механізму.

Для живлення двигунів обрано цифровий комплектний тиристорний електропривод шафового виконання концерну Siemens типу SIMOREG DC MASTER 6RM7078-6DS02, призначений для керування електродвигунами постійного струму.

У проекті розраховані параметри двоконтурної системи підпорядкованого керування, із зовнішнім контуром швидкості й внутрішнім контуром струму. Складена структурна схема швидкісної системи підпорядкованого регулювання.

На основі структурної схеми електропривода була розроблена математична модель. Проведене моделювання роботи ЕП у середовищі Matlab/Simulink, з номінальними параметрами, а також при варіації опору якірного ланцюга, еквівалентної індуктивності, коефіцієнта передачі ТП і сумарного моменту інерції, тим самим отримана оцінка якості перехідних процесів при зміні її динамічних процесів. Отримані перехідні процеси свідчать про правильність настроювання системи.

Досліджуваний електропривод із синтезованою системою керування повністю відповідає технологічним вимогам.

Установка нового обладнання буде коштувати дорожче, але застосування нового цифрового перетворювача дозволить зменшити час налагоджувальних робіт і забезпечити дистанційний моніторинг і контроль усіх процесів, що проходять у силовій частині електрообладнання.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Зеленов А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов / А.Б. Зеленов. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.
2. Переходченко В.А. Расчет мощности электродвигателей широкополосных станов горячей прокатки / В.А. Переходченко. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 384 с.
3. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие / В.С. Коцюбинский. – Алчесвк: ДГМИ, 2002. – 150 с.
4. Catalog DA 12 - 2004. DC motors Sizes 0,45 kW to 1610 kW.
5. Catalog DA 22 - 2002. SIMOREG DC MASTER 6RM70 Digital Converter Cabinet Units.
6. Инструкция по эксплуатации SIMOREG DC MASTER серия 6RA70. Микропроцессорные преобразователи на мощность 6 кВт - 1900 кВт для проводов постоянного тока с регулируемой скоростью.
7. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутра. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
8. А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
9. Пілецький В.Т. Вибір елементів реверсивних тиристорних перетворювачів електроприводів постійного струму. – К.: ІСДО, 1994. – 148 с.
10. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: Изд-во: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
11. Зимин Е.Н. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями / Е.Н. Зимин., В.Л. Кацевич, С.К. Козырев. – М: Энергоиздат, 1981. – 192 с.



12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
13. Половко А.М. MATLAB для студента / А.М. Половко, П.Н. Бутусов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.
14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowersystem и Simulink. – М: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
15. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.
16. Шевченко І.С. Динаміка складних електромеханічних систем: Навч. посібн. – І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Алчевськ: ДонДТУ, 2008. – 171 с.
17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей / Главное управление государственного энергетического надзора. – 4 –е изд., пераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 432 с.
18. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. - 2-е ига- перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. 1984. - 448 с.

## Додаток А

## Технічні данні перетворювача SIMOREG DC Master 6RM7078-6FV02

## SIMOREG DC MASTER 6RM70

### Digital Converter Cabinet Units

#### Selection and ordering data

Three-phase connection		DC connection, armature circuit			Field current connection		SIMOREG cabinet unit		
Rated input voltage V	Rated input current A	Rated DC voltage V	Rated DC current A	Rated output kW	DC field voltage V	DC field current A	Order No.	Weight ca. kg	
<b>SIMOREG cabinet units for four-quadrant operation (B6)A (B6)C</b>									
3-ph. 400	13	420	15	6.3	325	3	6RM7013-6DV02	110	
	25		30	12.6		5	6RM7018-6DV02	120	
	50		60	25		10	6RM7025-6DV02	125	
	75		90	38		10	6RM7028-6DV02	185	
	104		125	52.5		10	6RM7031-6DV02	200	
	175		210	88		15	6RM7075-6DV02	205	
	233		280	118		15	6RM7078-6DV02	215	
	332		400	168		25	6RM7081-6DV02	270	
	498		600	252		25	6RM7085-6DV02	290	
	705		850	357		30	6RM7087-6DV02	455	
	998		1200	504		30	6RM7091-6DV02	525	
1326	1600	672	40	6RM7093-4DV02	640				
1658	2000	840	40	6RM7095-4DV02	695				
3-ph. 460	25	480	30	14.4	373	5	6RM7018-6FV02	120	
	50		60	28.8		10	6RM7025-6FV02	125	
	75		90	43		10	6RM7028-6FV02	185	
	104		125	60		10	6RM7031-6FV02	200	
	175		210	100		15	6RM7075-6FV02	205	
	233		280	134		15	6RM7078-6FV02	220	
	375		450	216		25	6RM7082-6FV02	270	
	498		600	288		25	6RM7085-6FV02	290	
	705		850	408		30	6RM7087-6FV02	455	
	995		1200	576		30	6RM7091-6FV02	495	
	50		520	60		31		10	6RM7025-6GV02
104	125	65		10	6RM7031-6GV02	275			
175	210	109		15	6RM7075-6GV02	295			
332	400	208		25	6RM7081-6GV02	415			
498	600	312		25	6RM7085-6GV02	480			
705	850	442		30	6RM7087-6GV02	655			
912	1100	572		30	6RM7090-6GV02	730			
1326	1600	832		40	6RM7093-4GV02	870			
1658	2000	1040		40	6RM7095-4GV02	890			
630	725	760		551		30		6RM7086-6KV02	685
1000		1000		725		30		6RM7090-6KV02	730
1244		1500	1088	40		6RM7093-4KV02	870		
1658		2000	1450	40		6RM7095-4KV02	915		
788	875	950	831		30	6RM7088-6LV02	765		
1244		1500	1313		40	6RM7093-4LV02	895		
1575		1900	1663		40	6RM7095-4LV02	925		

## 7 КОРЕЛЯЦІЙНІ ФУНКЦІЇ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Можливо припускати, що зовнішні впливи (керуючі дії та збурення), є визначеними відомими функціями часу. У цих випадках стан системи, що описується звичайними диференціальними рівняннями, на будь-який момент часу  $t$  однозначно визначається станом системи на попередній момент часу  $t_0 < t$ . Звичайно вибирають  $t_0 = 0$  і кажуть, що стан системи однозначно визначається початковими умовами і може бути точно передбаченим для будь-якого моменту часу  $t$ . Такі системи називаються *детермінованими*.

Однак на практиці часто зустрічаються впливи, закон змінювання яких має *випадковий* характер і не може бути наперед точно визначений. Такими випадковими впливами є, наприклад, добові зміни навантаження енергосистеми; пориви вітру, що діють на літак; удари хвиль у гідродинамічних системах; флуктуаційні шуми у радіотехнічних пристроях тощо. При випадкових впливах даних про стан системи на момент  $t_0$  недостатньо, щоб судити про її стан на подальший момент часу  $t > t_0$ .

Випадкові дії можуть прикладатися до системи зовні (*зовнішні дії*) або виникати всередині деяких її елементів (*внутрішні шуми*). Випадкові зміни властивостей системи звичайно можна звести до еквівалентного впливу деяких випадкових перешкод, що діють на неї, тому далі будемо вважати, що на систему діють тільки зовнішні випадкові впливи.

Розрахунок систем автоматичного керування при випадкових діях виконують за допомогою спеціальних *статистичних методів*. САК, що спроектована на основі цих методів, буде забезпечувати виконання вимог, до цієї системи не тільки для одного детермінованого впливу, а для цілої сукупності впливів, що задані за допомогою статистичних характеристик.

Статистичні методи дозволяють з'ясувати лише закономірності, що є притаманними випадковим явищам масового характеру. Наприклад, якщо

помилка системи має випадковий характер, то точне її значення на будь-який момент часу за допомогою статистичного розрахунку передбачити неможливо. Однак, якщо провести багато вимірювань помилки за однакових умов, то, наприклад, середнє значення помилки можна шляхом статистичного розрахунку передбачити з достатньою точністю.

## 7.1 Випадкові процеси та їх основні статистичні характеристики

Функція, значення якої при кожному значенні незалежної змінної є випадковою величиною, називається *випадковою функцією*. Випадкові функції, для яких змінною є час  $t$ , називають *випадковими процесами* або *стохастичними процесами*.

Якщо, наприклад, проведено  $n$  окремих випробувань, то у результаті випадковий процес  $X(t)$  може набути  $n$  різних невинцидованих (регулярних) функцій часу  $x_i(t)$ , де  $i = 1, 2, \dots, n$ . Будь-яка з цих функцій  $x_i(t)$ , якій виявився рівним випадковий процес  $X(t)$  у результаті випробування, називається *реалізацією випадкового процесу* (або можливим значенням випадкового процесу). Сказати наперед, за якою з реалізацій піде процес, неможливо.

Розглянемо, наприклад, випадковий дрейф на виході підсилювача постійного струму при вхідній напрузі, що дорівнює нулю. Щоб вивчити характеристики дрейфу, можна взяти  $n$  однакових підсилювачів, помістити їх у однакові умови роботи, одночасно ввімкнути і отримати  $n$  осцилограм дрейфу на виходах підсилювачів. Кожна з осцилограм є конкретною реалізацією  $x_i(t)$  випадкового процесу  $X(t)$ . Для будь-якого фіксованого моменту часу  $t = t_1$  реалізація випадкового процесу  $x_i(t_1)$  є конкретною величиною, а значення випадкової функції  $X(t_1)$  є випадковою величиною, що називається *перерізом випадкового процесу* на момент часу  $t_1$ . Тому не можна стверджувати, що випадковий процес на даний момент часу має деяке детерміноване значення, можна говорити лише про ймовірність того, що на даний момент часу значення

випадкового процесу, як випадкової величини, буде знаходитись у певних границях.

Статистичні методи вивчають не кожену з реалізацій  $x_1(t)$ , що утворюють множину  $X(t)$ , а властивості всієї множини у цілому. Тому під час дослідження автоматичної системи керування роблять висновок про її поведінку не відносно будь-якого певного впливу, а відносно цілої сукупності впливів.

Статистичні властивості випадкової величини  $x$  визначають за її *функцією розподілу* (інтегральним законом розподілу)  $F(x)$  або за *щільністю ймовірності* (диференціальним законом розподілу)  $w(x)$ .

Випадкові величини можуть мати різні закони розподілу: рівномірний, нормальний, експоненціальний тощо. У багатьох задачах автоматичного керування дуже часто використовують *нормальний* закон розподілу (закон Гаусса), який має місце, якщо випадкова величина визначається сумарним ефектом від впливу великої кількості різних незалежних факторів.

Відомо, що випадкова величина  $x$  при нормальному законі розподілу повністю визначається *математичним сподіванням* (середнім значенням)  $m_x$  і *середнім квадратичним відхиленням*  $\sigma_x$ .

Аналітичний вираз функції розподілу в цьому випадку має вигляд:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-\infty}^x e^{-(x-m_x)^2/(2\sigma_x^2)} dx. \quad (1)$$

Аналітичний вираз щільності ймовірності для нормального закону розподілу:

$$w(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-(x-m_x)^2/(2\sigma_x^2)}. \quad (2)$$

Для випадкового процесу використовують також поняття функції розподілу  $F(x, t)$  і щільності ймовірності  $w(x, t)$ , що залежать від фіксованого моменту часу  $t$  і від деякого вибраного рівня  $x$ , тобто є функціями двох змінних:  $x$  і  $t$ .

Розглянемо випадкову величину  $X(t_1)$ , тобто переріз випадкового процесу на момент часу  $t_1$ . *Одномірною функцією розподілу* (функцією розподілу

першого порядку) випадкового процесу  $X(t)$  називають ймовірність того, що поточне значення випадкового процесу  $X(t_1)$  на момент часу  $t_1$  не перевищує деякого заданого рівня (числа)  $x_1$ , тобто:

$$F_1(x_1, t_1) = P\{X(t_1) \leq x_1\}. \quad (3)$$

Якщо функція  $F_1(x_1, t_1)$  має частинну похідну за  $x_1$ , тобто:

$$w_1(x_1, t_1) = \partial F_1(x_1, t_1) / \partial x_1, \quad (4)$$

то функцію  $w_1(x_1, t_1)$  називають *одномірною щільністю ймовірності* (щільністю ймовірності першого порядку) випадкового процесу.

Величина

$$w_1(x_1, t_1) dx_1 = P\{x_1 < X(t_1) \leq x_1 + dx_1\} \quad (5)$$

являє собою ймовірність того, що  $X(t)$  знаходиться на момент часу  $t = t_1$  в інтервалі від  $x_1$  до  $x_1 + dx_1$ .

Прикладом випадкового процесу, що повністю характеризується одномірною щільністю ймовірності, є так званий *білий шум*. Значення  $X(t)$  у цьому процесі, взяті на різні моменти часу  $t$ , цілковито незалежні одне від одного, як би близько не були вибрані ці моменти часу. Це означає, що крива білого шуму містить викиди, що затухають за нескінченно малі проміжки часу.

Функції  $F_1(x, t)$  і  $w_1(x, t)$  є простішими статистичними характеристиками випадкового процесу. Вони характеризують випадковий процес ізольовано в окремих його перерізах, не розкриваючи взаємного зв'язку між перерізами випадкового процесу, тобто між можливими значеннями випадкового процесу на різні моменти часу.

Знання цих функцій ще недостатньо для опису випадкового процесу в загальному випадку. Необхідно охарактеризувати також взаємний зв'язок випадкових величин на різні моменти часу.

Розглянемо тепер випадкові величини  $X(t_1)$  і  $X(t_2)$ , що належать до двох різних моментів часу  $t_1$  і  $t_2$  спостереження випадкового процесу.

Ймовірність того, що  $X(t)$  буде не більше  $x_1$  при  $t=t_1$  і не більше  $x_2$  при  $t=t_2$ , тобто

$$F_2(x_1, t_1; x_2, t_2) = P\{X(t_1) \leq x_1; X(t_2) \leq x_2\}, \quad (6)$$

називають *двовірною функцією розподілу* (функцією розподілу другого порядку).

Якщо функція  $F_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$  має частинні похідні за  $x_1$  і  $x_2$ , тобто:

$$w_2(x_1, t_1; x_2, t_2) = \partial^2 F_2(x_1, t_1; x_2, t_2) / (\partial x_1 \partial x_2), \quad (7)$$

то функцію  $w_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$  називають *двовірною щільністю ймовірності* (щільністю ймовірності другого порядку) випадкового процесу.

Величина

$$\begin{aligned} w_2(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2 = \\ = P\{x_1 < X(t_1) \leq x_1 + dx_1; x_2 < X(t_2) \leq x_2 + dx_2\} \end{aligned} \quad (8)$$

являє собою ймовірність того, що  $X(t)$  знаходиться на момент часу  $t = t_1$  в інтервалі від  $x_1$  до  $x_1 + dx_1$ , а на момент часу  $t = t_2$  - в інтервалі від  $x_2$  до  $x_2 + dx_2$ .

Двовірною щільністю ймовірності (7) повністю характеризуються так звані *марковські випадкові процеси*, для яких знання значення процесу на момент часу  $t_k$  містить усю можливу інформацію про подальший хід процесу.

Аналогічно можна ввести поняття про  $n$ -мірну функцію розподілу і  $n$ -мірну щільність ймовірності. Чим вище порядок  $n$ , тим повніше описуються статистичні властивості випадкового процесу, але багатомірні закони розподілу є громіздкими і незручними для використання. Тому частіше обмежуються випадками, коли для опису випадкового процесу достатньо знати тільки одномірний чи двовірний закон розподілу.

У практиці досліджень систем автоматичного керування широкі розповсюдження отримали порівняно більш прості, хоча й менш повні характеристики випадкових процесів, аналогічні числовим характеристикам випадкових величин: математичне сподівання, дисперсія, середнє значення квадрата випадкового процесу, кореляційна функція, спектральна щільність та інші.

*Математичним сподіванням* (середнім значенням)  $m_x(t)$  випадкового процесу  $X(t)$  називають величину:

$$\tilde{x}(t) = m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x w_1(x, t) dx, \quad (9)$$

де  $w_1(x, t)$  – одномірний щільності ймовірності випадкового процесу  $X(t)$ .

Математичне сподівання випадкового процесу  $X(t)$  являє собою деяку не випадкову (регулярну) функцію часу  $m_x(t)$ , біля якої групуються і відносно якої коливаються всі реалізації даного випадкового процесу. Математичне сподівання називають *середнім значенням випадкового процесу за множиною* (статистичним середнім), оскільки воно являє собою ймовірносно усереднене значення нескінченної множини реалізацій випадкового процесу.

*Середнім значенням квадрата* випадкового процесу називають величину:

$$\tilde{x}^2(t) = M[\{X(t)\}^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 w_1(x, t) dx. \quad (10)$$

Часто розглядають так званий *центрований випадковий процес*  $\overset{\circ}{X}(t)$  – відхилення випадкового процесу  $X(t)$  від його середнього значення  $m_x(t)$ :

$$\overset{\circ}{X}(t) = X(t) - m_x(t). \quad (11)$$

Тоді випадковий процес  $X(t)$  можна розглядати як суму двох складових: регулярної складової, що дорівнює математичному сподіванню  $m_x(t)$ , і центрованої випадкової складової  $\overset{\circ}{X}(t)$ , тобто:

$$X(t) = m_x(t) + \overset{\circ}{X}(t). \quad (12)$$

Зрозуміло, що математичне сподівання центрованого випадкового процесу дорівнює нулю:

$$M[\overset{\circ}{X}(t)] = M[X(t) - m_x(t)] = m_x(t) - m_x(t) = 0. \quad (13)$$

Для того, щоб урахувати ступінь розкидання реалізацій випадкового процесу відносно його середнього значення, застосовують поняття *дисперсії* випадкового процесу, яка дорівнює математичному сподіванню квадрата центрованого випадкового процесу:



$$D_x(t) = M[\{X(t)\}^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \{x - m_x(t)\}^2 w_1(x, t) dx. \quad (14)$$

Дисперсія випадкового процесу є не випадковою (регулярною) функцією  $D_x(t)$ , значення якої на кожний момент часу  $t_k$  дорівнює дисперсії відповідного перерізу  $X(t_k)$  випадкового процесу.

Математичне сподівання  $m_x(t)$ , дисперсія  $D_x(t)$  і середнє значення квадрата  $\tilde{x}^2(t)$  випадкового процесу зв'язані співвідношенням:

$$\tilde{x}^2(t) = D_x(t) + m_x^2(t). \quad (15)$$

Із (15) видно, що середнє значення квадрата випадкового процесу  $\tilde{x}^2(t)$  деякою мірою враховує і середнє значення випадкового процесу, і ступінь розкидання його реалізацій відносно цього середнього значення, тому воно широко використовується як оцінка точності систем автоматичного керування.

Іноді зручно використовувати статистичні характеристики випадкового процесу, які мають ту саму розмірність, що й сама випадкова величина:

- *середнє квадратичне значення* випадкового процесу:

$$x_{c.k.}(t) = \sqrt{\tilde{x}^2(t)} = \sqrt{D_x(t) + m_x^2(t)}, \quad (16)$$

що дорівнює арифметичному значенню квадратного кореня із середнього значення квадрата випадкового процесу;

- *середнє квадратичне відхилення* випадкового процесу:

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}, \quad (17)$$

що дорівнює арифметичному значенню квадратного кореня із дисперсії випадкового процесу.

Характеристику (17) використовують тільки для центрованих випадкових процесів.

Знання вказаних вище статистичних характеристик часто є достатнім для розв'язання багатьох задач теорії автоматичного керування.

## 7.2 Кореляційні функції випадкових процесів

Математичне сподівання й дисперсія є важливими характеристиками випадкового процесу, але вони не дають достатнього уявлення про те, який характер матимуть його окремі реалізації. Тобто для двох випадкових процесів, що мають цілковито різні структури, значення математичного сподівання й дисперсії можуть бути однаковими.

Аби охарактеризувати внутрішню структуру випадкового процесу, тобто врахувати зв'язок між його значеннями на різні моменти часу або, інакше кажучи, врахувати ступінь мінливості випадкового процесу, необхідно ввести поняття кореляційної функції випадкового процесу.

Кореляційною функцією випадкового процесу  $X(t)$  називають не випадкову функцію двох аргументів  $R_x(t_1, t_2)$ , яка для кожної пари довільно вибраних значень аргументів (моментів часу)  $t_1$  і  $t_2$  дорівнює математичному сподіванню добутку двох випадкових величин  $\overset{\circ}{X}(t_1)$  і  $\overset{\circ}{X}(t_2)$  відповідних перерізів випадкового процесу:

$$R_x(t_1, t_2) = M[\overset{\circ}{X}(t_1)\overset{\circ}{X}(t_2)]. \quad (18)$$

Різні випадкові процеси діляться на *стаціонарні* й *нестационарні* залежно від того, як з часом змінюються їх статистичні характеристики. Розділяють стаціонарність у вузькому і в широкому розумінні.

*Стаціонарним у вузькому розумінні* називають випадковий процес  $X(t)$ , якщо його  $n$ -мірні функції розподілу й щільності ймовірності при будь-якому  $n$  не залежать від зсуву всіх точок  $t_1, t_2, \dots, t_n$  уздовж осі часу на однакову величину  $\tau$ , тобто:

$$\begin{cases} F_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) = F_n(x_1, t_1 + \tau; x_2, t_2 + \tau; \dots; x_n, t_n + \tau); \\ w_n(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) = w_n(x_1, t_1 + \tau; x_2, t_2 + \tau; \dots; x_n, t_n + \tau). \end{cases} \quad (19)$$

Це означає, що статистичні характеристики випадкового стаціонарного процесу незмінні у часі.

Стационарний випадковий процес є своєрідним аналогом усталеного процесу в детермінованих системах. Будь-який перехідний процес не є стаціонарним.

*Стационарним у широкому розумінні* називають випадковий процес  $X(t)$ , математичне сподівання якого є постійним:

$$m_x(t) = M[X(t)] = \text{const}, \quad (20)$$

а кореляційна функція залежить тільки від однієї змінної – різниці аргументів  $\tau = t_2 - t_1$ ; при цьому кореляційну функцію позначають:

$$R_x(\tau) = R_x(t_1, t_1 + \tau) = M[\overset{\circ}{X}(t_1)\overset{\circ}{X}(t_1 + \tau)]. \quad (21)$$

Процеси, що є стаціонарними у вузькому розумінні, обов'язково є стаціонарними в широкому розумінні, однак, супротивне твердження не є вірним.

Для випадкового процесу з нормальним законом розподілу математичне сподівання й кореляційна функція цілком визначають його  $n$ -мірну щільність ймовірності, тому *для нормальних випадкових процесів поняття стаціонарності в широкому й вузькому розумінні співпадають*.

Теорія стаціонарних процесів розроблена найбільш повно і дозволяє порівняно просто виконувати розрахунки для багатьох практичних випадків. Тому припущення щодо стаціонарності іноді доцільно робити й для тих випадків, коли випадковий процес не є стаціонарним, але на інтервалі часу, що розглядають, статистичні характеристики сигналів не встигають істотно змінитися.

У теорії випадкових процесів використовують два поняття середніх значень:

- *середнє значення за множиною* (математичне сподівання) (9), що визначається на підставі спостережень за множиною реалізацій випадкового процесу в один й той самий момент часу; середнє значення за множиною позначають хвилястою лінією над виразом, що описує випадкову функцію, тобто  $\tilde{x}(t)$ ;

- *середнє значення за часом*, що визначається на підставі спостереження за окремою реалізацією випадкового процесу  $x(t)$  протягом достатньо тривалого часу  $T$ ; середнє значення за часом позначають прямою рисою над виразом, що описує випадкову функцію, і визначають за формулою:

$$\bar{x}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt, \quad (22)$$

якщо ця границя існує.

Взагалі, для одного й того самого випадкового процесу величини  $\tilde{x}(t)$  і  $\bar{x}(t)$  є різними. Однак існує клас стаціонарних випадкових процесів, що називають *ергодичними*, для яких середнє за множиною дорівнює середньому за часом, тобто:

$$\tilde{x}(t) = \bar{x}(t). \quad (23)$$

Кореляційна функція  $R_x(\tau)$  ергодичного стаціонарного випадкового процесу  $X(t)$  необмежено зменшується за модулем при  $|\tau| \rightarrow \infty$ .

Для ергодичних випадкових процесів за умови, що середнє значення випадкового процесу дорівнює нулю ( $\bar{x} = 0$ ), кореляційну функцію можна визначити за виразом:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t + \tau) dt.$$

Властивість ергодичності має дуже велике практичне значення. Для визначення статистичних властивостей деяких об'єктів, якщо важко здійснити одночасне спостереження за ними у довільно вибраний момент часу (наприклад, за наявності одного дослідного зразка), його можна замінити тривалим спостереженням за одним об'єктом. Іншою мовою, окрема реалізація ергодичного випадкового процесу на нескінченному інтервалі часу цілком визначає весь випадковий процес із його нескінченними реалізаціями. Цей факт лежить в основі методу *експериментального визначення* кореляційної функції стаціонарного випадкового процесу за одною реалізацією.

(24)

Крім того, для ергодичних випадкових процесів можна встановити дуже важливий зв'язок між дисперсією й кореляційною функцією – *дисперсія стаціонарного випадкового процесу дорівнює початковому значенню кореляційної функції*:

$$D_x = R_x(0) = \text{const.} \quad (25)$$

Звідси випливає, що дисперсія стаціонарного випадкового процесу є постійною, отже постійним є й середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = \text{const.} \quad (26)$$

Статистичні властивості двох випадкових процесів  $X(t)$  і  $G(t)$  можна охарактеризувати *взаємною кореляційною функцією*  $R_{xg}(t_1, t_2)$ , яка для кожної пари довільно вибраних значень аргументів  $t_1$  і  $t_2$  дорівнює:

$$R_{xg}(t_1, t_2) = M[\overset{\circ}{X}(t_1)\overset{\circ}{G}(t_2)]. \quad (27)$$

Для ергодичних випадкових процесів можна записати:

$$R_{xg}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{x(t) - \bar{x}\} \{g(t + \tau) - \bar{g}\} dt, \quad (28)$$

де  $x(t)$  і  $g(t)$  – будь-які реалізації стаціонарних випадкових процесів  $X(t)$  і  $G(t)$  відповідно.

Взаємна кореляційна функція (28) характеризує взаємний статистичний зв'язок двох випадкових процесів  $X(t)$  і  $G(t)$  на різні моменти часу, що віддалені один від одного на відрізок часу  $\tau$ . Значення  $R_{xg}(0)$  характеризує цей зв'язок на один і той самий момент часу.

Якщо випадкові процеси  $X(t)$  і  $G(t)$  статистично не зв'язані між собою і мають нульові середні значення, то їх взаємна кореляційна функція для всіх  $\tau$  дорівнює нулю. Однак, супротивне твердження про те, що за нульової взаємної кореляційної функції процеси є незалежними, слухне тільки для процесів із нормальним законом розподілу.

Наведемо без доказу деякі основні властивості кореляційних функцій  $R_x(\tau)$ .

1. Початкове значення кореляційної функції дорівнює дисперсії випадкового процесу:

$$R_x(0) = D_x.$$

2. Значення кореляційної функції за будь-якого  $\tau$  не може перевищувати її початкового значення, тобто:

$$R_x(0) \geq |R_x(\tau)|. \quad (29)$$

3. Кореляційна функція є непарною функцією  $\tau$ , тобто:

$$R_x(\tau) = R_x(-\tau). \quad (30)$$

4. Кореляційну функцію суми випадкових процесів  $Z(t) = X(t) + G(t)$  визначають виразом:

$$R_z(\tau) = R_x(\tau) + R_g(\tau) + R_{xg}(\tau) + R_{gx}(\tau), \quad (31)$$

де  $R_{xg}(\tau)$  і  $R_{gx}(\tau)$  – взаємні кореляційні функції.

5. Кореляційна функція сталої величини  $x(t) = A_0$  дорівнює квадрату цієї сталої величини  $A_0^2$  (рис.1, а).

6. Кореляційна функція періодичної функції, наприклад  $x(t) = A \sin(\omega_1 t + \varphi)$ , являє собою косинусоїду (рис. 1, д), що має ту саму частоту  $\omega_1$ , що й  $x(t)$ , і не залежну від зсуву фази  $\varphi$ , тобто:

$$R_x(\tau) = (A^2/2) \cos \omega_1 \tau, \quad (32)$$

7. Кореляційна функція часової функції, що розкладається у ряд Фур'є:

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k),$$

має такий вигляд:

$$R_x(\tau) = A_0^2 + \sum_{k=1}^n (A_k^2 / 2) \cos(\omega_k \tau). \quad (33)$$

8. Типову кореляційну функцію стаціонарного випадкового процесу (рис. 12.1, б) можна апроксимувати таким аналітичним виразом:

$$R_x(\tau) = R_x(0) e^{-\alpha|\tau|} = D_x e^{-\alpha|\tau|}. \quad (34)$$

де  $D_x$  – дисперсія,  $\alpha = \text{const}$  – параметр згасання.

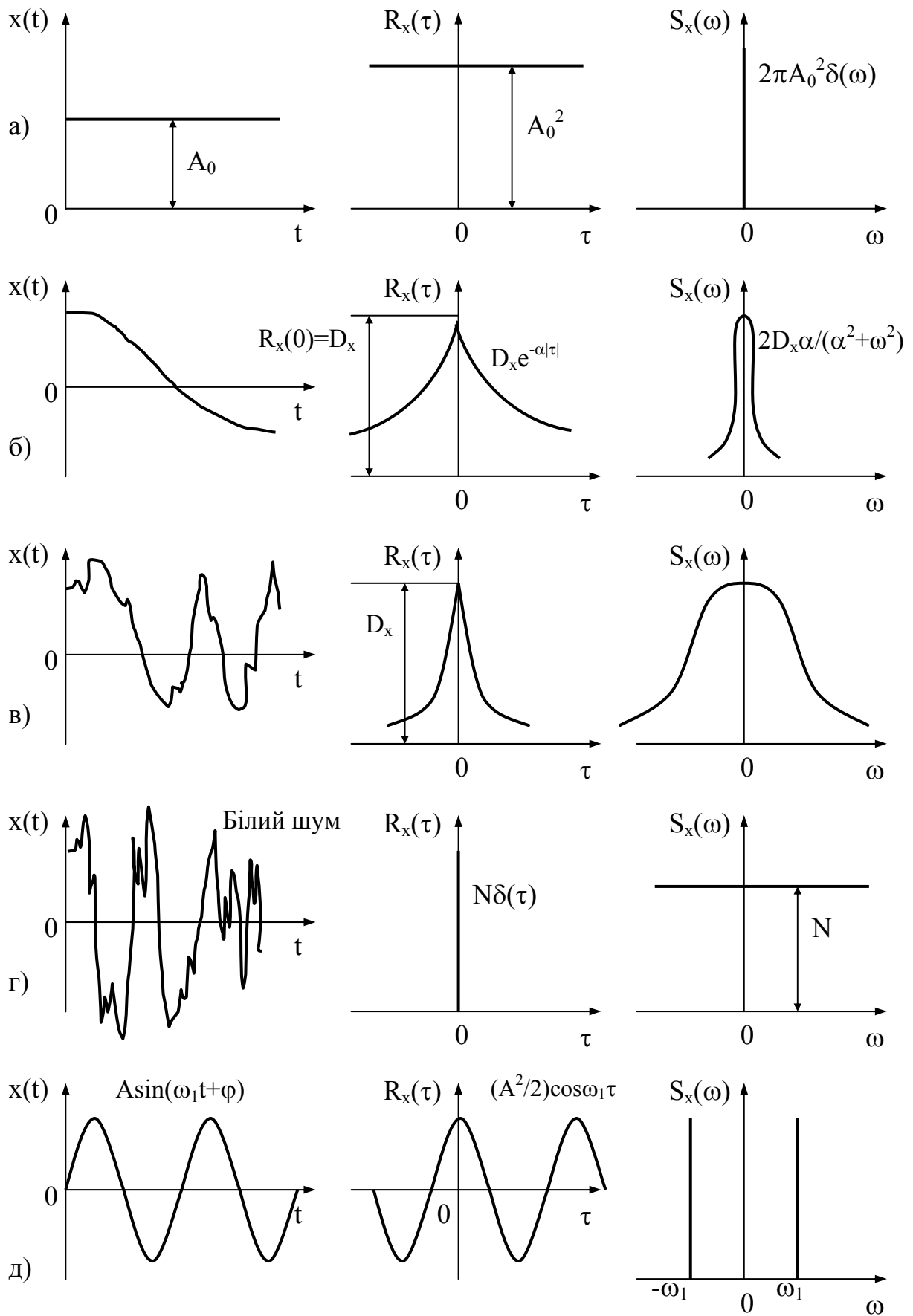


Рис. 7.1 – Реалізації випадкового процесу  $x(t)$  і відповідні їм кореляційні функції  $R_x(\tau)$  і спектральні щільності  $S_x(\omega)$

Зі збільшенням  $\tau$  зв'язок між  $X(t)$  і  $X(t+\tau)$  послаблюється і кореляційна функція стає менше. На рис. 1, б, в наведені дві кореляційні функції й дві реалізації випадкового процесу, що їм відповідають. Легко помітити, що кореляційна функція, яка відповідає випадковому процесу з більш тонкою (більш мінливою) структурою, зменшується швидше. Іншою мовою, чим більш високі частоти присутні у випадковому процесі, тим швидше убиває відповідна кореляційна функція.

9. Кореляційна функція стаціонарного випадкового процесу, на який накладена періодична складова з частотою  $\omega_k$ , також буде містити періодичну складову тієї самої частоти.

10. Чим слабший зв'язок між  $X(t)$  і  $X(t+\tau)$ , тим швидше убиває кореляційна функція  $R_x(\tau)$ . Для білого шуму, де цей зв'язок відсутній, кореляційна функція являє собою  $\delta$ -функцію (рис. 1, г):

$$R_x(\tau) = N\delta(\tau), \quad (35)$$

де  $N = \text{const}$ .

Зазначимо, що випадковий процес типа білого шуму є фізично нереальним, оскільки йому відповідає нескінченно велике значення дисперсії й середнє значення квадрата випадкової величини  $D_x = \bar{x}^2 = R_x(0) = \infty$ , а отже, й нескінченно велика потужність.

Під час розв'язання практичних задач часто використовують *нормовану кореляційну функцію*:

$$\rho_x(\tau) = R_x(\tau)/D_x. \quad (36)$$

Ця функція зручна тим, що завжди  $\rho_x(0) = 1$ .

Іноді розглядають нормовану взаємну кореляційну функцію:

$$\rho_{xg}(\tau) = R_{xg}(\tau) / \sqrt{R_x(0)R_g(0)}, \quad (37)$$

причому можна показати, що  $R_x(0)R_g(0) \geq R_{xg}^2(\tau)$ .

Кореляційні функції випадкових процесів можна визначити за експериментальними даними (за експериментальною реалізацією випадкового процесу). Але такий спосіб є трудомістким, тому на практиці звичайно



кореляційні функції визначають за допомогою спеціальних приладів – *кореляторів*, що автоматично обчислюють середні добутки двох координат осцилограм, які знаходяться одна від одної на відстані  $\tau$ .

### 3 Спектральні щільності випадкових процесів

Під час дослідження автоматичних систем керування користуються ще однією характеристикою стаціонарного випадкового процесу – *спектральною щільністю*  $S_x(\omega)$ , яка у багатьох випадках є більш зручною, ніж кореляційна функція.

Термін “спектральна щільність” походить з теорії електричних коливань. *Фізичний зміст* спектральної щільності полягає в тому, що вона характеризує розподіл потужності сигналу за частотним спектром (кожна елементарна потужність, яка відповідає нескінченно малій ділянці спектра від  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , пропорційна значенню функції  $S_x(\omega)$  для даної частоти  $\omega$ ). Спектральну щільність можна визначити експериментально через середню величину квадрата амплітуди гармонік реалізації випадкового процесу. Прилади, що застосовують для цього, називаються *спектрометрами*.

Аналітично спектральна щільність  $S_x(\omega)$  випадкового процесу  $X(t)$  визначається як перетворення Фур’є кореляційної функції  $R_x(\tau)$ :

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (38)$$

За допомогою формули Ейлера  $e^{-j\omega\tau} = \cos\omega\tau - j\sin\omega\tau$  вираз (38) можна подати у вигляді:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos\omega\tau d\tau - j \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \sin\omega\tau d\tau. \quad (39)$$

Оскільки  $R_x(\tau) \sin\omega\tau$  - непарна функція  $\tau$ , то другий інтеграл у виразі (39) дорівнює нулю. Тоді з урахуванням, що  $R_x(\tau) \cos\omega\tau$  - парна функція  $\tau$ , отримаємо:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau = 2 \int_0^{+\infty} R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (40)$$

Оскільки  $\cos \omega \tau = \cos(-\omega \tau)$ , то з (12.40) випливає:

$$S_x(\omega) = S_x(-\omega). \quad (41)$$

Таким чином, спектральна щільність  $S_x(\omega)$  є дійсною і парною функцією частоти  $\omega$ , тому графік цієї функції завжди симетричний відносно осі ординат.

Якщо спектральна щільність відома, то за формулою оберненого перетворення Фур'є можна знайти відповідну кореляційну функцію:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cos \omega \tau d\omega. \quad (42)$$

З урахуванням (12.25) і (12.42) можна встановити важливий зв'язок між дисперсією  $D_x$  і спектральною щільністю  $S_x(\omega)$  випадкового процесу:

$$D_x = R_x(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (43)$$

Взаємну спектральну щільність  $S_{xg}(j\omega)$  двох стаціонарних випадкових процесів  $X(t)$  і  $G(t)$  визначають як перетворення Фур'є від взаємної кореляційної функції  $R_{xg}(\tau)$ :

$$S_{xg}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xg}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (44)$$

Взаємна спектральна щільність  $S_{xg}(j\omega)$  є мірою статистичного зв'язку між двома стаціонарними випадковими процесами  $X(t)$  і  $G(t)$ . Якщо ці процеси некорельовані й мають рівні нулю середні значення, то взаємна спектральна щільність дорівнює нулю, тобто  $S_{xg}(j\omega)=0$ .

На відміну від спектральної щільності  $S_x(\omega)$ , взаємна спектральна щільність не є парною функцією  $\omega$  і являє собою не дійсну, а комплексну функцію.

Розглянемо без доказу деякі властивості спектральної щільності  $S_x(\omega)$ .

1. Спектральна щільність білого шуму є постійною на всьому діапазоні частот (рис. 1, г):

$$S_x(\omega) = N = \text{const.} \quad (45)$$

Це означає, що енергія білого шуму розподілена за всім спектром рівномірно, а сумарна енергія процесу дорівнює нескінченності, що фізично неможливо. Тобто білий шум є математичною ідеалізацією реального процесу. Походження терміну “білий шум” пояснюється аналогією такого процесу з білим світлом, що має однакові інтенсивності всіх компонент.

2. Спектральна щільність постійного сигналу  $x(t) = A_0$  являє собою  $\delta$ -функцію, що розташована на початку координат (рис. 1, а):

$$S_x(\omega) = 2\pi A_0^2 \delta(\omega). \quad (46)$$

Фізично це означає, що вся потужність постійного сигналу зосереджена на нульовій частоті.

3. Спектральна щільність періодичного сигналу  $x(t) = A \sin(\omega_1 t + \varphi)$  являє собою дві  $\delta$ -функції, що розташовані симетрично відносно початку координат при  $\omega = \omega_1$  і  $\omega = -\omega_1$  (рис. 12.1, д):

$$S_x(\omega) = 2\pi \frac{A^2}{4} [\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega + \omega_1)]. \quad (47)$$

Це означає, що вся потужність періодичного сигналу зосереджена на двох частотах:  $\omega_1$  і  $-\omega_1$  (для зони додатних частот уся потужність періодичного сигналу зосереджена на одній частоті  $\omega_1$ ).

4. Спектральна щільність часової функції, що розкладається у ряд Фур'є  $x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$ , має вигляд:

$$S_x(\omega) = 2\pi \left\{ A_0^2 \delta(\omega) + \sum_{k=1}^n \frac{A_k^2}{4} [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)] \right\}. \quad (48)$$

Цій спектральній щільності відповідає лінійчатий спектр (рис. 2) із  $\delta$ -функціями, що розташовані на додатних і від'ємних частотах гармонік ( $\delta$ -функції умовно зображені так, що їх висоти показані пропорційними коефіцієнтам при одиничній  $\delta$ -функції, тобто величинам  $A_0^2$  і  $A_k^2/4$ ).

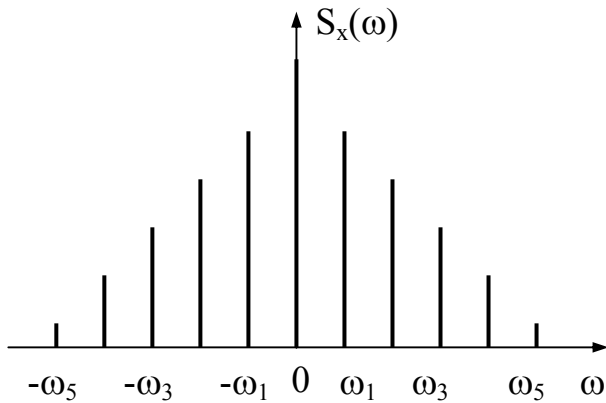


Рис. 7.2 – Лінійчатий спектр із  $\delta$ -функціями

5. Спектральна щільність випадкового процесу, що не містить періодичну складову, являє собою графік без чітко виражених піків (рис. 1, б, в). У цьому випадку спектральна щільність апроксимується аналітичним виразом:

$$S_x(\omega) = 2D_x \alpha / (\alpha^2 + \omega^2) = 2D_x T_x / (1 + \omega^2 T_x^2), \quad (49)$$

де  $D_x$  – дисперсія;  $\alpha = \text{const}$  – параметр згасання;  $T_x = 1/\alpha$  – сталий коефіцієнт. Із рис. 1, б, в видно, що чим ширше графік спектральної щільності  $S_x(\omega)$ , тим вузьчий графік відповідної кореляційної функції  $R_x(\tau)$ , і навпаки.

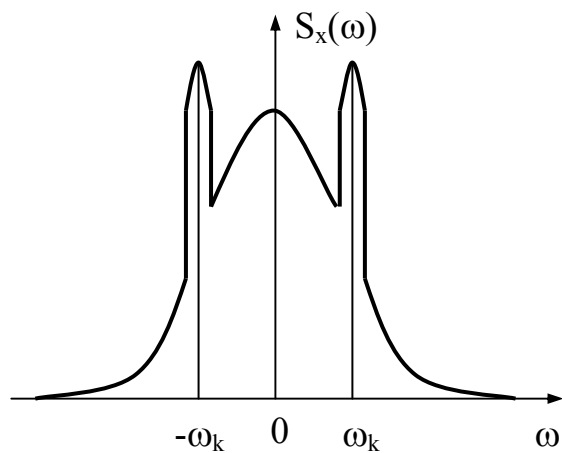


Рис. 7. 3 – Графік спектральної щільності випадкового процесу з одним накладеним періодичним сигналом

6. Спектральна щільність випадкового процесу, на який накладені періодичні складові, містить безперервну частину й окремі  $\delta$ -функції, що відповідають частотам цих періодичних складових.

Окремі піки на графіку спектральної щільності вказують на те, що випадковий процес змішаний із прихованими періодичними складовими. На рис. 3 наведено графік спектральної щільності випадкового процесу, на який накладено один періодичний сигнал з частотою  $\omega_k$ .

частотою  $\omega_k$ .

Іноді розглядають нормовану спектральну щільність  $\beta_x(\omega)$ , яка має розмірність часу:

$$\beta_x(\omega) = S_x(\omega)/D_x. \quad (50)$$

## Висновки по розділу

Однак на практиці часто зустрічаються впливи, закон змінювання яких має випадковий характер і не може бути наперед точно визначений. Такими випадковими впливами є, наприклад, добові зміни навантаження енергосистеми; пориви вітру, що діють на літак; удари хвиль у гідродинамічних системах; флуктуаційні шуми у радіотехнічних пристроях тощо. При випадкових впливах даних про стан системи на момент  $t_0$  недостатньо, щоб судити про її стан на подальший момент часу  $t > t_0$ .

Випадкові дії можуть прикладатися до системи зовні (зовнішні дії) або виникати всередині деяких її елементів (внутрішні шуми). Випадкові зміни властивостей системи звичайно можна звести до еквівалентного впливу деяких випадкових перешкод, що діють на неї, тому далі будемо вважати, що на систему діють тільки зовнішні випадкові впливи.

Розрахунок систем автоматичного керування при випадкових діях виконують за допомогою спеціальних статистичних методів. САК, що спроектована на основі цих методів, буде забезпечувати виконання вимог, до цієї системи не тільки для одного детермінованого впливу, а для цілої сукупності впливів, що задані за допомогою статистичних характеристик.

Функція, значення якої при кожному значенні незалежної змінної є випадковою величиною, називається випадковою функцією. Випадкові функції, для яких змінною є час  $t$ , називають випадковими процесами або стохастичними процесами.

Функція, значення якої при кожному значенні незалежної змінної є випадковою величиною, називається випадковою функцією. Випадкові функції, для яких змінною є час  $t$ , називають випадковими процесами або стохастичними процесами.

Двомірною щільністю ймовірності повністю характеризуються так звані марковські випадкові процеси, для яких знання значення процесу на момент часу  $t_k$  містить усю можливу інформацію про подальший хід процесу.

Математичне сподівання й дисперсія є важливими характеристиками випадкового процесу, але вони не дають достатнього уявлення про те, який характер матимуть його окремі реалізації. Тобто для двох випадкових процесів, що мають цілковито різні структури, значення математичного сподівання й дисперсії можуть бути однаковими.

Аби охарактеризувати внутрішню структуру випадкового процесу, тобто врахувати зв'язок між його значеннями на різні моменти часу або, інакше кажучи, врахувати ступінь мінливості випадкового процесу, необхідно ввести поняття кореляційної функції випадкового процесу.

Різні випадкові процеси діляться на стаціонарні й нестаціонарні залежно від того, як з часом змінюються їх статистичні характеристики.

Для випадкового процесу з нормальним законом розподілу математичне сподівання й кореляційна функція цілком визначають його  $n$ -мірну щільність ймовірності, тому для нормальних випадкових процесів поняття стаціонарності в широкому й вузькому розумінні співпадають.

Теорія стаціонарних процесів розроблена найбільш повно і дозволяє порівняно просто виконувати розрахунки для багатьох практичних випадків. Тому припущення щодо стаціонарності іноді доцільно робити й для тих випадків, коли випадковий процес не є стаціонарним, але на інтервалі часу, що розглядають, статистичні характеристики сигналів не встигають істотно змінитися.

Існує клас стаціонарних випадкових процесів, що називають ергодичними, для яких середнє за множиною дорівнює середньому за часом.

Властивість ергодичності має дуже велике практичне значення. Для визначення статистичних властивостей деяких об'єктів, якщо важко здійснити одночасне спостереження за ними у довільно вибраній момент часу (наприклад, за наявності одного дослідного зразка), його можна замінити тривалим спостереженням за одним об'єктом. Іншою мовою, окрема реалізація ергодичного випадкового процесу на нескінченному інтервалі часу цілком визначає весь випадковий процес із його нескінченними реалізаціями. Цей факт

лежить в основі методу експериментального визначення кореляційної функції стаціонарного випадкового процесу за одною реалізацією.

Під час розв'язання практичних задач часто використовують нормовану кореляційну функцію. Кореляційні функції випадкових процесів можна визначити за експериментальними даними (за експериментальною реалізацією випадкового процесу). Але такий спосіб є трудомістким, тому на практиці звичайно кореляційні функції визначають за допомогою спеціальних приладів – кореляторів, що автоматично обчислюють середні добутки двох координат осцилограм, які знаходяться одна від одної на відстані  $\tau$ .

Під час дослідження автоматичних систем керування користуються ще однією характеристикою стаціонарного випадкового процесу – спектральною щільністю  $S_x(\omega)$ , яка у багатьох випадках є більш зручною, ніж кореляційна функція.

Термін “спектральна щільність” походить з теорії електричних коливань. Фізичний зміст спектральної щільності полягає в тому, що вона характеризує розподіл потужності сигналу за частотним спектром (кожна елементарна потужність, яка відповідає нескінченно малій ділянці спектра від  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , пропорційна значенню функції  $S_x(\omega)$  для даної частоти  $\omega$ ). Спектральну щільність можна визначити експериментально через середню величину квадрата амплітуди гармонік реалізації випадкового процесу. Прилади, що застосовують для цього, називаються спектрометрами.