

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розроблення електроприводу механізму для контролю параметрів плавлення сталі»

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Корнійчук О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Захарченко Р.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2024 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
автоматики, електроніки та  
телекомунікацій



О.В.Шефер

«01» квітня 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ**

**Корнійчуку Олександрові Володимировичу**

1. Тема роботи «Розроблення електроприводу механізму для контролю параметрів плавлення сталі»  
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент  
затверджена наказом вищого навчального закладу від від 08. 12. 2023 року  
№ 1481/1 –фа .
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічні характеристики механізму: вага – 34 кН, швидкість пересування – 3,6 м/с, максимально допустиме прискорення – 1,3 м/с<sup>2</sup>, діаметр барабана – 0,6 м, тривалість роботи приводу за 1 плавку – 46 с, передаточне число редуктора 4,3. Розробити регульований електропривод, забезпечити перерегулювання у межах 20%, час регулювання не більше 1с.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис технологічного процесу плавлення сталі, опис механізму для контролю параметрів цього процесу. Характеристики електроприводу механізму контролю параметрів, постановка задач на проектування. Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна. Вибір основного силового електрообладнання. Розробка захисту електроприводу. Розробка та реалізація схеми САК. Розрахунок та аналіз динамічних характеристик САК.

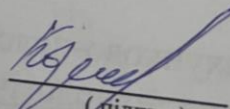
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
- 1) загальний вигляд та основні елементи кислородного конвертора;
  - 2) кінематична схема механізму підйому;
  - 3) навантажувальна діаграма та тахограма роботи механізму підйому;
  - 4) силова схема тиристорного перетворювача;
  - 5) регулювальні характеристики тиристорного перетворювача;
  - 6) функціональна схема електроприводу механізму контролю параметрів;
  - 7) САК електроприводу механізму підйому;
  - 8) графіки досліджень.

6. Дата видачі завдання 01.04.2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

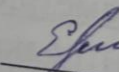
Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Квартал	Відсоток	
1	Опис технологічного процесу плавлення сталі, опис механізму для контролю параметрів цього процесу. Характеристики електроприводу механізму контролю параметрів, постановка задач на проектування	25.04.24	I	20%	Пл. 1
2	Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна	08.05.24		40%	Пл. 2,3
3	Вибір основного силового електрообладнання	23.05.24	II	60%	Пл. 4,5
4	Розробка та реалізація схеми САК. Розрахунок та аналіз динамічних характеристик САК	30.05.24		80 %	Пл. 6,7
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.24	III	100%	Пл. 8

Студент

  
(підпис)

Корнійчук О.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Єрмілова Н.В.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

### кваліфікаційної роботи бакалавра " Розроблення електроприводу механізму для контролю параметрів плавлення сталі "

Робота містить 58 сторінки, 22 ілюстрації, 5 таблиць, 16 використаних джерел.

Ключові слова: електропривод, плавлення, сталь, струм якоря, регулятор швидкості,

Предметом дослідження є розробка електроприводу механізму для контролю параметрів плавлення сталі. Об'єктом дослідження є сам процес плавлення сталі, його характеристики, параметри та умови, які необхідно контролювати або регулювати під час виробництва.

Основна увага зосереджується на розумінні процесу плавлення сталі, його особливостях та технологічних вимогах, які впливають на вибір, розробку та впровадження електроприводу для контролю цих параметрів.

Електропривід механізму використовується для контролю параметрів плавлення сталі, забезпечуючи точний рух та регулювання відповідно до вимог технологічного процесу дробки можуть бути розглянуті для використання на даному підприємстві. Це дозволяє забезпечити стабільність та однорідність складу матеріалу, підвищуючи якість та ефективність виробництва сталі.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної дробки можуть бути розглянуті для використання на даному підприємстві.

## ABSTRACT

Bachelor's qualification work "Development of Electric Drive Mechanism for Steel Melting Parameters Control"

The thesis comprises 58 pages, 22 illustrations, 5 tables, and references to 16 sources.

Keywords: electric drive, melting, steel, armature current, speed regulator.

The subject of the research is the development of an electric drive mechanism for controlling steel melting parameters. The object of the research is the steel melting process itself, its characteristics, parameters, and conditions that need to be controlled or regulated during production.

The main focus is on understanding the steel melting process, its peculiarities, and technological requirements that influence the selection, development, and implementation of the electric drive for controlling these parameters.

The electric drive mechanism is utilized for controlling steel melting parameters, ensuring precise movement and regulation according to the technological process requirements. This enables stability and uniformity in material composition, enhancing the quality and efficiency of steel production.

The thesis holds practical value, and its results, after further refinement, could be considered for implementation in the relevant industrial setting.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
Технологічна частина .....	10
1.1 Технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері .....	10
1.2 Процес вимірювання температури та відбору проб металу.....	11
1.3 Коротка характеристика механізмів плавильно-вимірювальної машини... .....	14
1.3.1 Механізм ходу фурми.....	14
1.3.2 Гідравлічна насосна станція .....	15
2 Технічні характеристики вимірювальної машини для плавлення.....	17
2.1 Характеристика електроприводів плавильно-вимірювальної машини ..	17
2.1.1 Привід електродвигуна .....	17
2.1.2 Привід аварійної фурми.....	20
2.1.3 Приводи гідравлічних насосів .....	20
2.2 Вимоги до електроприводу вимірювальної трубки.....	20
3 Вибір і перевірка вибору двигуна.....	22
3.1 Розрахунок статичних моментів.....	22
3.2 Попередній вибір двигуна .....	22
3.3 Розрахунок і побудова тахограми і діаграми навантаження .....	23
3.4 Перевірка на нагрівання двигуна до перевантаження.....	28
4 Вибір і характеристики основного силового електрообладнання .....	30
4.1 Вибір і характеристики тиристорного перетворювача .....	30
4.2 Вибір і характеристики силового трансформатора .....	32
4.3 Вибір згладжуючих дроселів .....	34
4.4 Вибір і характеристика джерела живлення для збудження двигуна .....	34
4.5 Розрахунок і побудова характеристик регулювання перетворювача.....	34
5 Аналіз динаміки електроприводу .....	37
5.1 Підбір структури САР і розробка основних параметрів.....	37
5.2 Розрахунок структурної схеми SAR і підбір параметрів регулятора .....	38
5.2.1 Розрахунок контуру регулювання струму якоря .....	40

5.2.2 Оцінка впливу ЕРС двигуна.....	40
5.2.3 Регулятор інтенсивності струму якоря .....	40
5.2.4 Регулятор швидкості.....	42
5.2.5 Регулятор інтенсивності швидкості .....	43
5.3 Реалізація схеми САР електроприводу.....	45
5.3.1 Характеристики модуля SINAMICS DCM .....	45
5.3.2 Регулятор інтенсивності швидкості .....	46
5.3.3 Регулятор швидкості.....	48
5.3.4 Регулятор струму.....	48
5.3.5 Аналогові входи вибору .....	51
5.3.6 Аналогові виходи .....	51
5.3.7 Процес оптимізації.....	52
5.3.8 Контроль і діагностика .....	53
5.3.9 Диференційні струми (E-STOP) .....	54
5.4 Розрахунок динамічних характеристик САР .....	54
Висновок .....	57
Перелік посилань.....	58
Додатки .....	59

## ВСТУП

Процес виплавки сталі в кисневих конвертерах зробив революцію в металургії чавуну.

Актуальність теми: Зважаючи на швидкі та значні зміни в металургійній галузі, особливо у сфері виробництва сталі, розробка електроприводу механізму для контролю параметрів плавлення сталі набуває особливої актуальності. В контексті постійного підвищення вимог до якості та ефективності виробництва, розробка нових технологій і систем контролю стає невід'ємною частиною прогресивного розвитку сфери металургії

Метою даної дипломної роботи є розробка ефективного електроприводу для механізму, що використовується в процесі плавлення сталі, для забезпечення точного контролю ключових параметрів процесу.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних завдань:

1. Аналіз поточних тенденцій у виробництві сталі: Дослідження сучасних методів та технологій плавлення сталі для визначення потреб у покращенні процесу.

2. Проектування електроприводу з урахуванням особливостей технологічного процесу: Розробка концепції електроприводу, що відповідає вимогам ефективності, надійності та точності управління.

3. Експериментальне випробування та оптимізація системи: Проведення тестів з метою визначення ефективності та досягнення оптимальних параметрів роботи електроприводу.

4. Оцінка та аналіз результатів: Аналіз отриманих даних та визначення досягнень у контексті поставлених цілей та реалізації технічних вимог.

Ключові переваги процесу перетворення кисню для виробництва сталі включають високу інтенсивність і хороший контроль процесу, а також просте поєднання з безперервним процесом лиття сталі; Уміння користуватися керуючими комп'ютерами. Автоматизація процесів виплавки сталі дозволяє

підвищити продуктивність цеху, знизити енергоспоживання та скоротити кількість працівників.

Висока надійність електрообладнання перетворювальних цехів вкрай важлива, тому вимоги до них більш жорсткі. Незначна несправність електроприводів може призвести до повного перегорання мотора.

У сучасних високопродуктивних кисневих конвертерних цехах автоматизовані системи управління працюють з програмованими контролерами. Ці системи дозволяють перейти від локальних систем управління механізмами до комплексної автоматизації всього технологічного режиму плавки і досягти значного техніко-економічного ефекту.

Характерними особливостями технологічного процесу, що визначають основні вимоги до електроприводу та електрообладнання інверторного цеху, є суворий циклічний процес, необхідність безвідмовного припинення при виході з ладу окремих приводів, обмежене прискорення при роботі з рідким металом, високі температурні режими при певних умовах. У приміщеннях цеху спостерігається концентрація струмопровідного пилу.

Найбільш надійне електрообладнання та електрообладнання використовується для електроприводу агрегатів, машин і механізмів інверторного цеху. Використовуються черепні металургійні двигуни серій DP, D, MTX, MTCN.

Електроприводи основних і допоміжних механізмів виробництва перетворювача кисневої сталі зазвичай здійснюються тиристорною перетворювальною системою. Таке широке застосування тиристорних електроприводних механізмів і машин в металургійній промисловості обумовлено рядом переваг даного виду електроприводу

## 1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері

Киснево-конвертерний цех грає важливу роль в роботі комбінату: до 60-70% сталі, що виробляється на заводі, виробляється за кисневим конвертерним процесом.

Конвертерний цех має конвертерний, розливний, транспортний і переробний цехи. Крім того, є відсік для відходів і шлаків, чавунна переливна труба і ремонтні відсіки для проміжних резервуарів і ківшів [2].

У конвертерному цеху встановлено 3 кисневі конвертери місткістю 370 тон кожен.

Кисневий конвертер, показаний на рисунку 1.1, являє собою грушоподібний агрегат висотою до 15 м, корпус якого виготовлений з листової сталі товщиною до 110 мм. Під час роботи перетворювач може обертатися навколо горизонтальної осі поворотним пристроєм для засипки брухту, чавуну, вивантаження сталі та шлаку.

Сировиною для процесу перетворення кисню служать рідкий чавун, брухт і флюс.

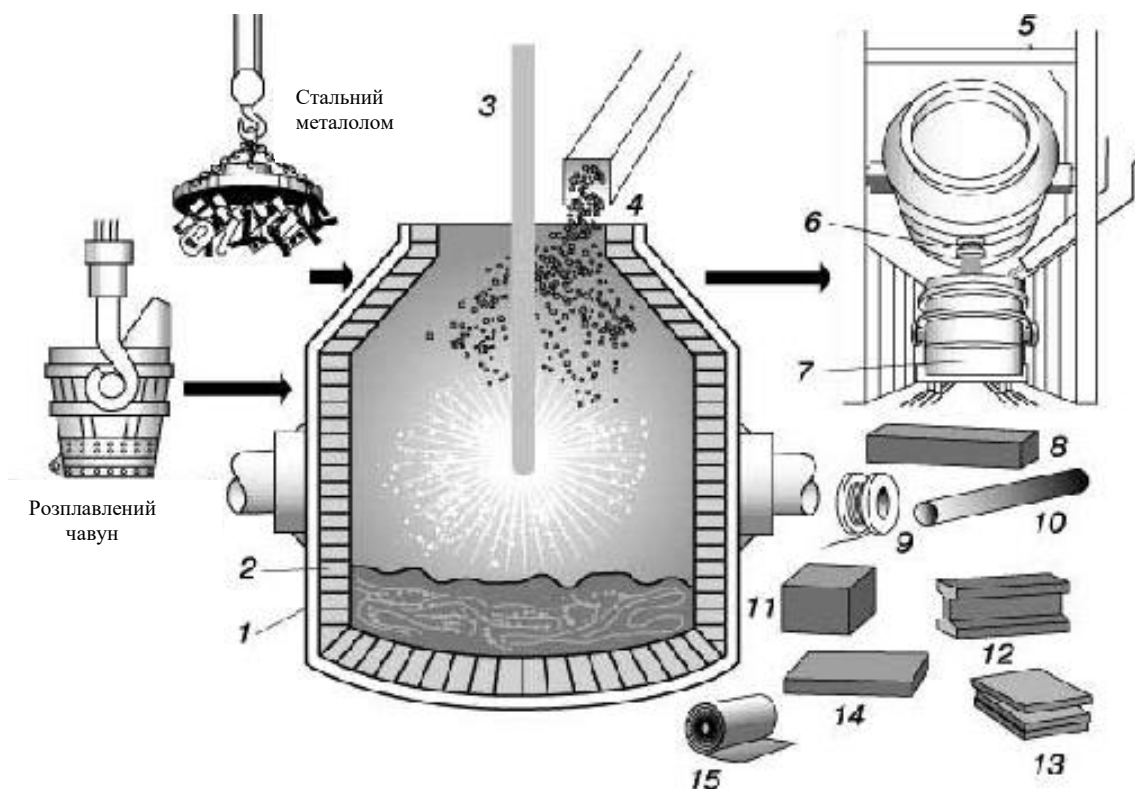


Рисунок 1.1 - Кисневий конвертер

1 – сталевий кожух; 2 - вогнетривка футеровка; 3 – киснева фурма;  
 4 – наповнення флюсом; 5 – легуючі добавки; 6 – лютка; 7 – ківш; 8 –  
 заготівля; 9 – дріт; 10 – безшовна труба; 11 – блюм; 12 – балка; 13 – листова  
 сталь; 14 - плита; 15 – листовий метал.

## 1.2 Технологічний процес вимірювання температури та відбору проб металу

Вимірювання температури і відбір проб металу для експрес-аналізу хімічного складу є технологічними процесами, а час, витрачений на них, включається в цикл плавлення. Раніше ці роботи виконувалися обслуговуючим персоналом, який попередньо зняв кисневу трубку і встановив конвертер в похилому положенні, тим самим знизивши продуктивність конвертера.

Для того, щоб повністю механізувати вимірювання температури та відбір проб, скоротити тривалість цих операцій та уникнути ручної праці, була розроблена машина для перетворювачів вантажопідйомністю від 350 до 400 тон без необхідності натискання на перетворювач. Конструкція машини для

вимірювання температури ванни і відбору проб металу показана на рисунку 1.2.

Вимірювання температури рідкої сталі, визначення вмісту вуглецю і відбір проб проводять за допомогою мірного зонда, зануреного в металеву ванну на 5-10 секунд [3].

Машина містить раму 5 (рис. 1.2), рейку 10, каретку 16 з вимірювальною трубкою 19, канатний механізм 2 для переміщення каретки і гідравлічний механізм 1 для нахилу рейки. Нахил направляючої рейки являє собою коливальний гідроциліндр подвійної дії. Рідина подається з системи тиску масла двома лопатевими насосами в гідроциліндр. Канатний механізм переміщення каретки являє собою однобарабанну лебідку. Мотузка 3 на одному кінці на каретці, інший на барабані. Направляючий блок 6 розташований на поворотній осі 7, прогин 9 встановлений в направляючій шарніра. Сани їздять на чотирьох колесах і мають два жорстких колеса. Щоб каретка фурми не відвалилася при обриві мотузки, до неї кріпиться запобіжний пристрій. Зонд повинен захищати від високих температур. Фурма складається з вала 12 з трьома патрубками 13 для подачі і відведення охолоджуючої води і інертного газу, і корпусу з трьох концентрично розташованих трубок. Внутрішня кільцева порожнина спрямована вниз і поверх зовнішньої дренажної води, що призводить до кращого охолодження. У середині корпусу знаходиться шток, який вільно проходить через всю насадку і кріпиться до каретки. У зазор між внутрішньою трубкою сопла і стрижнем впорскується інертний газ, який перешкоджає протіканню металу. З порожнистим стрижнем з'єднаний наконечник 20, який служить для закріплення щупа. На фурмі два упори 14 кріпляться демпфуючими пружинами. Корпус форсунки розташований між двома парами конічних роликів 15, які забезпечують зміщення корпусу щодо каретки на хід 1500 мм, необхідний для витягування щупа з сопла.

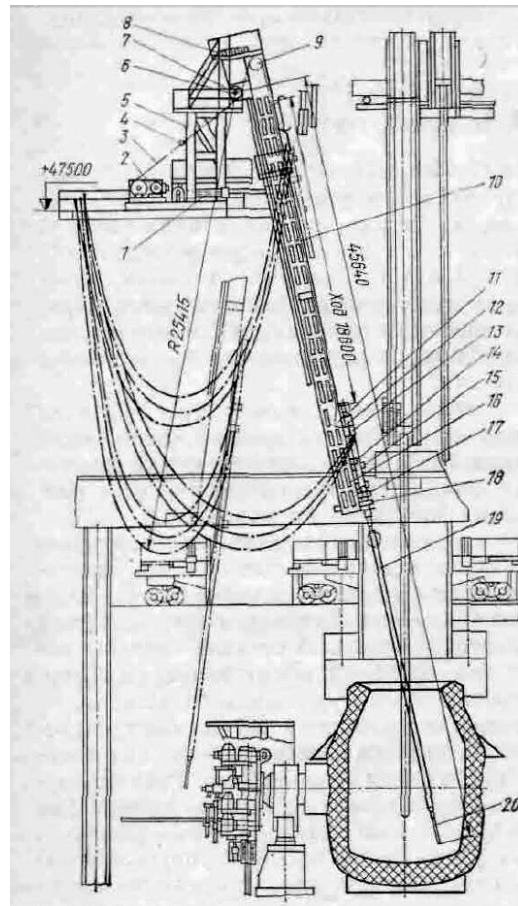


Рисунок 1.2 – Механізм підйому вимірювальної фурми

Машина працює наступним чином. Перед початком роботи направляюча 10 знаходиться в початковому лівому положенні, каретка - в проміжному, а вимірювальна трубка утримується гаком 11. Наконечник 20 витягується зі списа, що дозволяє прикріпити зонд. При включенні приводу лебідки 2 наконечник зі щупом спочатку втягується зі швидкістю санчат на вимірювальній фурмі, а потім фурма піднімається разом з кареткою на робочій швидкості в найвище положення. Після зупинки каретки поворотний гідроциліндр 1 переміщує направляючу в крайнє ліве положення, включає привід лебідки, а фурма, яка спирається своєю верхньою опорою 14 на упор каретки, з робочою швидкістю рухається вниз і проходить через отвір в коробці в конвертер. При вставці фурми в кесон і його внутрішню порожнину впорскується інертний газ. Спир сидить своїм нижнім упором 17 на упорі 18 направляючої. У міру того, як каретка продовжує опускатися, вона виймає

наконечник зі щупом з сопла і занурює його в рідкий метал на глибину до 700 мм. Спочатку наконечник зі щупом втягується всередину насадки, а потім предметний затвор переміщається вгору. Повернення напрямної і сопла в ліве початкове положення для зняття зонда відбувається в зворотному порядку.

### **1.3 Характеристика механізмів плавильно-вимірювальної машини**

#### **1.3.1 Механізм руху вимірювальної фурми**

Вимірювальна труба встановлена на каретці, оснащеної двома парами роликів, і переміщається по направляючої, встановленій в опорних кронштейнах поворотної колони [3].

Каретка підвішена на тросі на барабані, який приводиться в рух двигуном постійного струму Д814 через шестерню диференціала з передавальним числом  $i_1 = 4,3$ . Через той же редуктор, але з передавальним числом  $i_2 = 93$ , барабан може приводитися в рух двигуном змінного струму 4МТКН 160М8, який призначений для зняття сопла з перетворювача в разі виходу з ладу головного приводу.

Конкретне положення інжектора фіксується за допомогою гальм ТКГ-500 і ТКГ-300 для головного або аварійного приводу. Крім функції блокування механізму в зупиненому положенні, гальма служать для запобігання передачі обертання одного мотора на інший при блокуванні барабана.

Для управління тяговим приводом і блокування інших механізмів передбачений гусеничний вимикач ВПФ 11-01-182151-54.

Передавальне число вбудованого перемикача передач  $i = 15$  забезпечує обертання валу перемикача на 0,88 обороту при заповненні сопла.

Аварійне управління фурмою забезпечується трипозиційними перемикачами VP16E23A231-55U3.2 SQ41, SQ42 і SQ47. SQ41 сконструйований таким чином, що основний двигун вимикається в найвищому положенні автомобіля з форсункою. SQ 42 - для реверсу головного двигуна в нижньому положенні інжектора. SQ 47- був розроблений для відключення аварійного двигуна у верхньому положенні автомобіля, навантаженого фурмою.

У разі поломки і вільного падіння транспортного засобу це забезпечується захисним пристроєм. При цьому, як і при будь-якому ослабленні каната, з'єднаного з підвіскою санчата, за допомогою насадки під час опускання, датчик натягу каната SQ 48 працює на кінцевому вимикачі типу VP16E23A231-55U3.2.

Щоб забезпечити необхідний діапазон і точність для підтримки цієї частоти обертання фурми, тахогенератор постійного струму TP212 встановлений на задньому кінці вала двигуна. Збудження тахогенератора відбувається постійними магнітами. Кінематична схема механізму підйому фурми показана на рисунку 1.3.

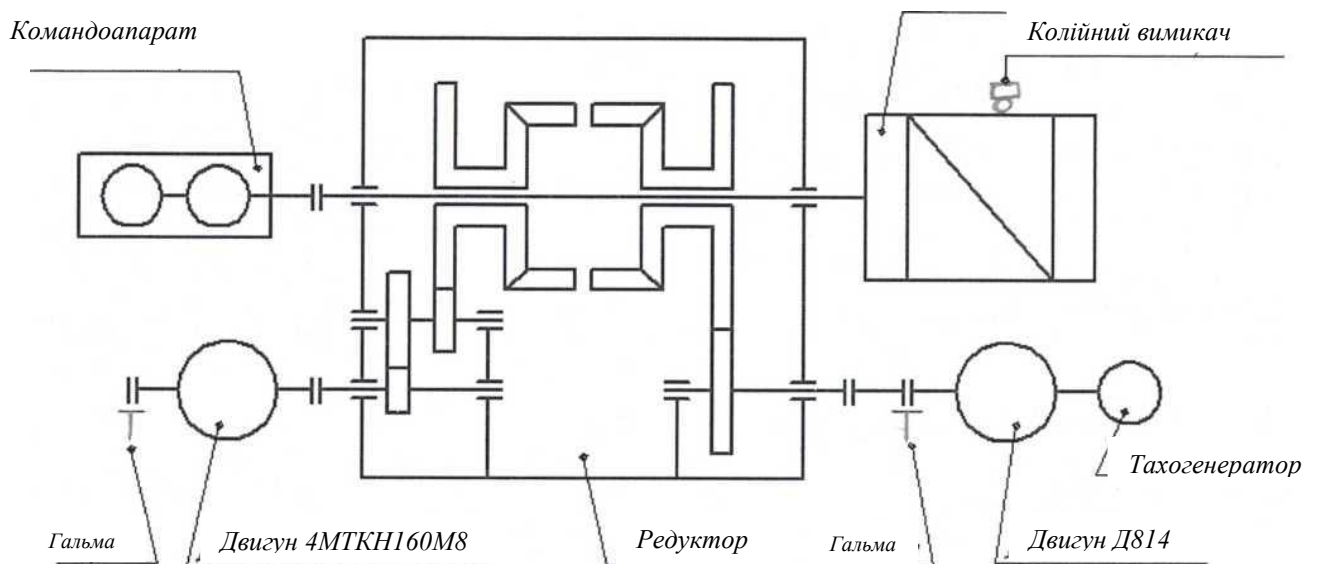


Рисунок 1.3 – Кінематична схема підйомного механізму вимірювальної фурми

### 1.3.2 Гідравлічна насосна станція

Насосна станція призначена для забезпечення гідроциліндрів виконавчих механізмів робочою рідиною.

Робочі та резервні приводи насосів ВГ12-28М складаються з короткозамкнених асинхронних двигунів 4А100 SA4. Насос працює безперервно протягом усього процесу плавлення. Безперервне прокачування

масла через гідравлічну систему забезпечує подачу в охолоджуючі циліндри. У проміжках між ними насос відключається. Технічні дані двигуна наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Технічні дані двигуна 4A100 SA4

<b>Кількість на механізм</b>	<b>стан</b>	
Напруги	В	380
Міць	кВт	3
Струм	А	6,7
Номінальна швидкість обертання	Об/хв	1435
Режим роботи	Тривалий	100%

## **2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВИЛЬНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ**

### **2.1 Характеристика електроприводів плаவில்но-вимірвальної машини**

#### **2.1.1 Привід елеутодвигуна**

Двигун для вимірювання руху форсунки живиться від тиристорного електроприводу природного охолодження КТЕ320/440-131-23УХЛ4, 320 А, 400 В постійного струму. Пульт управління містить пристрої для управління лінійним контактором, динамічним гальмівним контактором, електрогідравлічним гальмом, джерелом живлення обмотки збудження двигуна і фотоелектричним кінцевим вимикачем, а також налаштування швидкості руху.

Електричний рух вимірювального щупа має чотири режими роботи:

- Автоматично з керуючого комп'ютера;
- Автоматично з локальної зондувальної мікропроцесорної системи;
- Напівавтоматичний пульт дистанційного керування;
- Вручну на місці.

В автоматичному режимі аналоговий командний сигнал заданого значення швидкості виводиться з положення управління фурмою MPS Zond на вхід регулятора швидкості блоку управління комплектного електроприводу.

У напівавтоматичному режимі дистанційного керування рухом сопла керує оператор головного пульта керування перетворювачем високого тиску. Консоль GPU має 5 кнопок керування для:

- Опускання форсунки для зарядки датчика;
- Опускання сопла для вимірювання параметрів плавлення;
- Підйом насадки в положення, де датчик повинен бути знятий;
- Підйом насадки у вихідне положення;
- Зупинка привід.

Швидкість перемикається і зупиняється в заданих положеннях відповідно до команд кінцевого вимикача.

Ручна робота передбачена для проведення пусконаладжувальних і ремонтних робіт. При цьому всі необхідні налаштування швидкості такі:

- «нижче» 0,12 м/с, 1,5 м/с, 3,6 м/с, 0,6 м/с;
- "до" 3,6 м/с, 0,6 м/с, 0,12 м/с.

Система управління приводом управління виконана у вигляді двох контурів: внутрішньої схеми контролю струму якоря і зовнішньої схеми контролю частоти обертання двигуна.

При нормальній роботі в приводі вимірювальної насадки передбачено рекуперативне гальмування. У разі аварійного відключення лінійного контактора під час руху трубки активується динамічне гальмування.

Особливістю *Lanzenbewegungsantriebs* є те, що статичний крутний момент, прикладений до валу двигуна, є активним. У цьому випадку привід можна вимкнути лише після встановлення «струму утримання» форсунки. При спрацьовуванні одного з реле швидкості руху або замиканні контакту реле управління гальмами від мікропроцесорної сенсорної системи на вході блоку управління інтенсивністю подається сигнал, що забезпечує струм якоря приблизно 0,5 А. Після включення реле контролю струму якоря спрацьовує гальмівний контактор і на вхід регулювання інтенсивності подається сигнал установки швидкості. Гальмо спрацьовує, коли двигун вимкнено без встановленого сигналу швидкості. В аварійному режимі гальмо застосовується одночасно з динамічним гальмуванням.

Контрольно-вимірювальна система, розроблена металургійною автоматикою УТРПІКІ, м. Дніпро, контролює технологічні параметри охолоджуючої води та інертного газу. Отриманий контактний сигнал від опускання фурми в перетворювачі виводиться з ланцюга системи управління в ланцюг приводу. При розмиканні зазначеного контакту або при спрацьовуванні кінцевого вимикача, що обмежує найнижче положення форсунки, сопло автоматично знімається з перетворювача.

Положення вимірювальної насадки на головній станції управління відображається за допомогою цифрового дисплея, який є частиною

мікропроцесорної системи «відбору проб». На блоці управління місцевим приводом є сигнальні лампи для контролю подачі форсунки. Технічні дані механізму підйому фурми наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Технічні дані підйомного механізму вимірювальної фурми

Параметр і позначення	Одиниця виміру	Значення
Підйом ваги списа-ГФ,	<b>Кн</b>	<b>34</b>
Швидкість руху робочої - Вп,	<b>м/с</b>	<b>3,6</b>
Швидкість руху, В <sub>y</sub>	<b>м/с</b>	<b>0,12</b>
Максимально допустиме прискорення (уповільнення), а (б)	<b>м/с<sup>2</sup></b>	<b>1,3</b>
Передавальне число, і	-	<b>4,3</b>
- Коробка передач, $\eta_p$	-	<b>0,96</b>
- барабан, $\eta_{бар}$	-	<b>0,84</b>
Діаметр барабана, дк	<b>м</b>	<b>0,6</b>
Сумарний момент інерції механізму, зведеного до вала двигуна, J <sub>Мех</sub>	<b>кг·м<sup>2</sup></b>	<b>115</b>
Тривалість роботи на одну плавку, T <sub>p</sub>	<b>с</b>	<b>46</b>
Шпаруватість одного теплового циклу, tu	<b>хв</b>	<b>45</b>
Цикл включає:		
- Опускання вниз S1	<b>м</b>	<b>24,8</b>
- підйом списа вгору, S3	<b>м</b>	<b>24,8</b>

### 2.1.2 Привід аварійної фурми

Motion Emergency Trigger має два режими роботи:

- автоматична, зондова мікропроцесорна система;
- Віддалене та виїзне управління.

В автоматичному режимі контактний сигнал від системи Sonda забезпечує аварійний вихід із землі перетворювача при відключенні основного інвертора і виході з ладу датчика швидкості.

У ручному режимі головна станція управління і коробка, які розташовані поруч з механізмом, оснащені кнопками для управління рухом туї аварійним пристроєм.

### 2.1.3 Приводи гідравлічних насосів

Управління робочим і резервним насосами гідросистеми здійснюється кнопками головної станції управління конвертером і трьома коробками, розташованими в механізмах. Крім того, в кожному з висувних ящиків є селектор управління розташуванням, який при повороті в положення «Ввімкнено» управляє насосами даної робочої станції, якщо аналогічні клавіші в двох інших полях знаходяться в положенні «Вимкнено».

## 2.2 Вимоги до електроприводу мехатронної системи вимірювальної фурми

До електроприводу механічної мехатронної вимірювальної системи пред'являються такі основні вимоги:

- висока надійність і безперебійна робота механізму в умовах високої температури (до + 40 ° C) і низької (до -30 ° C) і підвищеної запиленості;
- забезпечують роботу механізму в умовах підвищеної вібрації (1-35 Гц);
- забезпечити роботу механізму підйому стріли на двох швидкостях:

робота 3.6

м/с і низькі 00,12 м/с;

- падіння статичного струму не повинно перевищувати 5%;
- високий перевантаження по струму і імпульс приводу ( $\lambda_1 = 2,5$ )
- допустиме відносне збільшення струму якоря обмежена  $200 \cdot V/c$ ;

- допустимий динамічний струм не повинен перевищувати  $1,5 \cdot B$ ;
- зниження статичної швидкості не повинно перевищувати 5%;
- Надати задані значення граничного прискорення і уповільнення ( $1,2 \text{ м/с}^2$ );
- точність зупинки променях в зоні позиціонування не більше 0,1 м;
- переривчаста робота накопичувача;
- реверсний режим роботи;
- підключення високочастотного перетворювача на годину (до 10000);
- повинні бути передбачені механічні та електричні обмежувачі для максимального переміщення фурми;
- у разі виходу з ладу електродвигуна повинен бути передбачений ручний режим підйому фурми.

Виконання цих вимог і поставлено за задачі даної кваліфакаційної роботи бакалавра.

### 3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

#### 3.1 Розрахунок статичних моментів

Необхідно розрахувати статичний момент, що прилягає до вала двигуна для найскладнішого режиму роботи електроприводу. Таким режимом є підйом списа.

Статичний момент при підйомі фурми обчислюється за формулою (3.1):  $M_{\text{под}}$

$$M_{\text{под}} = \frac{G_{\phi}}{i \cdot \eta_p \cdot \eta_k} \cdot \frac{d_k}{2}; \quad (3.1)$$

$$M_{\text{под}} = \frac{34 \cdot 10^3}{4.3 \cdot 0.96 \cdot 0.84} \cdot \frac{0.6}{2} = 2942 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кутова швидкість двигуна при роботі на робочій швидкості задається формулою (3.2):

$$\omega_{\text{двр}} = \frac{V_p \cdot i}{\frac{d_k}{2}}; \quad (3.2)$$

$$\omega_{\text{двр}} = \frac{3,6 \cdot 4,3}{0,6/2} = 51,6 \text{ с}^{-1}.$$

Швидкість обертання двигуна при роботі на робочій швидкості відповідає формулі (3.3):

$$n_{\text{двр}} = \frac{\omega_{\text{двр}} \cdot 30}{\pi} \quad (3.3)$$

$$n_{\text{двр}} = \frac{51,6 \cdot 30}{\pi} = 492,7 \text{ об/хв}$$

Необхідна потужність електродвигуна для статичного моменту  $M_{\text{при}}$  приведеному до вала двигуна задається формулою (3,4):

$$P_{\text{дорівнює}} \geq (1,2:1,4) \cdot \frac{M_{\text{max}}}{\lambda} \omega_{\text{двр}}; \quad (3.4)$$

$$P_{\text{необ}} = 1,4 \cdot \frac{2942}{2,5} \cdot 51,6 = 85012,03 \text{ Вт}.$$

#### 3.2 Попередній вибір двигуна

Необхідно підбирати електродвигун з номінальною частотою обертання  $\omega_n > \omega_{\text{двр}}$  і потужністю  $P_{\text{необ}}$ . Слід враховувати, що двигун повинен мати запас потужності для забезпечення пускового і гальмівного режимів роботи механізму підйому вимірювального люка.

Двигун типу Д814У2 - незалежний від металургії електродвигун збудження номінальною потужністю 110 кВт, з низькою частотою обертання був [2], обраний для приводу підйомного механізму вимірювальної головки. Цей двигун спеціально виготовлений для роботи в металургійних цехах при високих температурах і підвищеній запиленості. Двигун має природну вентиляцію. Технічні дані обраного двигуна наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Технічні дані двигуна Д814У2

Параметр і позначення	Одиниці	Значення
Номінальна потужність, $P_n$	кВт	110
Номінальна напруга, $U_n$	В	440
Номінальний струм якоря, $i_n$	А	274
Номінальна швидкість,	об/хв	500
Номінальна напруга збудження, $U$	В	220
Номінальний струм збудження, $i$	А	5,5
Кількість полюсів (основний, додатковий), $2p$	-	4
Кількість паралельних анкерних гілок, $2a$	-	2
Опір обмотки якоря, $r_h$	Ом	0,0325
Кількість витків на додатковий полюс, $z_{дп}$	-	22
Опір обмотки додаткових полюсів, $r_{дп}$	Ом	0,018
Кількість витків на полюс обмотки збудження, $z_{ови}$	-	1400
Опір обмотки збудження, $r_b$	Ом	36,0
Перевантажувальна здатність по струму якоря, $\lambda$	-	2,5
Максимальна швидкість, $n_{макс}$	об/хв	1770
Максимальний крутний момент, $M_{макс}$	Нм	5212
Момент інерції якоря,	кг·м <sup>2</sup>	10,25
Магнітний потік на полюс, $\Phi_{пн}$	Вб	8,МО-2

### 3.3 Розрахунок і побудова тахограми і діаграми навантаження

Для того, щоб перевірити обраний двигун на перевантаження і перегрів, необхідно розрахувати схему навантаження і тахограф приводу.

Для початкового часу приймаються повідці фурми в крайньому вертикальному положенні. Потім спис опускають зі швидкістю 3,6 м/с на

висоту 5 м над металевим рівнем. Після цього швидкість опускання знижується до 0,12 м/с, і відбувається подальший спуск до рівня металу. Загальна висота опускання форсунки становить 24,83 м. Після вимірювання фурма знімається з кесона зі зниженою швидкістю, а потім повертається у вихідне робоче положення на робочій швидкості. Розрахуємо тахограму для опускання і підйому вимірювальної фурми на початку і в кінці плавки відповідно.

Номинальний крутний момент двигуна відповідає формулі (3,5):

$$M_n = I_n \cdot kF_n; \quad (3.5)$$

$$M_n = 274 \cdot 8,047 = 2205 \text{ Нм.}$$

Коефіцієнт крутного моменту двигуна задається формулою (3,6):

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_{\text{я}}}{w_n}; \quad (3.6)$$

$$k\Phi_n = \frac{440 - 274 \cdot 0,068}{56} = 8,047 \text{ В} \cdot \text{с}$$

Номинальна кутова швидкість двигуна задається формулою (3,7):

$$w_n = \frac{n_n \cdot \pi}{30} \quad (3.7)$$

$$w_n = \frac{500 \cdot \pi}{30} = 52,36 \text{ с}^{-1}$$

Опір якірного ланцюга при робочій температурі 85°C відповідає формулі (3,8):

$$R_{\text{я}} = \beta \cdot (r_{\text{р.1}} + d_{\text{дп}}); \quad (3.8)$$

$$R_{\text{я}} = 1,35 \cdot (0,0325 + 0,018) = 0,068 \text{ Ом.}$$

де  $\beta$  - температурний коефіцієнт зміни лобового опору двигунів серії Д  
Динамічний крутний момент при запуску і гальмуванні:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \omega_n / 2,7$$

$$M_{\text{дин}} = 125,25 \cdot 52,3 / 2,7 = 2429 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Статичний момент при опусканні фурми (двигун працює в рекуперативному режимі) відбувається за формулою (3,9):

$$M_{\text{с1}} = M_{\text{опуск}} = \frac{G_{\text{ф}}}{i} \cdot 2 \frac{d_{\text{к}}}{2} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}; \quad (3.9)$$

$$M_{\text{с1}} = M_{\text{опуск}} = \frac{34 \cdot 10^3}{4,3} \cdot 2 \frac{0,6}{2} \cdot 0,96 \cdot 0,84 = 1912,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковий момент двигуна при опусканні фурми відповідає формулі (3.10):

$$M_{п1} = - M_{дин} + M_{опуск}; \quad (3.10)$$

$$M_{п1} = -2429 + 1913 = -516 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Гальмівний момент двигуна при опусканні фурми відповідає формулі (3.11):

$$M_{т1} = M_{дин} - M_{опуск}; \quad (3.11)$$

$$M_{т1} = 2429 - 1913 = 516 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Сумарний момент інерції електроприводу відповідає формулі (3.12):

$$J_{\Sigma} = J_{мех} + J_{я}; \quad (3.12)$$

$$J_{\Sigma} = 115 + 10,25 = 125,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Час розгону (гальмування) до робочої швидкості - за формулою (3.13):

$$t_{п1} = t_{т1} = w_{двр} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{M_{дин}}; \quad (3.13)$$

$$t_{п1} = t_{т1} = 51,6 \cdot \frac{125,25}{2429} = 2,6 \text{ с}.$$

Кутова швидкість обертання двигуна при роботі на заданій швидкості задається формулою (3.14):

$$w_{дву} = \frac{V_{y} \cdot i}{d_{к}}; \quad (3.14)$$

$$w_{дву} = \frac{0,12 \cdot 4,3}{0,6/2} = 1,72 \text{ с}^{-1}$$

Час розгону (гальмування) до заданої швидкості - за формулою (3.15):

$$t_{п2} = t_{т2} = w_{дву} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{M_{дин}}; \quad (3.15)$$

$$t_{п2} = t_{т2} = 1,72 \cdot \frac{125,25}{2429} = 0,089 \text{ с}.$$

Час гальмування від робочої швидкості до заданої (час розгону від заданої швидкості до робочої швидкості) дається за формулою (3.16):

$$t_{т3} = t_{п3} = (w_{двр} - w_{дву}) \cdot \frac{J_{\Sigma}}{M_{дин}}; \quad (3.16)$$

$$t_{т3} = t_{п3} = (51,6 - 1,72) \cdot \frac{125,25}{2429} = 2,5 \text{ с}.$$

Відстань, пройдена при розгоні (гальмуванні до робочої швидкості), відповідає формулі (3,17):

$$S_{п1}=S_{т1}=\frac{a \cdot t_{п1}^2}{2} \quad (3.17)$$

$$S_{п1}= S_{т1} = \frac{1,3 \cdot 2,6^2}{2} = 4,6 \text{ м.}$$

Час опускання фурми з робочою швидкістю 3,6 м/с на висоту 5 м від рівня металу в статичний момент  $t_{п1}$  відповідає формулі (3,18):

$$t_{п1}=\frac{S_1-S_{п1}-5}{V_p}; \quad (3.18)$$

$$t_{п1}=\frac{24,8-4,6-5}{0,76} = 4,2 \text{ с.}$$

Відстані, пройдені при розгоні (гальмуванні) до заданої швидкості і від заданої швидкості до робочої відповідно за формулами (3.19) і (3.20):

$$S_{п2}=S_{т2}=\frac{a \cdot t_{п2}^2}{2}; \quad (3.19)$$

$$S_{п2}= S_{т2} = \frac{1,3 \cdot 0,089^2}{2} = 0,005 \text{ м;}$$

$$S_{п3}=S_{т3}=\frac{a \cdot t_{п3}^2}{2}; \quad (3.20)$$

$$S_{п3}= S_{т3} = \frac{1,3 \cdot 2,5^2}{2} = 4,3 \text{ м.}$$

Час опускання із заданою швидкістю (5 м від металевого рівня) - за формулою (3.21):

$$t_{y1}=\frac{5-S_{т3}-S_{т2}}{V_y}; \quad (3.21)$$

$$t_{y1} = \frac{5-4,6-0,005}{0,12} = 5,8 \text{ с.}$$

Пауза між повним підйомом і опусканням фурми приймається рівною 1 хвилині, після чого фурма виймається з конвертера зі швидкістю 0,12 м/с (до висоти 3,8 м над рівнем металу).

Пусковий момент двигуна при підйомі фурми відповідає формулі (3.22):

$$M_{п2} = M_{дин} + M_{под}; \quad (3.22)$$

$$M_{п2} = 2429 + 2942 = 5371 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Гальмівний момент двигуна при підйомі фурми відповідає формулі (3.23):

$$M_{T2} = -M_{\text{дин}} + M_{\text{под}}; \quad (3.23)$$

$$M_{T2} = -2429 + 2942 = -512 \text{ Нм}$$

Час підйому із заданою швидкістю (в статичний момент  $M_{s2} = M_{\text{під}} = 2942 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) здійснюється за формулою (3.24):

$$t_{y2} = \frac{3,8 - S_{\text{п2}} - S_{\text{п3}}}{V_y}; \quad (3.24)$$

$$t_{y2} = \frac{4,5 - 4,3 - 0,005}{0,12} = 1,6 \text{ с}$$

Час підйому з робочою швидкістю в найвище положення - за формулою (3.25):

$$t_{\text{п2}} = \frac{S_3 - S_{T1}}{V_p}; \quad (3.25)$$

$$t_{\text{п2}} = \frac{24,8 - 4,6}{3,6} = 5,6 \text{ с.}$$

Залежності крутного моменту двигуна (діаграма навантаження) і швидкості фурми (тахограма) показані на рисунку 3.1.

Час повного циклу відповідає формулі (3.26):

$$T_2 = 2 \cdot t_{\text{п1}} + t_{\text{рі}} + 2 \cdot t_{\text{п2}} + t_{y1} + 2 \cdot t_{\text{п3}} + t_{\text{р2}} + t_{y2} + t_{\text{паузи}}; \quad (3.26)$$

$$T_c = 2 \cdot 2,6 + 4,2 + 2 \cdot 0,089 + 5,8 + 2 \cdot 2,5 + 5,6 + 1,6 + 6 = 34 \text{ с.}$$

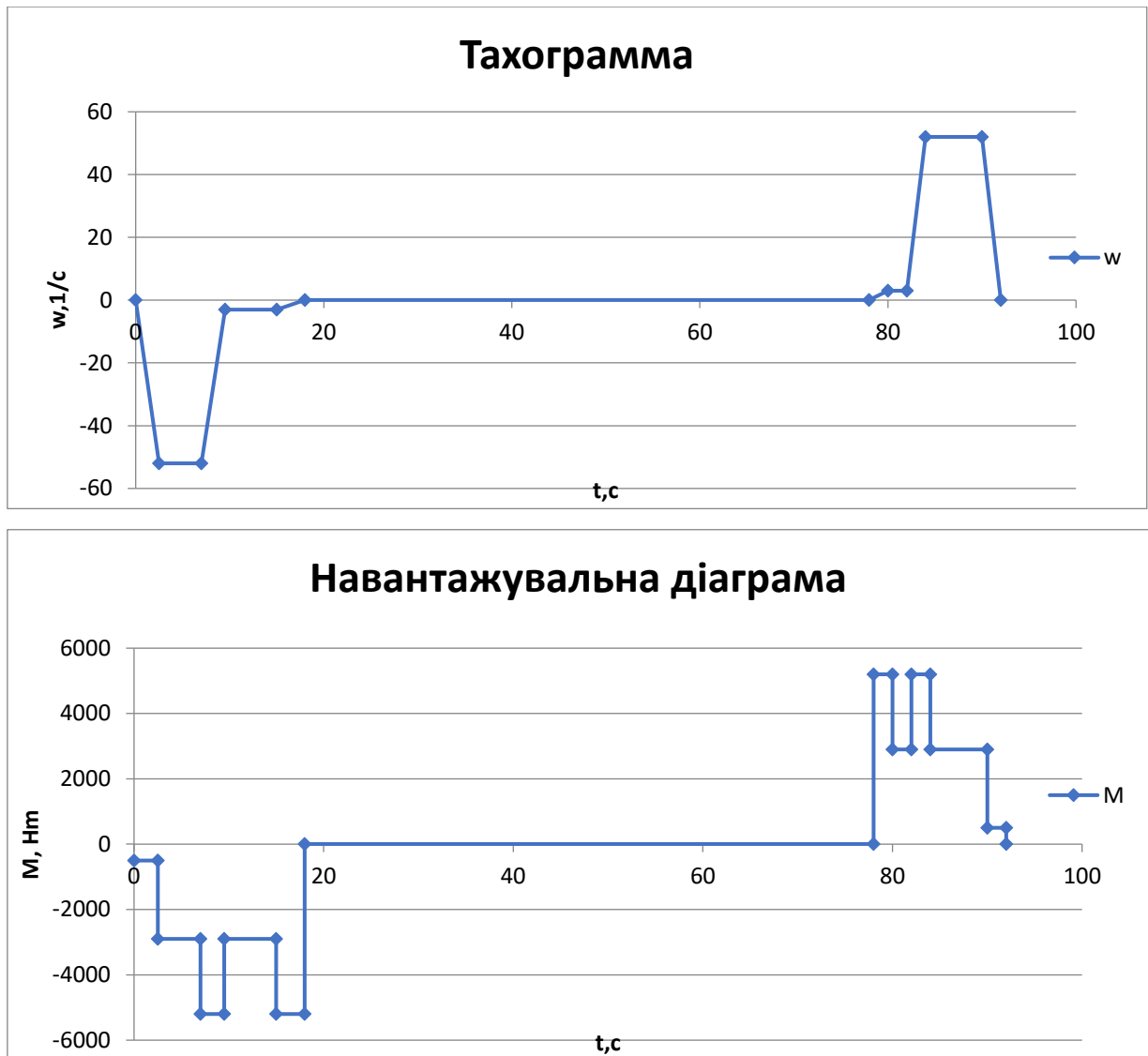


Рисунок 3.1 – Навантажувальна діаграма і тахограма механізму підйому фурми при повному підйомі і опусканні

### 3.4 Перевірка двигуна на нагрівання і перевантаження

Випробування на перегрів проводиться методом еквівалентного крутного моменту. Необхідно обчислити еквівалентний момент при роботі електроприводу  $\sum T$  п. Еквівалентним моментом  $\epsilon$ :

$$M_{\epsilon} = \sqrt{\frac{(M_{п1}^2 + M_{т2}^2) \cdot t_{п1} + M_{с1}^2 \cdot t_{с1} + (M_{т1}^2 + M_{п2}^2) \cdot t_{п3} + M_{с1}^2 \cdot t_{y1} + (M_{т1}^2 + M_{п2}^2) \cdot t_{п2} + M_{y1}^2 \cdot t_{y1} + M_{п2}^2 \cdot t_{п2}}{\sum t_p}}$$

$$= 2202 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\beta_0 = 0,25$$

$$\beta := \frac{1+\beta_0}{2} \quad \beta=0,625$$

Фактична тривалість включення електроприводу:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{\sum t_p}{\beta_0 \cdot 6 + \beta \cdot (2 \cdot t_{n1} + 2 \cdot t_{n2} + 2 \cdot t_{n3}) + t_{p1} + t_{p2} + \beta_0 \cdot (t_{y1} + t_{y2})} = 0,94$$

де,  $\sum t_p$  - час циклу фактичної роботи приводу (сумарний час циклу без пауз в роботі).

Так як  $M_n = 2205$  і  $M_e = 2202$  Н·м, то обраний двигун прогрівається, так як виконується умова  $M_n \geq M_e$  з урахуванням фактичної тривалості експлуатації.

Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність

Двигун перевантажений, якщо виконується наступна умова:

$$M_n \geq \lambda \cdot M_n;$$

де,  $M_n$  - пусковий момент двигуна при підйомі фурми.

Так як  $\lambda M_n = 5212$  і  $M_n = 5371$  Н·м, то обраний двигун нагрівається, тому що умова виконується.

## 4 ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНОГО СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

### 4.1 Вибір і характеристики тиристорного перетворювача

Для електродвигуна потужністю  $P_n = 110$  кВт, напругою  $U_n = 440$  В, номінальним струмом  $I_n = 274$  А, струмовим перевантаженням  $\lambda_i = 3,0$  найбільш доцільною схемою випрямлення є трифазна мостова схема з живленням від мережі змінного струму 380 В.

При визначенні номінальних значень випрямленої напруги і струму тиристорного перетворювача необхідно забезпечити:

$$U_{дн} \geq U_n = 440 \text{ В}, I_{дн} = I_n \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_{тп}} = 274 \cdot \frac{3}{2,25} = 365,3 \text{ А},$$

де  $\lambda_{тп}$  - перевантажувальна здатність тиристорного перетворювача протягом 10 с.

Цим умовам відповідає тиристорний перетворювач серії КТЕ-320 / 440-131-23УХЛ4 на номінальний струм  $I_{дн} = 320$  А і напругу  $U_{дн} = 440$  В:

- одиночний електропривід з лінійним контактором;
- реверсивна, з ланцюгом якоря зі зворотним струмом;
- трансформаторна версія; швидкість АКП для однієї зони;
- вбудований блок живлення збудження двигуна, електромагнітного гальма та динамічного гальмування;

Для помірно холодного клімату існує 4 категорії розміщення. Схеми зворотного тиристорного перетворювача показані на рис 4.1.

Тиристорний перетворювач з роздільним управлінням вентильними групами. Перевага таких інверторів в порівнянні з перетворювачами загального управління полягає в тому, що відсутній струм балансування, що підвищує ефективність і надійність роботи приводу за рахунок зниженої ймовірності «перекидання» інвертора.

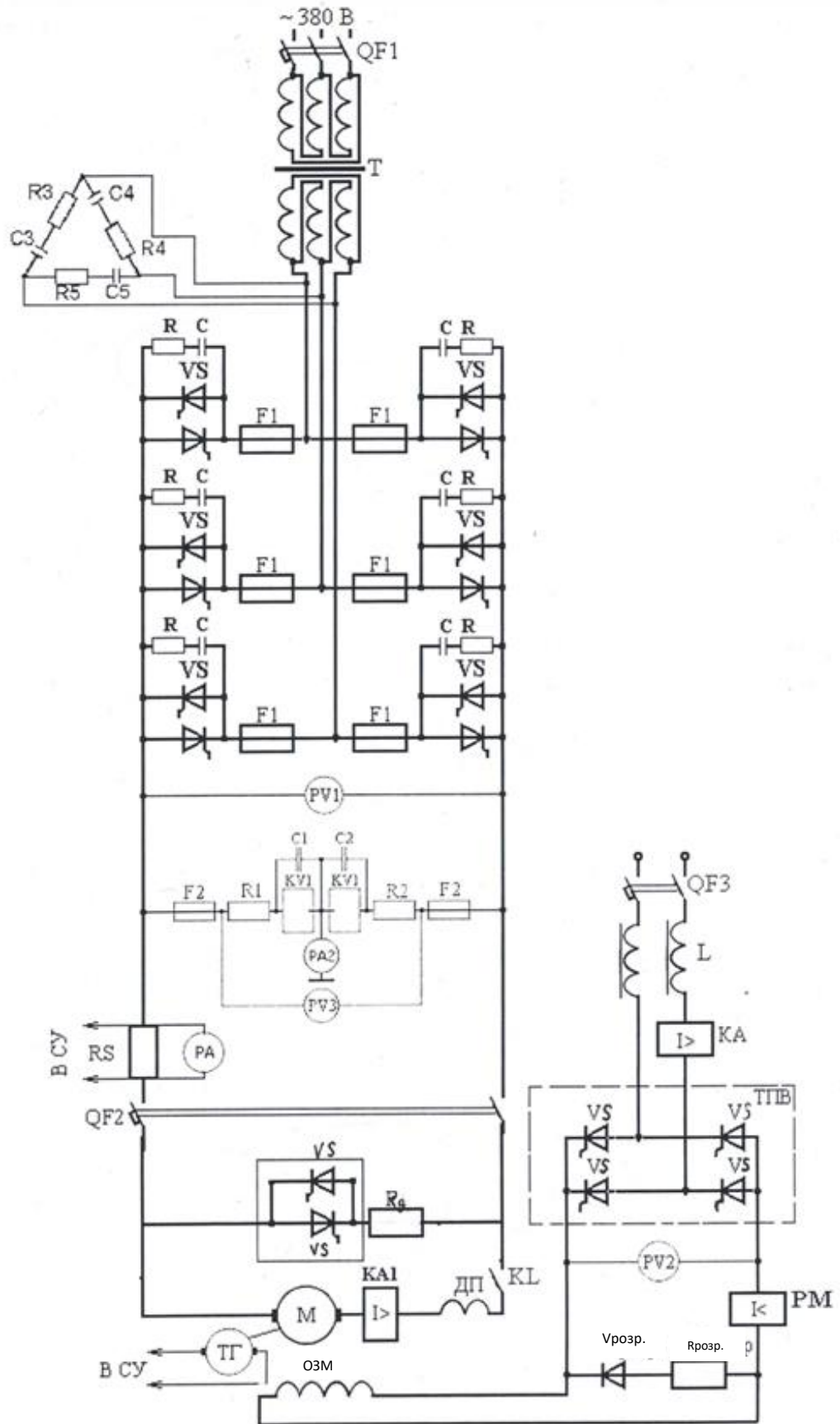


Рисунок 4.1 – Силовая схема электроприводу з тиристорним перетворювачем

## 4.2 Вибір і характеристики силового трансформатора

Так як в обраний комплект КТЕ входить силовий трансформатор, нижче наведені тільки його технічні дані. Використовується трансформатор із серії сухого типу ЦЗП-250/0,7УЗ з технічними даними, наведеними в таблиці 4.

Таблиця 4 - Технічні дані трансформатора ЦЗП-250/0,7УЗ

Група Підключення	S <sub>Н</sub> кВА	Номінальна напруга, В			Номінальні струми, А		ек%, %	Втрати, Вт		I <sub>о</sub> , %
		U <sub>1л</sub>	U <sub>2л</sub>	U <sub>dh</sub>	I <sub>2л</sub>	I <sub>dh</sub>		ΔP <sub>xx</sub>	ΔP <sub>кз</sub>	
Δ/Δ-0	230	380	416	460	326	400	4,7	915	3700	5,2

Максимальне значення випрямленої ЕРС знаходиться в формулі (4.1):

$$E_{d0} = 1,35 \cdot U_{2л}; \quad (4.1)$$

$$E_{d0} = 1,35 \times 416 = 561,6 \text{ В.}$$

Струм первинної лінії знаходять за формулою (4.2):

$$I_{1л} = \frac{I_{2л}}{k_T}; \quad (4.2)$$

$$I_{1л} = \frac{326}{0,913} = 357 \text{ А.}$$

де  $k_T$  - коефіцієнт трансформації.

Коефіцієнт трансформації знаходимо у формулі (4,3):

$$k_T = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}; \quad (4.3)$$

$$k_T = \frac{380}{416} = 0,913.$$

Опір фази трансформатора, зведеної на вторинну обмотку, розраховуємо формулі (4.4):

$$Z_T = \frac{e_{K\%} \cdot U_{2л}}{100 \cdot I_{2л}}; \quad (4.4)$$

$$Z_T = \frac{4,7 \cdot 416}{100 \cdot 326} = 0,06 \text{ Ом.}$$

Активний опір обмоток трансформатора (для вторинної обмотки, з'єднаної «трикутником») відповідає формулі (4.5):

$$R_T = \frac{\Delta P_{кз}}{m \cdot (I_{2л} / \sqrt{3})}; \quad (4.5)$$

$$R_T = \frac{3700}{3 \cdot 326^2} = 0,016 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір знаходимо у формулі (4.6):

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}; \quad (4.6)$$

$$X_T = \text{Ом} \sqrt{0,06^2 - 0,016^2} = 0,0578$$

Індуктивність трансформатора за формулою (4.7):

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f_c}; \quad (4.7)$$

$$L_T = \frac{0,0578}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,18 \text{ мГн}$$

### 4.3 Вибір згладжуючих дроселів

Згладжуючи дросельна заслінка не вибирається, так як двигун серії D

допускається до роботи без додаткової дросельної заслінки.

#### **4.4 Вибір і характеристика джерела живлення для збудження двигуна**

Обмотка збудження двигуна приводиться в дію перетворювачем збудника, вбудованим в тиристор. Немає необхідності форсувати напругу збудження, тобто необхідно підбирати джерело струму з номінальним струмом не менше  $I = 5,5 \text{ A}$  і напругою 220 В.

Цим умовам відповідає збуджувач серії КТЕ-7 / 220-9-УХЛ4, вбудований в тиристорний перетворювач. Живлення збудника здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В через обмежувач струму L (рисунок 1.3). Посібник з однофазного незворотного покриття. Змінна напруга 220 В знімається з вторинної обмотки допоміжного трансформатора.

#### **4.5 Розрахунок і побудова характеристик регулювання перетворювача**

Перетворювачі серії КТЕ для СІФУ використовують лінійну опорну напругу. Розрахункові властивості зворотного тиристорного перетворювача СІФУ з лінійною опорою обчислюються за формулою (знак «-» позначає групу «Вперед», «+» - «Назад»):

$$E_d = \pm E_{do} \cdot \cos\left(\alpha_{\text{нач}} \mp \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{U_{\text{оп.м}}}\right) = \pm 561,6 \cdot \cos\left(95^\circ \mp \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{8}\right).$$

де  $\alpha_{\text{нач}}$  - початковий кут збігу характеристик, який приймається рівним  $95^\circ$ ;

$U_{\text{оп.м}}$  - максимальне значення опорної напруги 8 В.

Розрахункові дані представлені в таблиці 5, а на рисунку 4.2 наведені

коригувальні характеристики  $E_d=f(U_y)$ .

Таблиця 5 - Регулювальні характеристики СІФУ і оборотного ТП

		-7																
$U_y, В$	-8		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
<b>ГРУПА «ВПЕРЕД»</b>																		
$E_{d1}, В$	-534	-534	-534	-492	-430	-352	-259	-157	-48,9	61,1	169	270	361	438	498	534	534	
<b>ЗАДНЯ ГРУПА</b>																		
$E_{d1}, В$	-534	-534	-498	-438	-361	-270	-169	-61,1	48,9	157	259	352	430	492	534	534	534	

Номинальний кут регулювання визначається за формулою (4,8):

$$\alpha_H = \arccos \left( \frac{U_H + I_H \cdot a_B \cdot \left( R_T \frac{X_T \cdot m}{2\pi} \right) + a_B \cdot \Delta U_B}{E_{d0}} \right); \quad (4.8)$$

$$\alpha_H = \arccos \left( \frac{440 + 274 \cdot 2 \cdot \left( 0,016 + \frac{0,0578 \cdot 3}{2\pi} \right) + 2 \cdot 2}{561,6} \right) = 33,575^\circ.$$

Кут перемикання тиристорів при  $I_{\max} = \lambda_i \cdot U$  знаходимо за формулою (4.9):

$$\gamma = \arccos \left( \cos \alpha_H - \frac{p \cdot X_T \cdot I_{\max}}{\pi \cdot E_{d0}} \right) \alpha_H; \quad (4.9)$$

$$\gamma = \arccos \left( \cos 33,575^\circ - \frac{6 \cdot 0,0578 \cdot 3 \cdot 274}{3,14 \cdot 561,6} \right) 33,575^\circ = 12^\circ.$$

Максимальне значення кута регулювання знаходять за формулою (4,10):

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - (\gamma + \delta + \Delta\alpha); \quad (4.10)$$

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - (12^\circ + 3^\circ + 3^\circ) = 162^\circ.$$

де,  $\Delta\alpha = 3^\circ$  - допустима асиметрія імпульсів,

$\delta$  - кут відновлення замкових властивостей тиристора:

Максимальна ЕРС тиристорного перетворювача з точки зору безпечної інверсії при  $\alpha_{\max} = 155^\circ$  задається формулою (4.11):

$$E_{d\max} = E_{d0} \cos \alpha_{\max}; \quad (4.11)$$

$$E_{d\max} = 561,6 \cdot \cos 162^\circ = -534,1 \text{ В.}$$

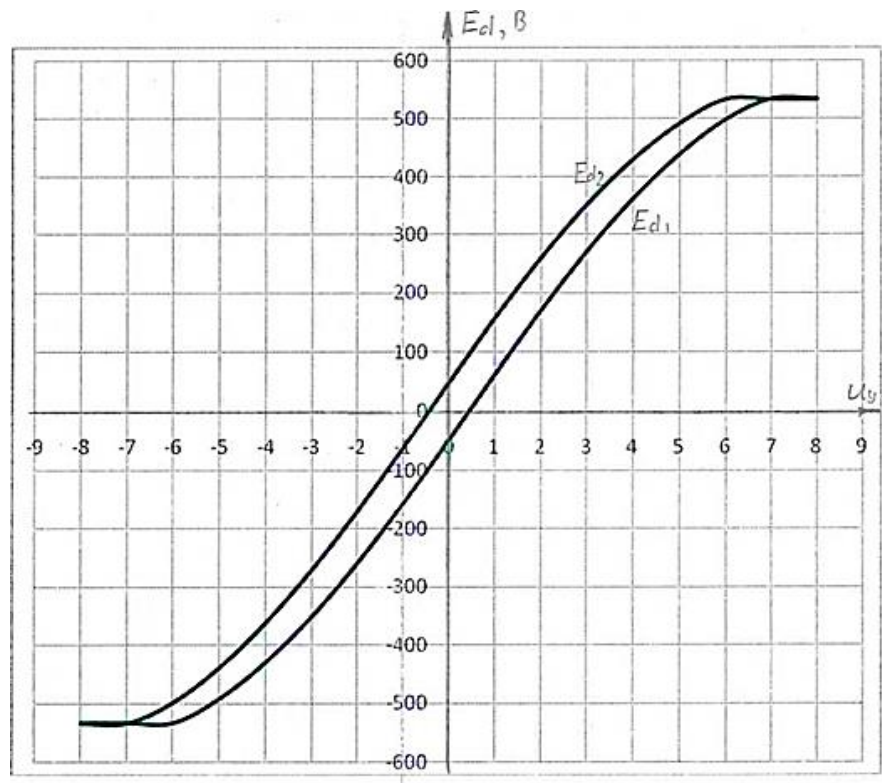


Рисунок 4.2 – Регулювальні характеристики тиристорного перетворювача

## 5 АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 5.1 Вибір структури АВР і розробка основних параметрів

Відповідно до вимог технологічного процесу, електропривод SAR повинен забезпечувати точне регулювання швидкості опускання і підйому вимірювальної насадки.

Точність упору форсунки і час опускання або збільшення швидкості підйому (опускання) форсунки досягається за допомогою обмежувальних ключів, встановлених по шляху руху форсунки. Керуючий сигнал того чи іншого кінцевого вимикача надходить на схему обробки сигналу завдання, а потім на вхід автоматичного управління електроприводом вимірювальної насадки.

Електропривод електрично захищений кінцевими вимикачами від неприпустимо великих переміщень. При остаточному вигині металеві упори кріпляться до рейок вниз і вгору.

В аварійній ситуації мірна насадка піднімається вручну спеціальною храповою лебідкою, яка встановлена на тій же платформі 5, що і електропривод форсунки.

Швидкість АТС складається з регулятора швидкості і регулятора струму.

Сигнал завдання на збільшення або зменшення швидкості формується системою цеху автоматичного управління технологічними режимами роботи, а також кінцевими вимикачами, встановленими по шляху руху форсунки.

На вхід пристрою регулювання інтенсивності швидкості ЗІ подається опорний сигнал, який формує необхідну швидкість розгону приводу (прискорення). Напряга зворотного зв'язку частоти обертання двигуна забезпечується імпульсним датчиком (енкодером), встановленим співвісно з валом двигуна. Різниця між встановленою напругою швидкості і зворотною напругою встановлюється на вході регулятора швидкості ПК.

Для обмеження максимального струму якоря двигуна обмежують потужність регулятора швидкості.



Еквівалентна індуктивність схеми випрямлення дорівнює формулі (5.1):

$$L_e = a_e \cdot L_T + L_{CD} + L_J; \quad (5.2)$$

$$L_e = 2 \cdot 0,114 + 0 + 4,36 = 4,59 \text{ мГн.}$$

Еквівалентний опір ланцюга якоря двигуна задається формулою (5.3):

$$R_e = 1,1 \cdot R_J + a_e \cdot \left( R_T + \frac{X_T \cdot m}{2 \cdot \pi} \right); \quad (5.3)$$

$$R_e = 1,1 \cdot 0,031 + 2 \cdot \left( 0,0144 + \frac{0,0358 \cdot 3}{2 \cdot 3,14} \right) = 0,097 \text{ Ом.}$$

де  $R_{he}$  – опір якрного ланцюга при робочій температурі  $85^\circ\text{C}$ .

Опір ланцюга якоря при робочій температурі  $85^\circ\text{C}$  відповідає формулі (6.4):

$$\begin{aligned} R_J &= \beta \cdot (r_J + r_{лп}); \\ R_J &= 1,35 \cdot (0,014 + 0,009) = 0,031 \text{ Ом,} \end{aligned} \quad (5.4)$$

де  $\beta$  - температурний коефіцієнт зміни лобового опору двигунів серії D.

Еквівалентна електромагнітна постійна часу схеми випрямлення має формулу (5.5):

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; \quad (5.5)$$

$$T_e = \frac{4,59 \cdot 10^{-3}}{0,0972} = 0,047 \text{ с.}$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу за формулою (5.6):

$$T_M = \frac{J_\Sigma \cdot R_e}{k\Phi_H^2}; \quad (5.6)$$

$$T_M = \frac{115 \cdot 0,097}{3,78^2} = 1,47 \text{ с,}$$

### 5.2.1 Розрахунок контуру регулювання струму якоря

В електричних приводах ОСАГО використовується регулятор струму ПІ. Структурна схема контуру регулювання струму якоря наведена на рисунку 5.2.

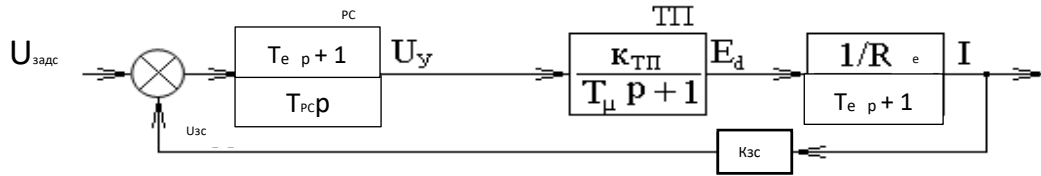


Рисунок 5.2 – Контур регулювання струму якоря

Сигнал струму знімається з датчиків струму. Коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку по струму задається формулою (5,7):

$$K_{от} = \frac{U_{от \max}}{I_{\max}} = \frac{U_{зт \max}}{\lambda_{двн} \cdot I_n}; \quad (5.7)$$

$$K_{от} = \frac{8}{3 \cdot 270} = 0,01 \text{ Ом},$$

де,  $I_{\max}$  - максимальний струм електродвигуна.

Передавальна функція регулятора струму відповідає формулі (5.8):

$$W_{pc} = \frac{T_e p + 1}{T_{рп} p} = \frac{T_e p + 1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot K_{ТП} \cdot K_{от} / R_e}; \quad (5.8)$$

$$W_{pc} = \frac{0,047p + 1}{2 \cdot 0,0033 \cdot p \cdot 30 \cdot 0,01 / 0,097} = \frac{0,047p + 1}{0,02p}.$$

### 5.2.2 Оцінка впливу ЕРС двигуна

При обліку ЕРС двигуна просадка струму  $\Delta I$  в усталених режимах роботи приводу відбувається за формулою (5.9):

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\text{уст}}}{I_{\max}} = \frac{2 \cdot T_{\mu}}{2 \cdot T_{\mu} + T_{\text{м}}}; \quad (5.9)$$

$$\Delta I = \frac{2 \cdot 0,0033}{2 \cdot 0,0033 + 0,22} \cdot 100\% = 2,9\%.$$

Так як допустиме падіння струму становить 5% згідно з вимогами, то немає необхідності компенсувати вплив ЕРС двигуна.

### 5.2.3 Задавач сили струму якоря

Швидкість, з якою збільшується струм якоря, впливає на роботу перемикачів двигуна. Тому значення похідної струму в ланцюзі якоря необхідно обмежити для якісної комутації. Величина похідної струму якоря оцінюється за формулою (6.10).

$$\left( \frac{di_a^*}{dt} / I_H \right)_{\max} = e^{-\pi/4} \cdot \sin(\pi/4) \cdot \frac{1}{T_{\mu}} \cdot \lambda_{\text{дв}}; \quad (5.10)$$

$$\left( \frac{di_a^*}{dt} / I_H \right)_{\max} = e^{-\pi/4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{0,0033} \cdot 3 = 293 \text{ I}_H/\text{с}.$$

Оскільки похідна струму якоря обмежена 200 В/с згідно з проектним завданням, на вході регулятора струму необхідно встановити задавач сили струму, структурна схема якого показана на рисунку 5.3.

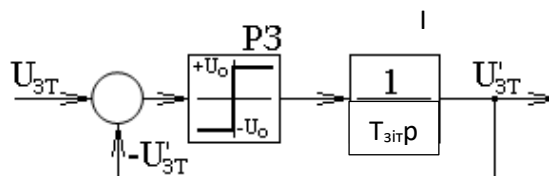


Рисунок 5.3 – Задавач інтенсивності струму якоря

Гранична напруга  $U$  задавача сили струму дорівнює 8 В, тоді постійна часу ЗІТ знаходять за наступною формулою (5.11)

$$T_{\text{зіт}} = 1,0432 \cdot \frac{U_0}{I_n \cdot \kappa_{\text{от}} \cdot (di_a^*/dt)_{\text{доп}}}; \quad (5.11)$$

$$T_{\text{зіт}} = 1,0432 \cdot \frac{8}{270 \cdot 0,01 \cdot 200} = 0,015 \text{ с.}$$

де  $(di_a^*/dt)_{\text{доп}}$  - допустиме значення швидкості наростання струму якоря.

#### 5.2.4 Регулятор швидкості

Просадка швидкості для Р–RS для статичного струму, що дорівнює номінальному струму двигуна, задається формулою (5.12):

$$\Delta\omega = I_c \cdot \frac{R_e}{c} \cdot \frac{4 \cdot T_\mu}{T_M}; \quad (5.12)$$

$$\Delta\omega = 270 \cdot \frac{0,097 \cdot 4 \cdot 0,0033}{3,78 \cdot 0,22} = 0,41 \text{ с}^{-1},$$

$$\Delta\omega/\omega_n = 0,41/56 \cdot 100\% = 0,75\%$$

До тих пір, поки це значення не перевищує допустиме, досить використовувати регулятор швидкості П.

Структурна схема контуру регулювання швидкості з П-регулятором швидкості показана на рисунку 5.4. Контур регулювання швидкості містить замкнутий внутрішній контур, який контролює струм якоря LCTR.

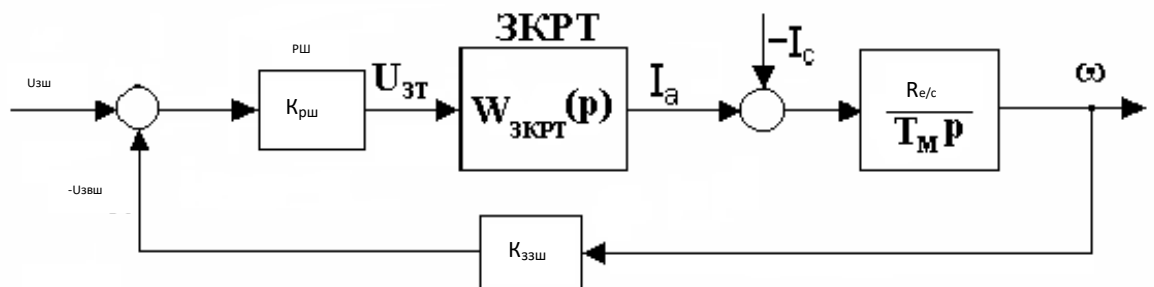


Рисунок 5.4 – Контур регулювання швидкості з Р-регулятором

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю знаходимо у формулі (5.13):

$$\kappa_{oc} = \frac{U_{ocmax}}{\omega_n}; \quad (5.13)$$

$$\kappa_{oc} = \frac{8}{56} = 0,143 \text{ В} \cdot \text{с},$$

де,  $U_{ocmax}$  - максимальне значення напруги швидкості роботи.

Коефіцієнт регулятора швидкості ВРХ за формулою (5.14):

$$\kappa_{pc} = \frac{T_M}{4 \cdot T_\mu} \cdot \frac{c}{R_e} \cdot \frac{\kappa_{ог}}{\kappa_{oc}}; \quad (5.14)$$

$$\kappa_{pc} = \frac{0,22 \cdot 3,78 \cdot 0,01}{4 \cdot 0,0033 \cdot 0,097 \cdot 0,143} = 45,4.$$

### 5.2.5 Регулятор інтенсивності швидкості

Для обмеження максимального прискорення приводу перед регулятором швидкості встановлений задавач інтенсивності швидкості (ВМС), структурна схема якого показана на рисунку 5.5.

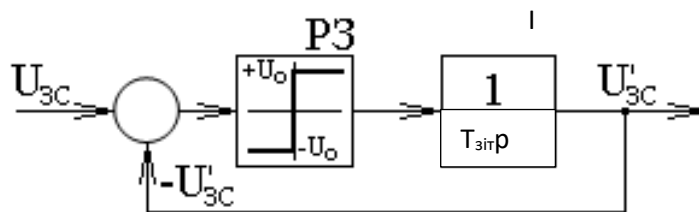


Рисунок 5.5 – Регулятор інтенсивності швидкості

Згідно з вимогами, допустимий динамічний струм не повинен перевищувати значення, рівне  $1,5 \cdot I_n$ , то максимальне прискорення приводу за формулою (5.15):

$$\varepsilon_{ma} = \frac{M_{дин max}}{J_\Sigma} = \frac{I_{дин max} \cdot k\Phi_n}{J_\Sigma} = \frac{1,5 \cdot I_n \cdot k\Phi_n^{-2}}{J_\Sigma}; \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_{ma} = \frac{1,5 \cdot 270 \cdot 3,78}{33} = 37,8 \text{ с}$$

Постійну часу установки інтенсивності швидкості знаходять за формулою (5.16):

$$T_{\text{зіс}} = \frac{U_0}{\kappa_{\text{ос}} \cdot \varepsilon_{\text{max}}}; \quad (5.16)$$

$$T_{\text{зіс}} = \frac{8}{0,143 \cdot 37,8} = 1,48 \text{ с,}$$

де  $U_0 = 8 \text{ В}$  - гранична напруга VMS.

Загальна структурна схема електроприводу АВР наведена на рисунок 5.6

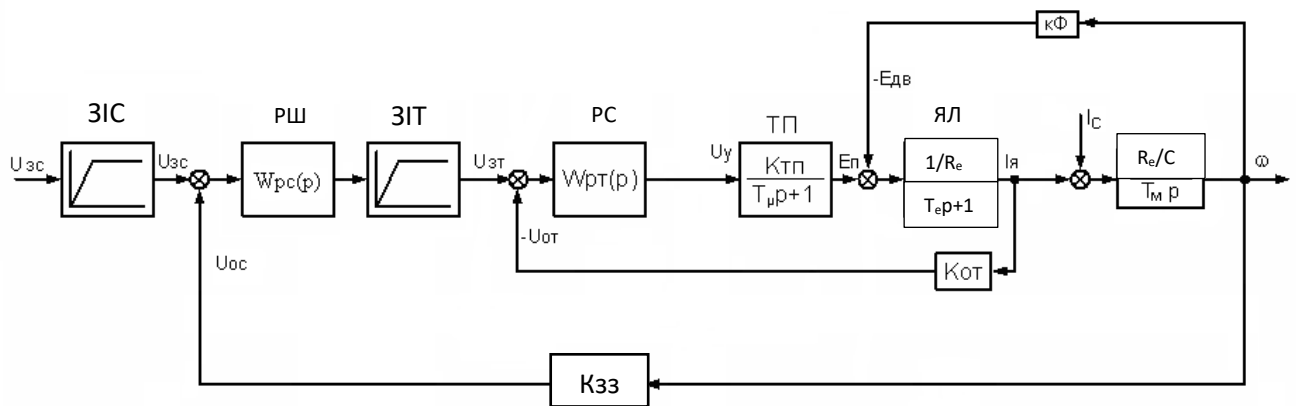


Рисунок 5.6 – Структурна схема електроприводу підйому вимірювальної фурми

## 5.3 Реалізація схеми САР електроприводу

### 5.3.1 Регулятор інтенсивності швидкості

Регулятор інтенсивності встановлений на вході регулятора швидкості і служить для обмеження крутного моменту в перехідних режимах і для забезпечення необхідного часу розгону приводу. Швидкість відображення інтенсивності задається часом прискорення та уповільнення.

Регулятор інтенсивності швидкості перетворює вхідне завдання з різкою зміною сигналу проблеми, який безперервно змінюється з часом. Час розгону та уповільнення можна встановлювати незалежно один від одного. Весь час регулювання інтенсивності встановлюються незалежно. Для часу встановлення інтенсивності доступні три блоки параметрів, які можна вибрати за допомогою двійкових входів вибору або через послідовний інтерфейс (через бінектор). Крім того, вихід регулятора інтенсивності згладжується на початку і в кінці розгону.

Датчик прискорення можна перемикає під час роботи. Налаштування інтенсивності встановлюються таким чином, щоб значення за замовчуванням не затримувалося від передачі на вхід регулятора швидкості. Якщо ввести на датчику прискорення час нуль, то встановлене значення швидкості передається безпосередньо на регулятор швидкості. Функціональна схема регулятора інтенсивності наведена на рисунку 5.1.

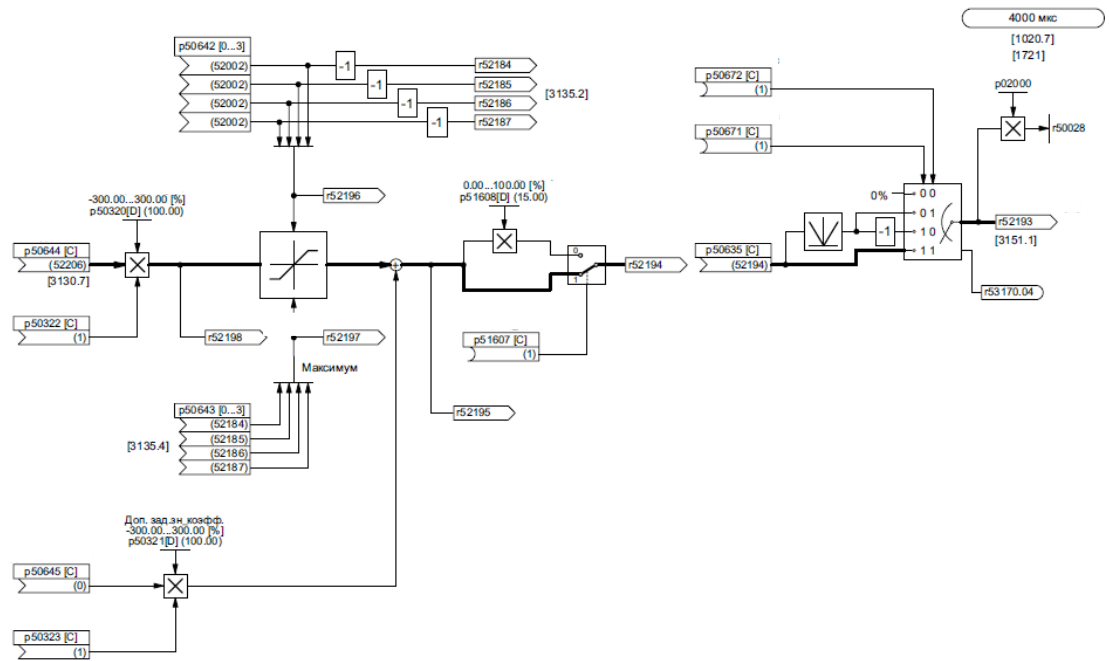


Рисунок 5.1 - Функціональна схема задавача інтенсивності

### 5.3.2 Регулятор швидкості

Регулятор швидкості порівнює задане значення і поточне значення швидкості і, в разі відхилення, виводить відповідне задане значення струму в регулятор струму (принцип: регулювання швидкості за допомогою допоміжного регулятора струму). Регулятор швидкості виконаний у вигляді Р-регулятора. Всі параметри контролера можуть бути налаштовані незалежно. Значення  $K_p$  (посилення) можна регулювати в залежності від сигналу підключення (зовнішнього або внутрішнього). При цьому коефіцієнт підсилення Р-регулятора швидкості можна встановити відповідно до поточного значення швидкості, поточного значення, різниці між встановленим значенням і поточним значенням.

Це піддається контролю за високою динамікою контуру управління. Для цього додається опорне значення струму, наприклад, в залежності від тертя і інерції приводу по регулятору швидкості. Визначення компенсації тертя та

інерції може бути виконано в рамках автоматичної оптимізації. Вихідне значення регулятора швидкості можна регулювати відразу після розблокування дросельної заслінки за допомогою параметрів.

Залежно від параметризації можна зняти регулятор швидкості і відрегулювати інвертор по крутному моменту або струму. Крім того, є можливість перемикатися між регулюванням швидкості та крутним моментом під час роботи за допомогою функції вибору ведучого/веденого. Функція вибирається як бінектор через термінал бінарного вибору або через послідовний інтерфейс. Поточне завдання вводиться через порт, який можна вибрати, і може бути отримано через аналоговий термінал або аналоговий інтерфейс.

У веденому режимі (режим управління крутним моментом або струмом) застосовується обмеження контролера. При цьому, в залежності від обмеження швидкості, встановленого в параметрах, можна впливати на контролер, щоб уникнути неприпустимих дистанцій їзди. Привід обмежений відхиленням швидкості. Функціональна схема регулятора швидкості показана на рис. 5.2, 5.3.

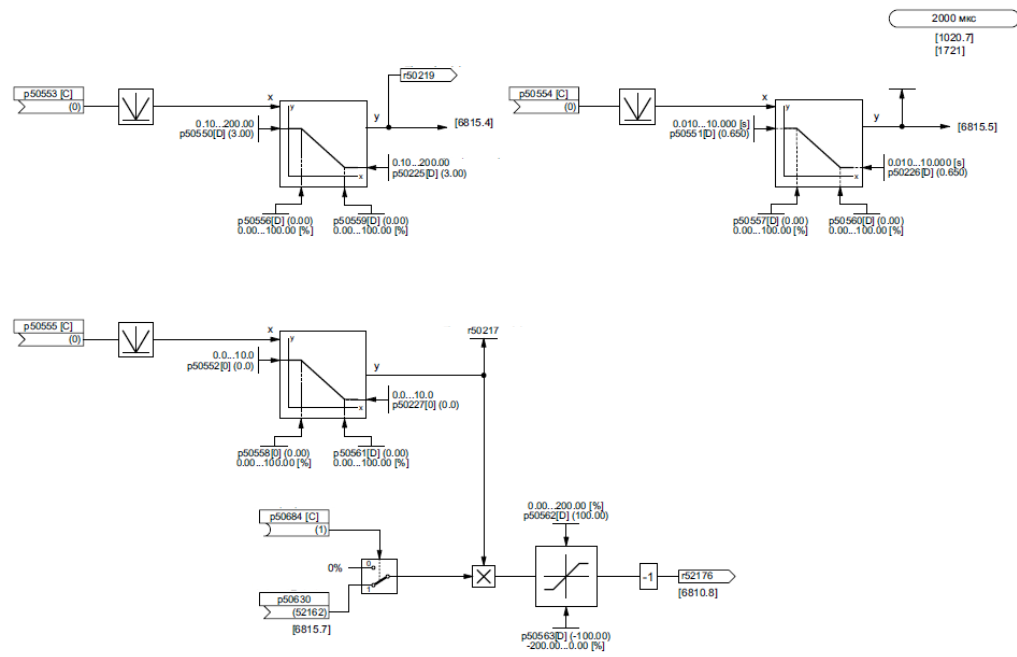


Рисунок 5.2 – Функціональна схема регулятора швидкості

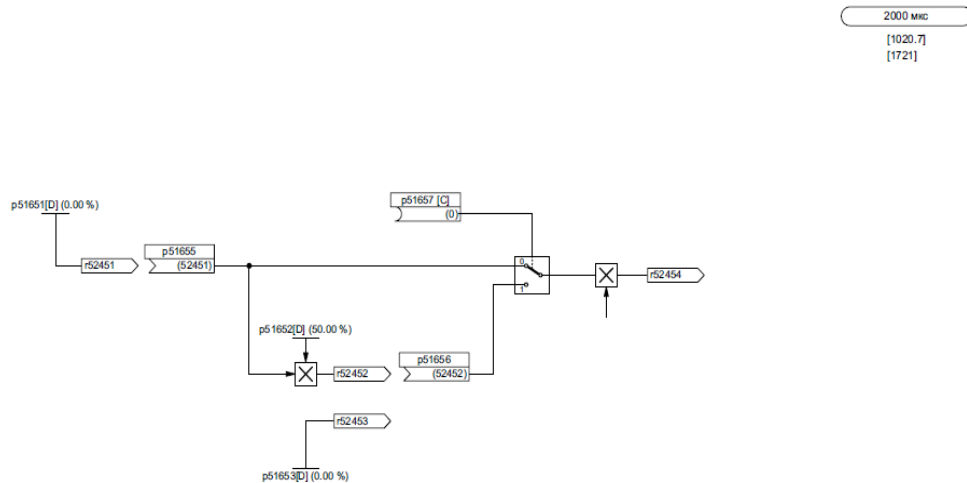


Рисунок 5.3 – Елементи функціональна схема регулятора швидкості

### 5.3.4 Регулятор струму

Контролер струму виконаний як контролер ІІ і самовідновлювальних і своєчасних керівництва по управлінню. При цьому компоненти Р і І можуть відключатися (управління Р або І). Значення струму визначається трансформатором струму та навантаженням на стороні змінного струму та використовується для перетворення змінного струму. Поточне обмеження використовується як поточна робота.

Вихід регулятора струму надходить на вхід блоку управління, який створює кут управління, а другий центр управління виконує ту ж функцію, що і цей центр («подвійне управління»).

«Подвійне підсилення» в поточній лінії управління покращує динаміку управління. Це дозволяє встановити час таймера від 6 до 9 мс. Подвійний контроль доступу працює відповідно до струму та напруги електромобілів і завдяки цьому контролю забезпечує коротке та безперервне керування і, навіть якщо час змінюється, вводить потрібний кут керування в блок керування.

Блок управління формує регуляторні виразки для тиристорів силового агрегату, синхронно і напруги мережі. Взаємодія не залежить від навколишнього поля і джерела енергії і проявляється у владі. Кут повороту

точки відліку часу залежить від величини регулятора струму і від двох переваг контролю. Контроль зменшився за параметром. Блок управління перемикається на швидкість 45 ... 65 Гц. За запитом ви можете встановити максимальну швидкість обертання мережі від 23 до 110 Гц через параметри. Робочий лист поточного контролера показаний на схемі. 6.4, 6.5.

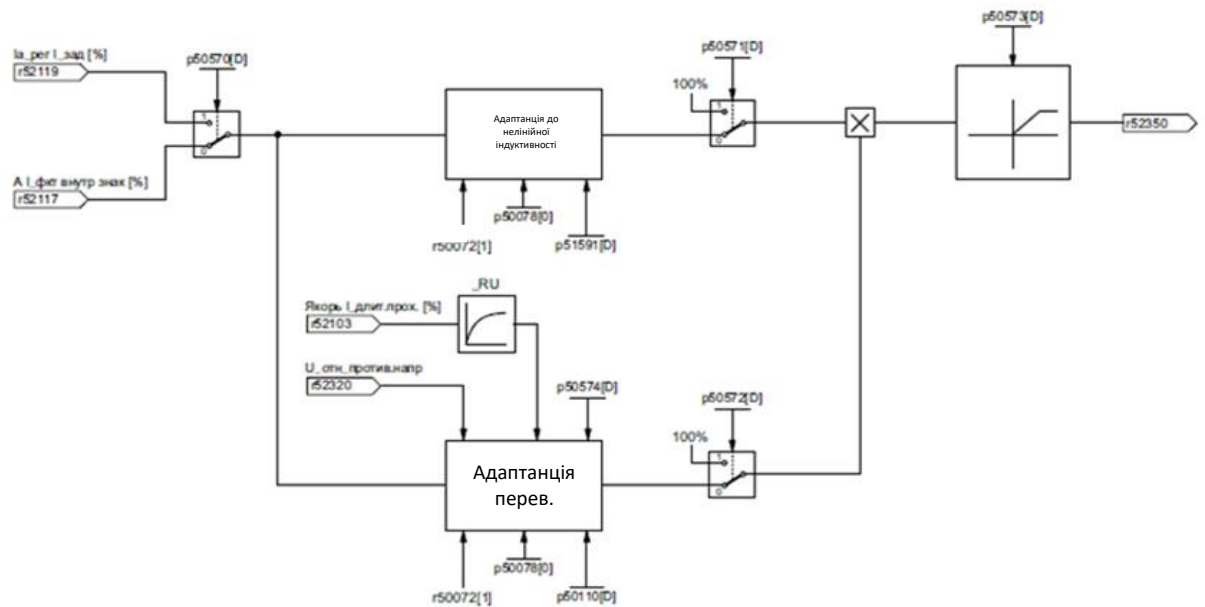


Рисунок 5.4 – Структурна схема роботи регулятора струму

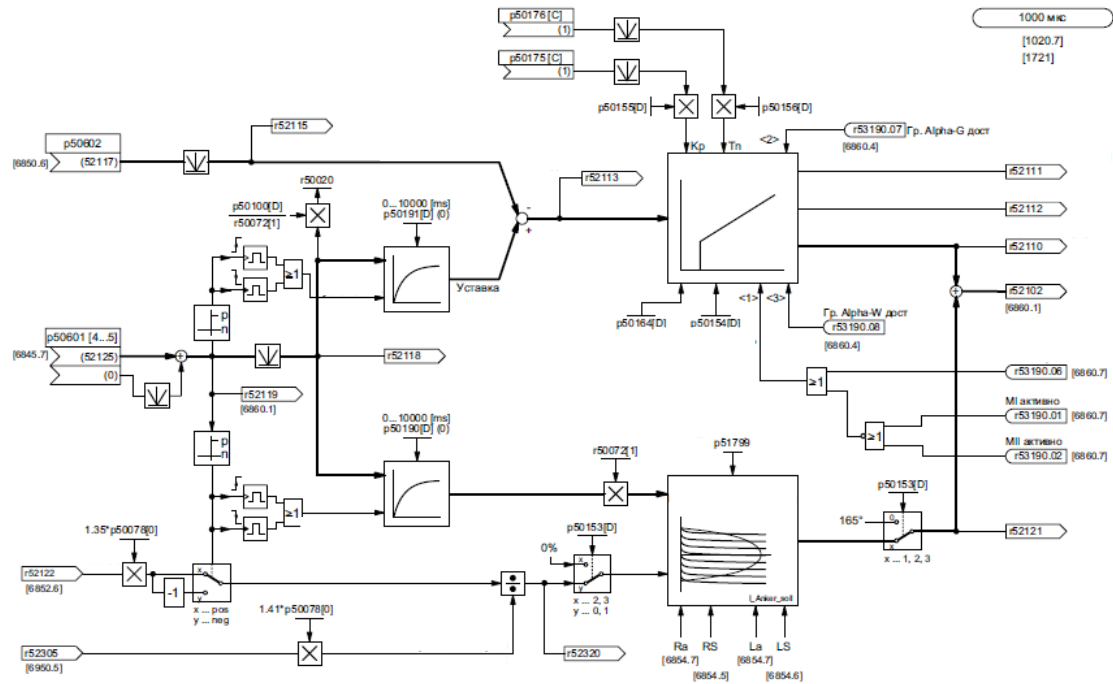


Рисунок 5.5 - Функціональна схема регулятора струму

### 5.3.5 Аналогові входи

Після перетворення в цифрове значення аналогове вхідне значення можна гнучко регулювати за допомогою параметрів нормалізації, фільтрації, математичного вибору символів і призначення зсуву. Оскільки значення доступне як порт, аналоговий вхід можна використовувати як основне посилення, а також як вторинне еталонне значення та значення обмеження.

Використовувані аналогові входи показані на рисунку 5.6.

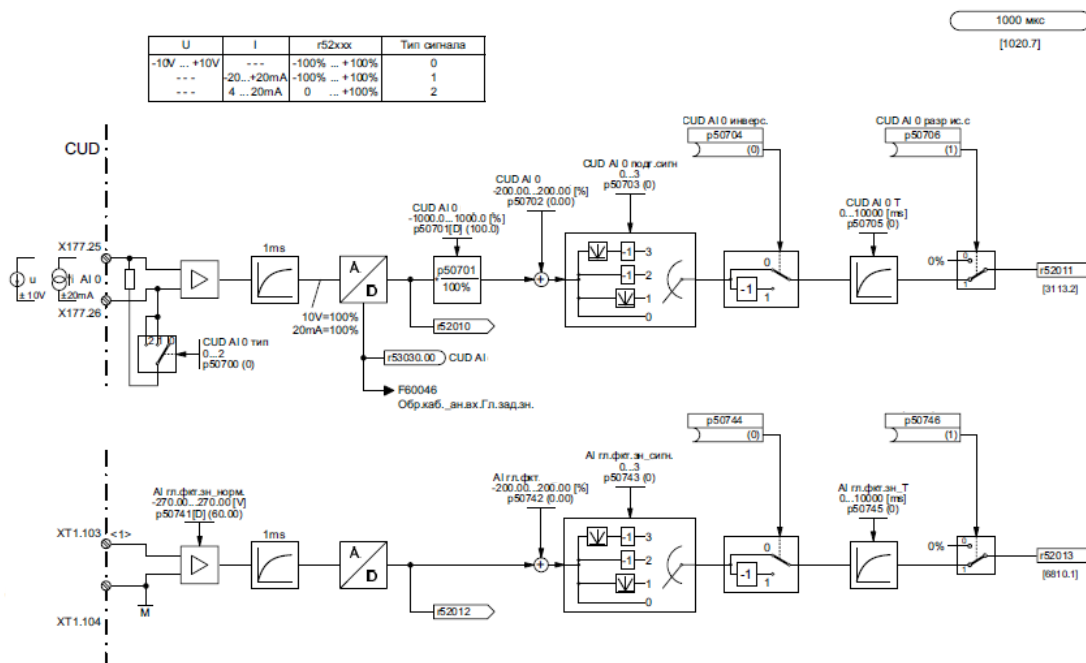


Рисунок 5.6 - Діаграма функцій аналогового входу

### 5.3.6 Аналогові виходи

Поточне значення струму відображається як фактичне значення на клемі 12. Вихід доступний у вигляді біполярного або абсолютного значення, а також можна вибрати полярність.

Для виведення інших аналогових сигналів доступні аналогові виходи з вибором. Вихід може бути біполярним або абсолютним. У цьому випадку ви можете вказати масштаб, зсув, полярність і інтервал між фільтрами. Необхідні значення виходу вибираються в точці дії шляхом введення номера роз'єму. Можливими вихідними значеннями є, наприклад, поточне значення швидкості, вихід датчика прискорення, опорна потужність, напруга мережі тощо.

Використовуваний аналоговий вихід показаний на рисунок 5.7.

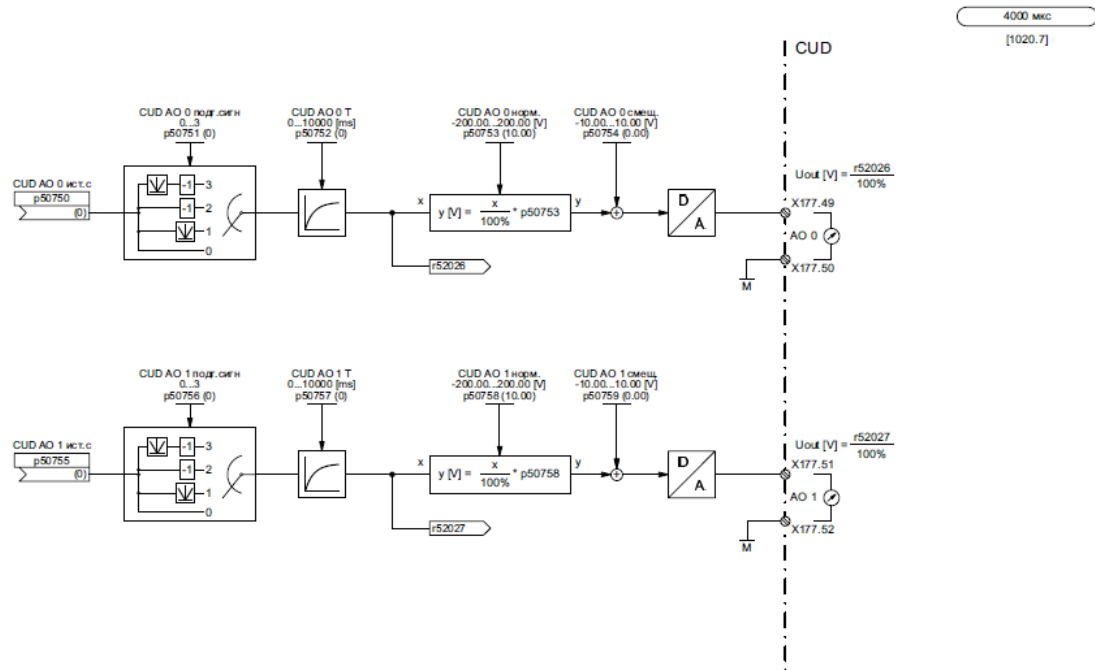


Рисунок 5.7 - Функціональна схема аналогових виходів

### 5.3.7 Процес оптимізації

Перетворювач доступний в заводському стані. Відрегулюйте регулятор, вибравши процес автоматичної оптимізації. Вибір режиму за допомогою спеціального цифрового ключа.

За допомогою автоматичної оптимізації можна налаштувати такі функції дроселювання:

- Оптимізація регулятора струму для регулювання та управління регулятором;
- Оптимізація регулятора швидкості для регулювання його характеристик;
- Автоматична фіксація виходу отруєння регулятор швидкості;

### 5.3.8 Моніторинг і діагностика

Параметр G000 вказує на робочий стан перетворювача. Для відображення результатів вимірювань доступно близько 50 параметрів. Крім того, робочі значення сигналів (з'єднань) контролера 300 можуть виводитися на дисплей програмним забезпеченням. Приклади результатів вимірювань, що відображаються на дисплеї: задане значення, значення струму, стан двійкових входів/виходів, напруга мережі, частота мережі, кут керування, входи/виходи аналогових клем, входи та виходи контролера, відображення граничних значень.

### 5.4 Розрахунок динамічних характеристик SAR

Для розрахунку перехідних процесів і оцінки статичних і динамічних властивостей проектованої системи управління електроприводом підйомного механізму вимірювального механізму розроблена математична модель системи автоматичного управління на основі спрощеної структурної схеми (рис. 5.9) і реалізована в програмі MATLAB Simulink. За допомогою цієї моделі отримано перехідні криві  $f = f(t)$  та  $I = f(t)$ , проаналізовано динамічні та статичні властивості системи для різних перехідних умов.

На рисунках перехідні процеси  $I = f(t)$  і  $i = f(t)$  при розгоні до робочої швидкості при опусканні сопла і  $I = f(t)$  і  $i = f(t)$  при розгоні до робочої швидкості при опусканні форсунки показані 5.11, 5.12. Усталене динамічне значення струму становить 775 А, максимальне значення струму - 830 А, а викид струму - за формулою (5.20):

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\text{уст}}}{I_{\max}}; \quad (5.20)$$

$$\Delta I = \frac{830 - 775}{830} \cdot 100\% = 6.6\%.$$

Математична модель САР наведена на рисунках 5.9 і 5.10.

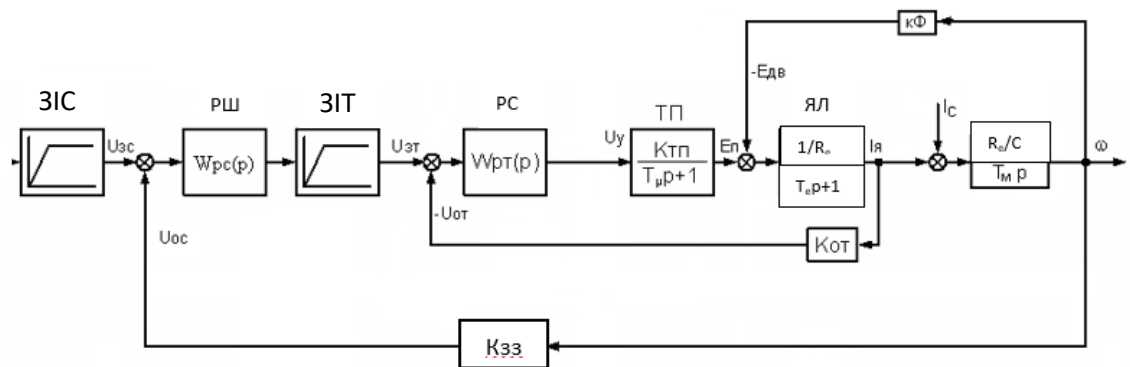


Рисунок 5.8 – Структурна схема САР електроприводу підйомного механізму вимірювальної фурми

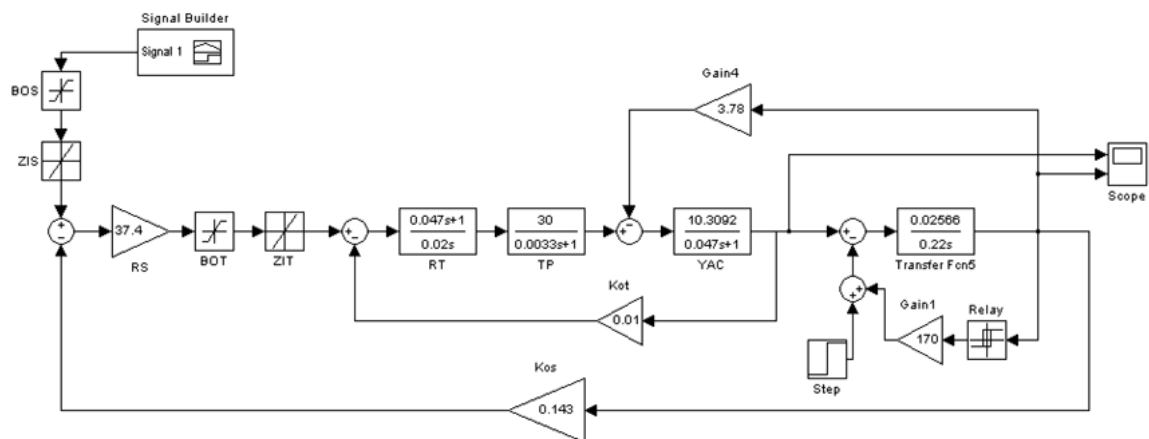


Рисунок 5.9 – Математична модель САР електроприводу підйому вимірювальної фурми.

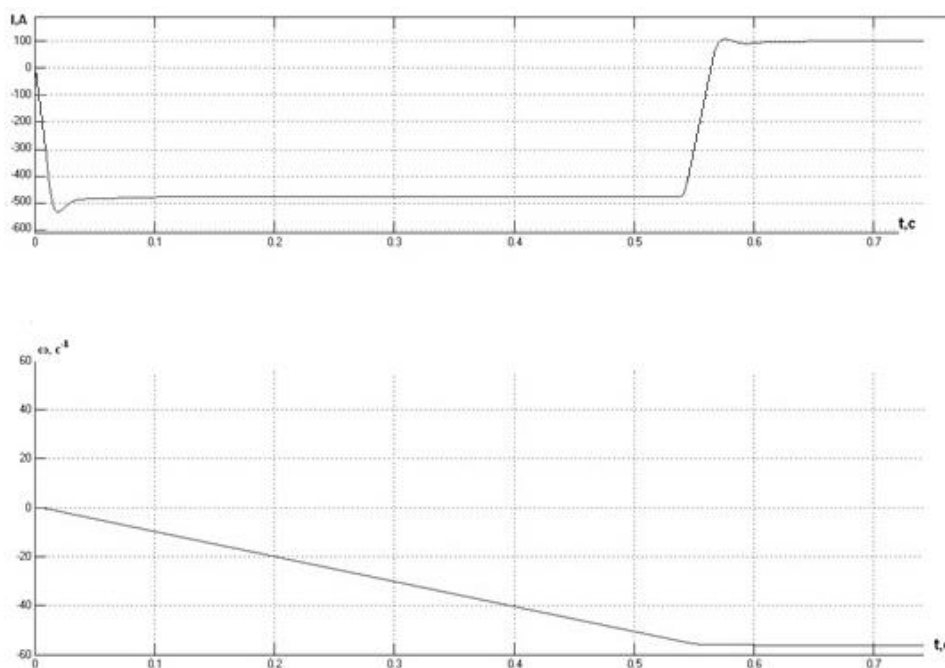


Рисунок 5.11 – Графіки  $I = f(t)$  і  $\omega = f(t)$  при розгоні до робочої швидкості при опущеній фурмі.

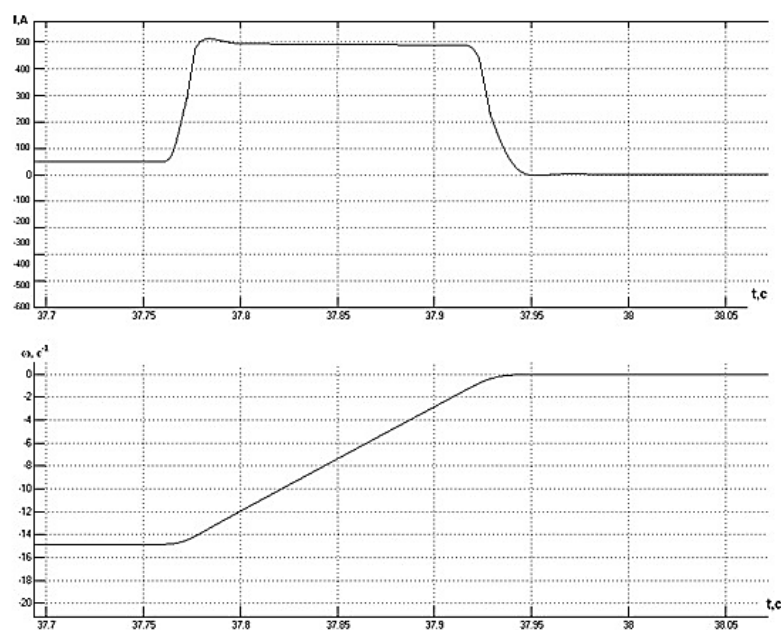


Рисунок 5.12 - Графіки  $I = f(t)$  і  $\omega = f(t)$  при гальмуванні.

Графіки показують, що всі процеси розгону та гальмування вимірювальної фурми відбуваються належним чином у відповідності із завданням.

## ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній роботі був розроблений електропривод вимірювальної фурми.

В ході аналізу технологічних умов були сформульовані основні вимоги до електроприводу підйомника.

Виходячи з вимог технології, був обрахований двигун постійного струму типу Д814У2 та обраний на номінальну напругу 440В.

З урахуванням номінальних даних двигуна і вимог технологічного процесу був обраний комплектний тиристорний електропривод КТЕ-320 / 440-131-23УХЛ4. Тиристорний перетворювач, який використовується для живлення ланцюга якоря двигуна, підключається до мережі змінного струму напругою 380 В через трансформатор серії вузлів ЦЗП-250 / 0,7.

Для живлення обмотки збудження двигуна та інших внутрішніх вимог був обраний перетворювач типу КТЕ-10/220-9-УХЛ4 з живленням від реактора обмеження струму 220 В змінного струму. Проаналізовано керуючі характеристики перетворювача потужності.

Управління здійснюється на базі модуля управління SINAMICS DCM.

Розроблено структурну схему системи керування автоматичним електроприводом, розраховані основні параметри системи ТП-Д і всі необхідні параметри контуру управління, коефіцієнтів зворотного зв'язку і датчиків.

Враховано функціональні можливості функціональних блоків модуля керування SINAMICS DCM, запропоновано автоматизовану вимірювальну систему. Розрахункове управління електроприводом забезпечує відображені настройки електроприводу фурми.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Іваненко І.П. Електроприводи промислових механізмів: сучасні рішення. - Київ: Техніка, 2020. - 320 с.
2. Петров П.В. Технології плавлення сталі в Україні. - Дніпро: Металургія України, 2018. - 275 с.
3. Сидоренко О.М., Коваленко Л.В. Контроль параметрів плавлення у сучасній металургії. // Металургійний вісник. - 2019. - Т.6, №4. - С. 56-67.
4. Державні стандарти України. ГОСТ 12345-2020. Контроль якості сталі. - Київ: Держстандарт, 2020. - 150 с.
5. Павленко М.М. Використання електроприводів у промислових процесах. // Інженерні технології. - 2021. - Т.11, №3. - С. 22-33.
6. Романюк Д.Д. Автоматизація процесів плавлення сталі на сучасних підприємствах. - Харків: Основа, 2016. - 215 с.
7. Тимошенко В.В. Розробка систем контролю якості у металургійній промисловості. // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". - 2020. - №5. - С. 102-112.
8. Державні стандарти України. ДСТУ EN 10025-2:2006. Прокат конструкційний із нелегованих сталей. - Київ: Держстандарт, 2006. - 100 с.
9. Кравченко О.О. Новітні підходи до контролю параметрів плавлення сталі. - Львів: Світ, 2019. - 180 с.
10. Іваненко Ю.Ю. Технологічні процеси у металургійній галузі. // Український металургійний журнал. - 2021. - Т.14, №2. - С. 45-53., 2006.-100 с.
11. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. – К: Либідь, 2007, – 656с.
12. Галай М.В. Теорія автоматичного керування: неперервні та дискретні системи. Навч. пос-к. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – 454с.
13. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. –131 с.
14. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.

15. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.

16. Шефер О.В. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни „Електричні машини” для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. – 52 с.

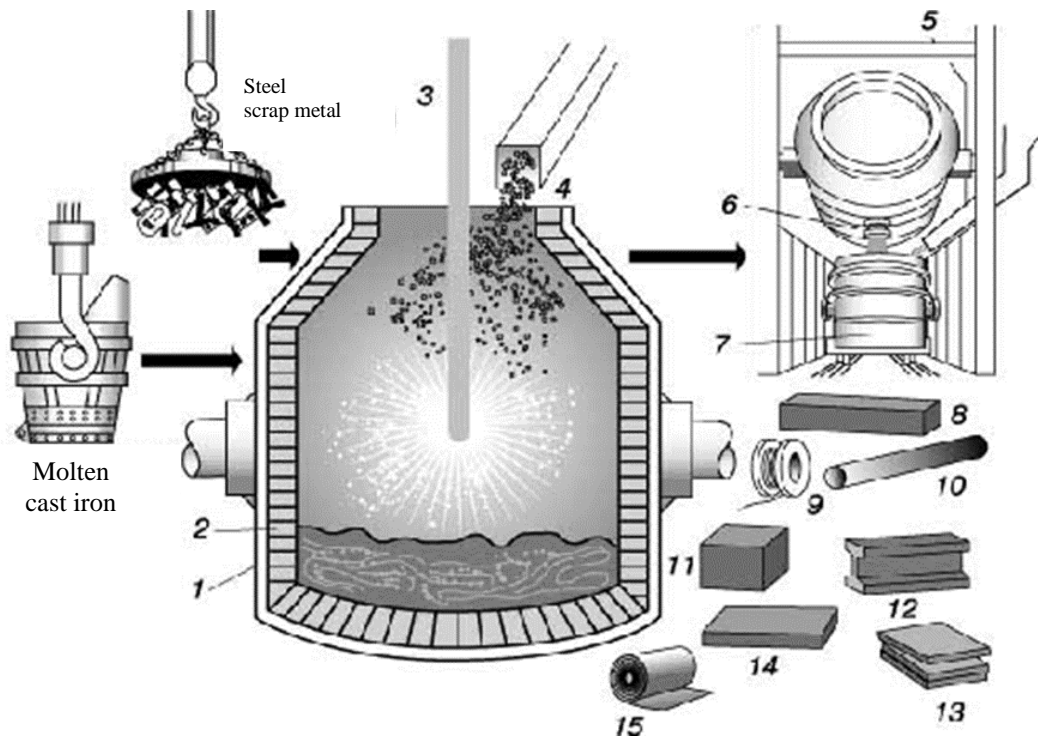
# ДОДАТКИ

## 1 TECHNOLOGICAL SECTION

### 1.1 Steelmaking Process in the Oxygen Converter

The oxygen converter shop plays a crucial role in the plant's operations: 60-70% of the steel produced at the plant is made using the oxygen converter process. The converter shop consists of converter, casting, transportation, and processing departments. Additionally, there are sections for waste and slag, a pig iron transfer pipe, and maintenance bays for intermediate containers and ladles.

The converter shop is equipped with three oxygen converters, each with a capacity of 370 tons. The oxygen converter, shown in Figure 1.1, is a pear-shaped unit up to 15 meters high, with a body made of sheet steel up to 110 mm thick. During operation, the converter can rotate around a horizontal axis with a tilting device for loading scrap and pig iron and for discharging steel and slag. The raw materials for the oxygen conversion process include molten pig iron, scrap, and flux.



1 – Steel shell, 2 – Refractory lining, 3 – Oxygen lance, 4 – Flux addition, 5 – Alloying additives, 6 – Tap hole, 7 – Ladle, 8 – Billet, 9 – Wire, 10 – Seamless pipe, 11 – Bloom, 12 . – Beam, 13 – Sheet steel, 14 – Plate, 15 – Sheet metal

## 1.2 Technological Process for Measuring Temperature and Sampling Metal

Measuring the temperature and sampling metal for express analysis of chemical composition are technological processes, and the time spent on them is included in the melting cycle. Previously, these tasks were performed by operating personnel who first removed the oxygen lance and placed the converter in a tilted position, thus reducing the converter's productivity.

To fully mechanize temperature measurement and sampling, reduce the duration of these operations, and eliminate manual labor, a machine was developed for converters with a capacity of 350 to 400 tons without the need to tilt the converter. The design of the machine for measuring bath temperature and sampling metal is shown in Figure 1.2.

The temperature of the molten steel, carbon content determination, and sampling are carried out using a measuring probe immersed in the metal bath for 5-10 seconds.

The machine consists of a frame 5, rail 10, carriage 16 with measuring tube 19, cable mechanism 2 for moving the carriage, and a hydraulic mechanism 1 for tilting the rail. The tilting guide rail is a double-acting oscillating hydraulic cylinder. The fluid is supplied from an oil pressure system by two vane pumps to the hydraulic cylinder. The cable mechanism for moving the carriage is a single-drum winch. The cable 3 is attached at one end to the carriage and at the other end to the drum. The guide block 6 is located on the pivot axis 7, and the deflection 9 is installed in the guide hinge. The carriage rides on four wheels and has two rigid wheels. To prevent the carriage from falling off in the event of a cable break, a safety device is attached to it. The probe must be protected from high temperatures. The lance consists of a shaft 12 with three nozzles 13 for supplying and draining cooling water and inert gas, and a body with three concentric tubes. The inner annular cavity directs the downflow of the external drainage water, resulting in better cooling. Inside the body is a rod that freely passes through the entire nozzle and is attached to the carriage. Inert gas is injected into the gap between the inner tube of the nozzle and the rod, preventing metal from entering. The hollow rod is connected to the tip 20, which serves to secure the probe. The lance has two stops 14 attached with damping springs. The nozzle body is located between two pairs of conical rollers 15, which ensure displacement of the body relative to the carriage by a stroke of 1500 mm, necessary for retracting the probe from the nozzle.

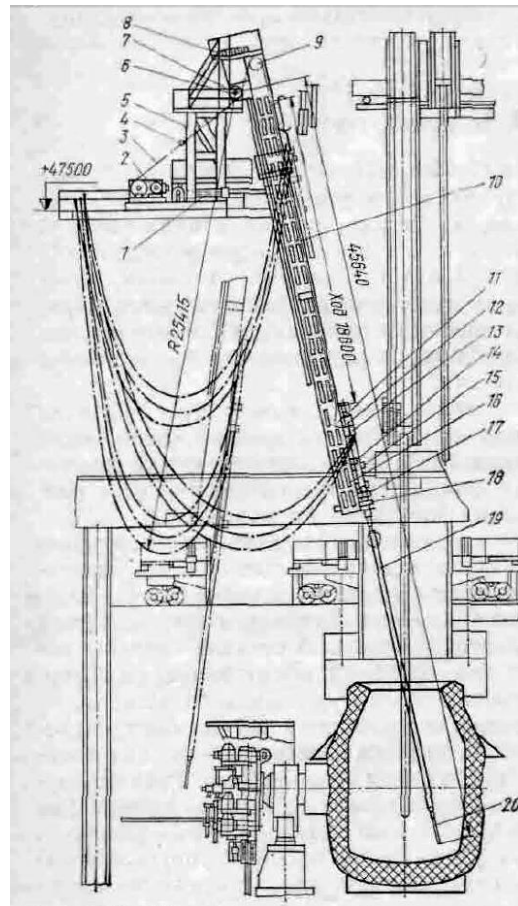


Figure 1.2 - Lifting mechanism

The machine operates as follows. Before starting work, the guide 10 is in the initial left position, the carriage is in the intermediate position, and the measuring tube is held by hook 11. The tip 20 is retracted from the spear, allowing the probe to be attached. When the winch drive 2 is turned on, the tip with the probe is initially retracted at the speed of the carriage on the measuring lance, and then the lance rises with the carriage at working speed to the highest position. After the carriage stops, the pivot hydraulic cylinder 1 moves the guide to the far left position, engages the winch drive, and the lance, resting its upper support 14 on the carriage stop, moves downward at working speed and passes through the opening in the box into the converter. When inserting the lance into the caisson and its internal cavity, inert gas is injected. The spear rests its lower stop 17 on the stop 18 of the guide. As the carriage continues to descend, it retracts the tip with the probe from the nozzle and immerses it in the molten metal to a depth of up to 700 mm. Initially, the tip with the probe is retracted into the nozzle, and then the shutter moves upward. The return

of the guide and nozzle to the left initial position for removing the probe occurs in reverse order.

### **1.3 Characteristics of Melting-Measurement Machine Mechanisms**

#### **1.3.1 Movement Mechanism of the Measuring Lance**

The measuring tube is installed on a carriage equipped with two pairs of rollers and moves along a guide mounted on the support brackets of the pivot column. The carriage is suspended on a cable on a drum driven by a DC motor D814 through a differential gear with a ratio of  $i_1 = 4.3$ . Through the same gearbox, but with a ratio of  $i_2 = 93$ , the drum can be driven by an AC motor 4MTKN 160M8, which is intended for removing the nozzle from the converter in case of failure of the main drive.

The specific position of the injector is fixed using TKHG-500 and TKHG-300 brakes for the main or emergency drive. In addition to the function of locking the mechanism in the stop position, the brakes prevent rotation transmission from one motor to another when the drum is locked. To control the traction drive and lock other mechanisms, a crawler switch VPF 11-01-182151-54 is provided. The gear ratio of the built-in gear switch  $i = 15$  ensures the rotation of the shift shaft by 0.88 turns when filling the nozzle. Emergency control of the lance is provided by three-position switches VP16E23A231-55U3.2 SQ41, SQ42, and SQ47. SQ41 is designed to turn off the main motor in the highest position of the carriage with the lance. SQ42 is for reversing the main motor in the lower position of the injector. SQ47 was developed to turn off the emergency motor in the upper position of the carriage loaded with the lance. In case of failure and free fall of the vehicle, it is ensured by a protective device. In this case, as with any cable slack connected to the suspension of the carriage, using the nozzle during descent, the cable tension sensor SQ48 operates on the limit switch type VP16E23A231-55U3.2.

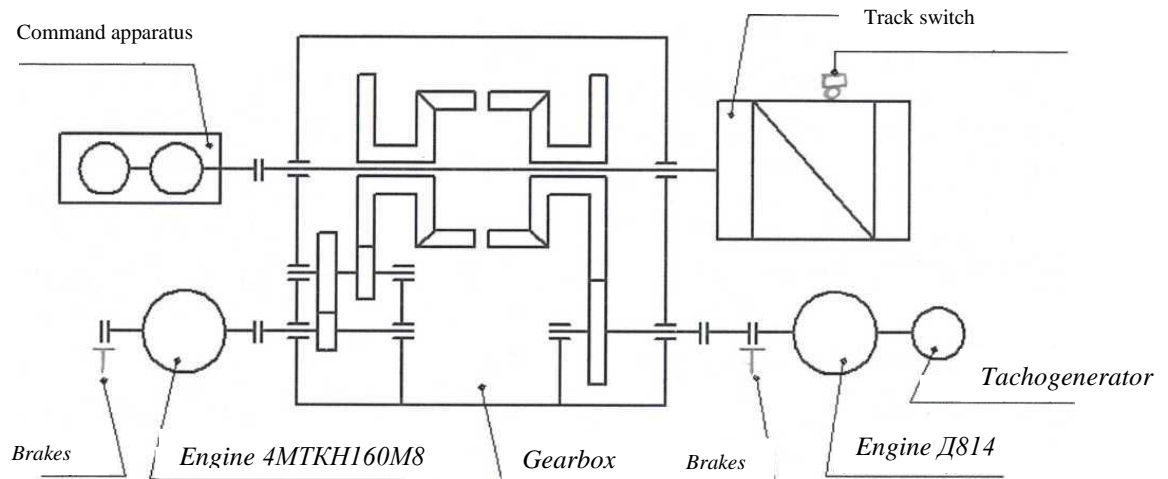


Figure 1.3 – Kinematic scheme of the lifting mechanism of the measuring lance

To ensure the required range and accuracy for maintaining this lance rotation frequency, a DC tachogenerator TP212 is installed on the rear end of the motor shaft. The excitation of the tachogenerator is provided by permanent magnets. The kinematic diagram of the lance lifting mechanism is shown in Figure 1.3.

### 1.3.2 Hydraulic Pump Station

The pump station is designed to supply the hydraulic cylinders of the executive mechanisms with working fluid. The working and reserve drives of the BG12-28M pumps consist of squirrel-cage induction motors 4A100 SA4. The pump operates continuously throughout the melting process. Continuous circulation of oil through the hydraulic system ensures the supply to the cooling cylinders. In between, the pump is turned off. The technical data of the motor are shown in Table 1.

Table 1 - Technical Data of the 4A100 SA4 Motor

Quantity per Mechanism	Condition	
Voltage	V	380
Power	kW	3
Current	A	6.7
Nominal Rotational Speed	RPM	1435
Operating Mode	Continuous	100%

**Додаток Б**

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська Політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікації

**Розроблення електроприводу механізму для  
контролю параметрів плавлення сталі**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Студент 201пМЕ групи

Корнійчук О.В

Керівник:

Доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В

Полтава 2024

**Актуальність дослідження** полягає в прагненні підвищити якість та ефективність процесу плавлення сталі. Використання електроприводу для контролю параметрів цього процесу може призвести до значних покращень у порівнянні з традиційними методами

**Метою роботи** є розробка ефективного електроприводу для механізму, що використовується в процесі плавлення сталі, для забезпечення точного контролю ключових параметрів процесу.

Для виконання поставленої мети з роботи необхідно виконати наступні завдання:

**1. Аналіз поточних тенденцій у виробничтві сталі:** Дослідження сучасних методів та технологій плавлення сталі для визначення потреб у покращенні процесу.

**2. Проектування електроприводу з урахуванням особливостей технологічного процесу:** Розробка концепції електроприводу, що відповідає вимогам ефективності, надійності та точності управління.

**3. Експериментальне випробування та оптимізація системи:** Проведення тестів з метою визначення ефективності та досягнення оптимальних параметрів роботи електроприводу.

**4. Оцінка та аналіз результатів:** Аналіз отриманих даних та визначення досягнень у контексті поставлених цілей та реалізації технічних вимог.

## Будова кисневого конвертора

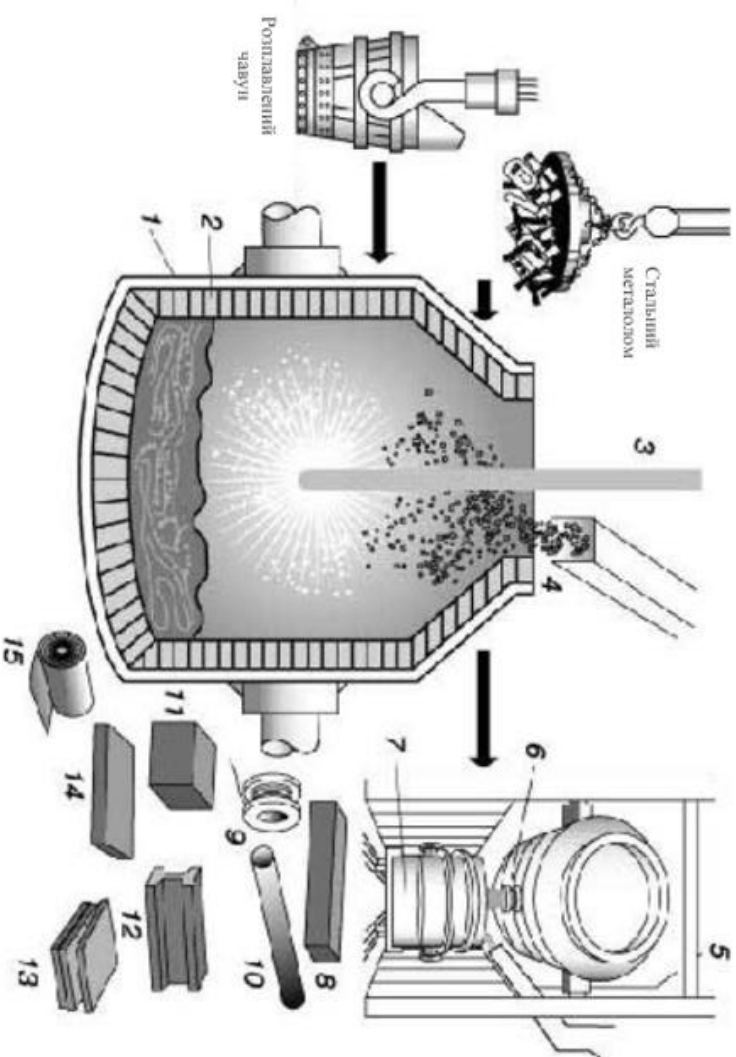
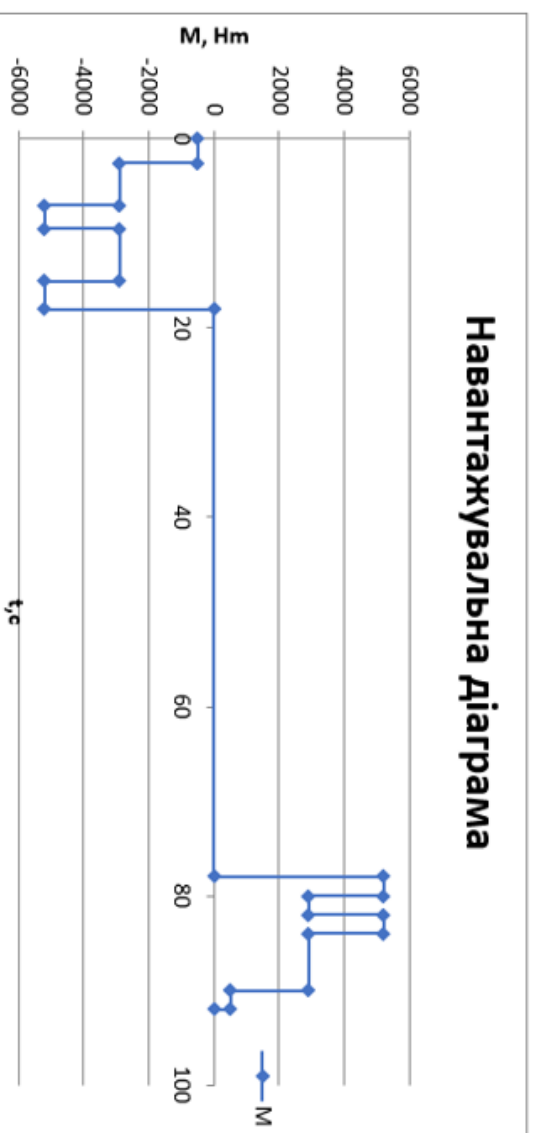
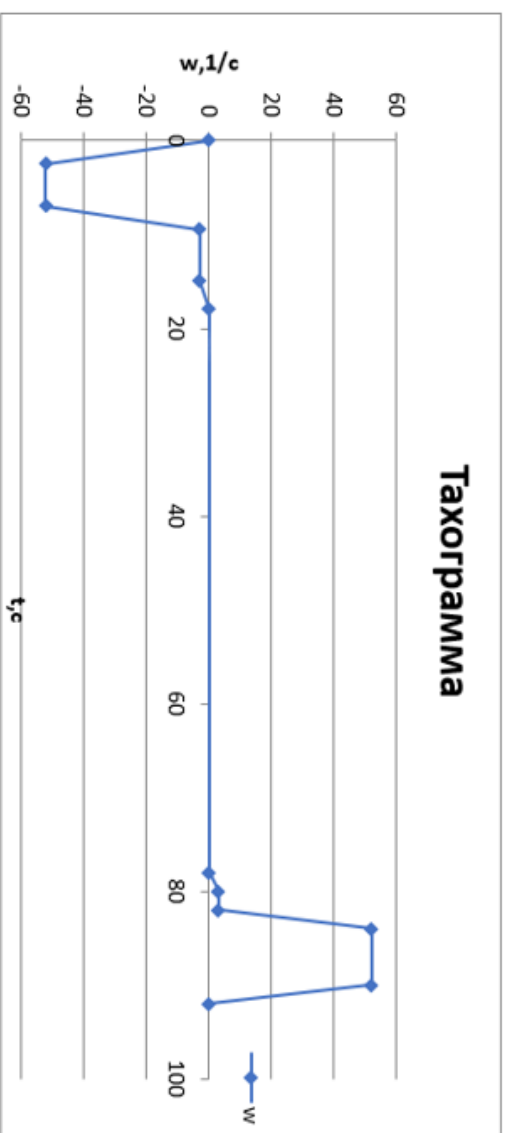


Рисунок 1.1 - Кисневий конвертер

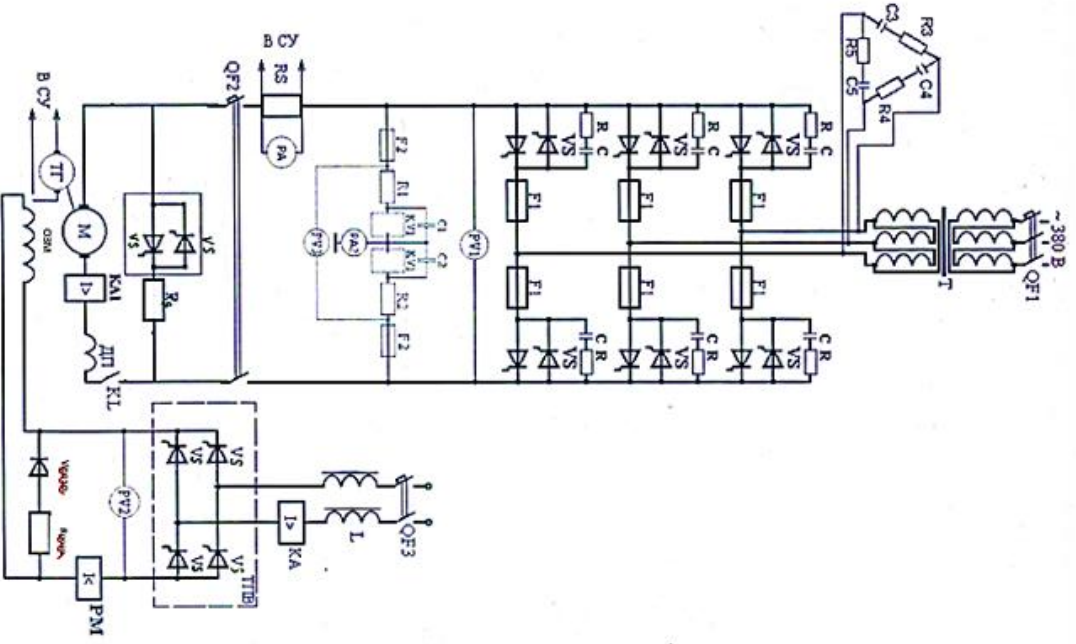
1 – сталевий кожух; 2 - вогнетривка футеровка; 3 – киснева фурма;  
 4 – наповнення флосом; 5 – легуючі добавки; 6 – льотка; 7 – ківш; 8 –  
 заготівля; 9 – дрiт; 10 – безшовна труба; 11 – бiлом; 12 – балка; 13 – листова

## Навантажувальна діаграма та тахограма механізму підйому фурми при повному підйомі і опусканні

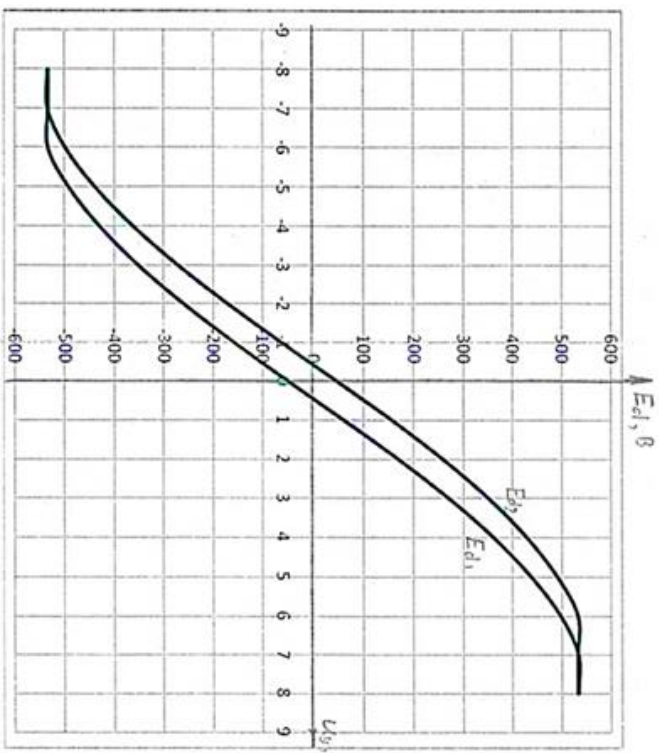
4



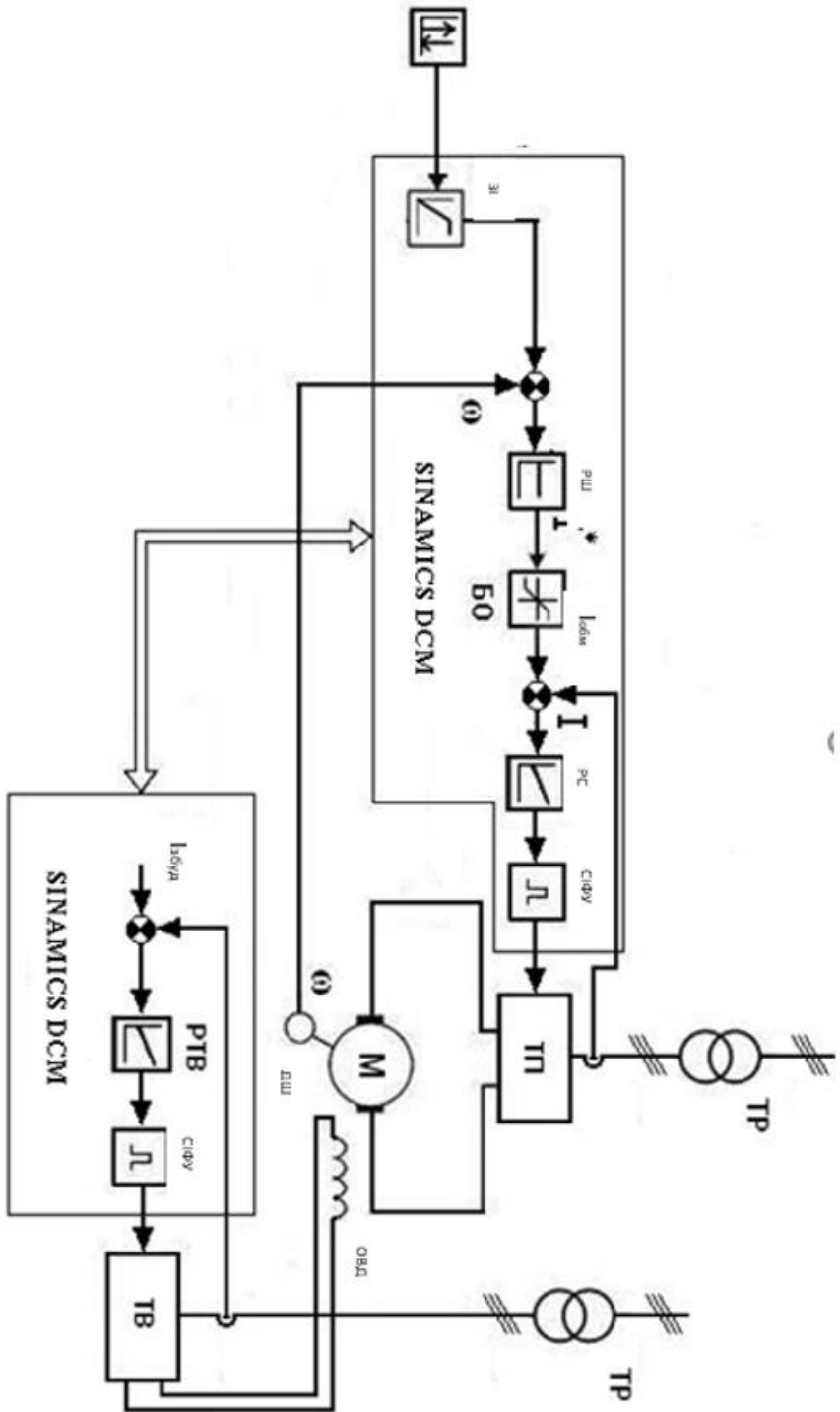
**Силовая схема тиристорного перетворювача**



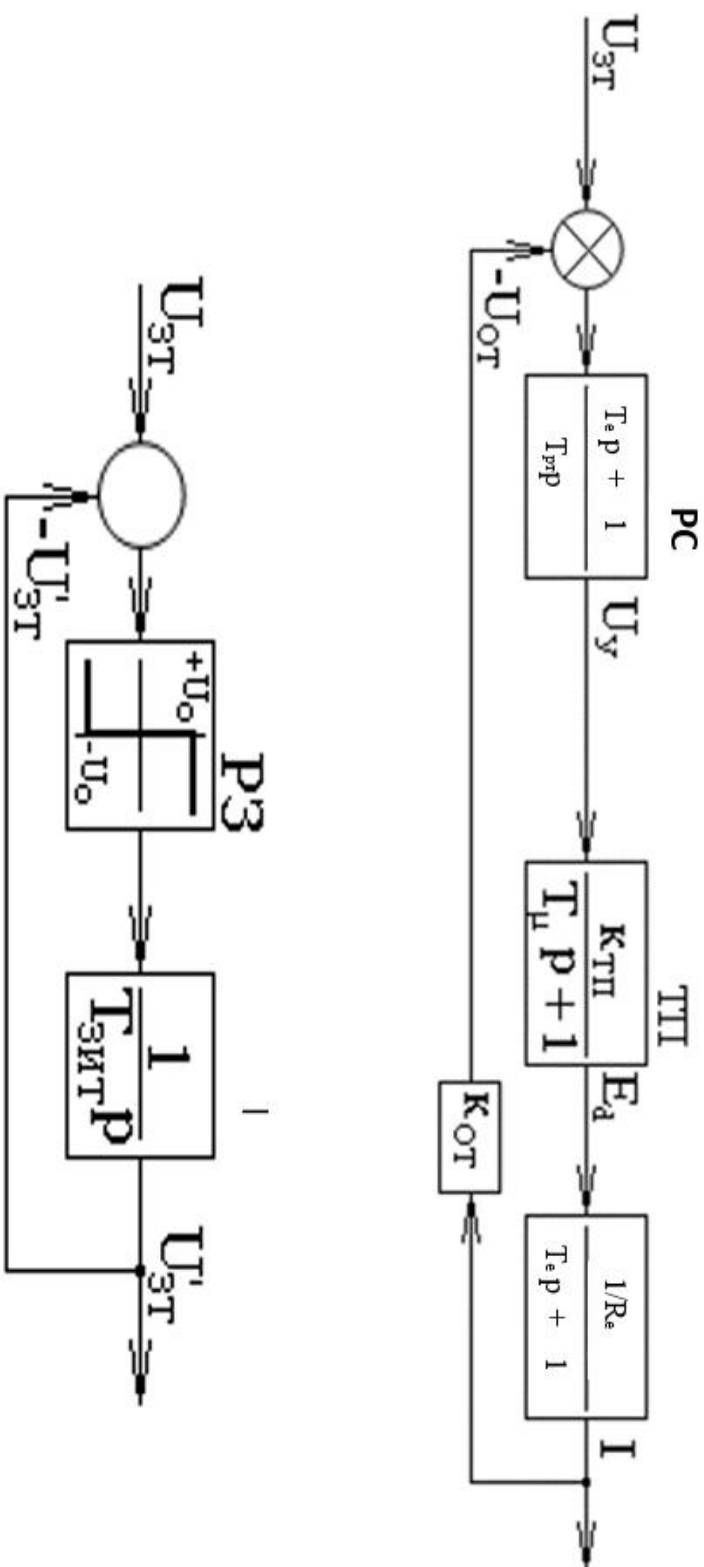
**Регулювальні характеристики тиристорного перетворювача**



### Функціональна схема електропідводу вимірювальної форми

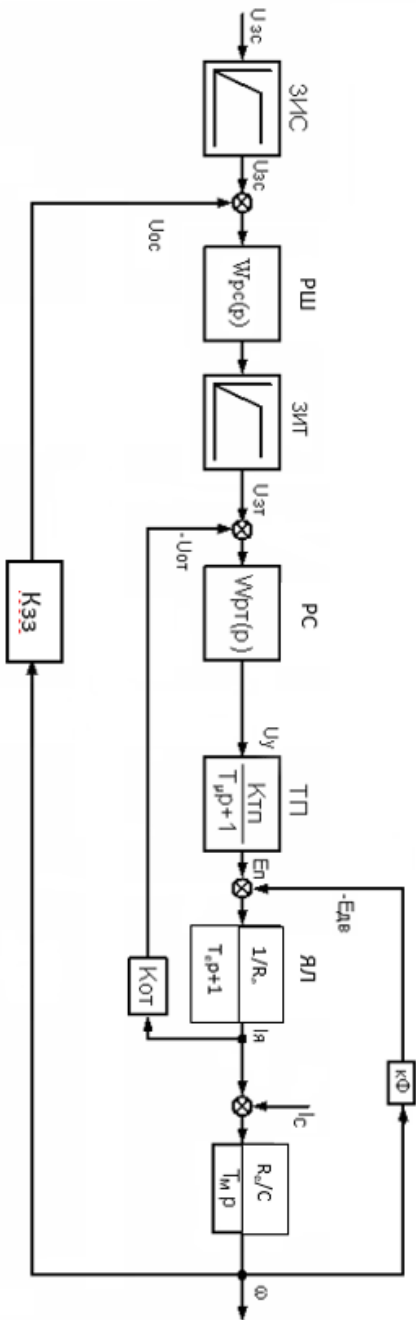


### Контур регулювання струму якоря

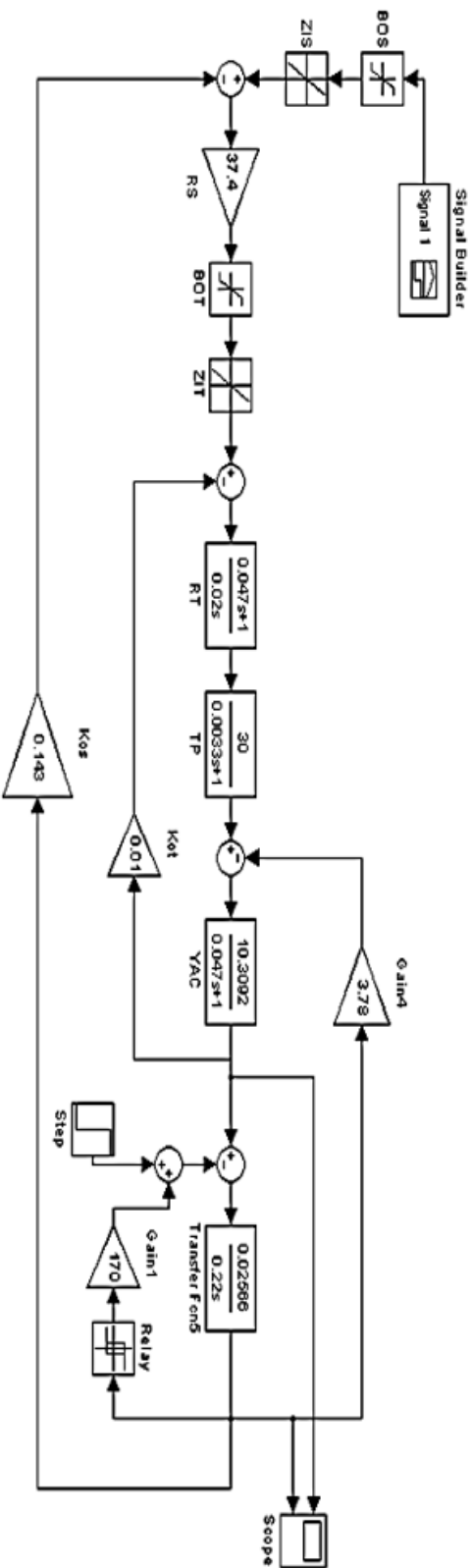


Задавач інтенсивності струму якоря

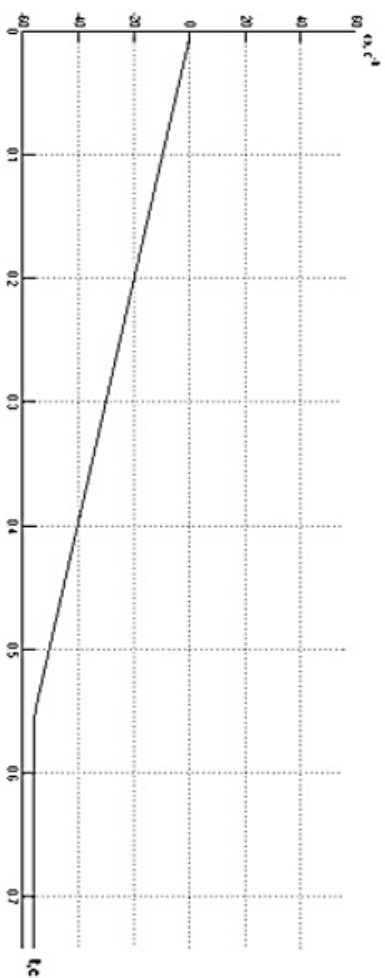
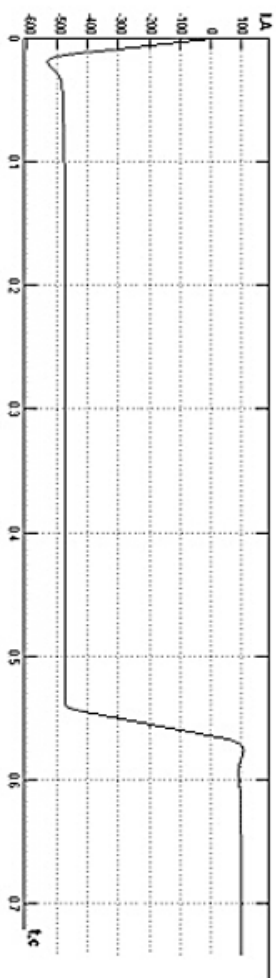
**Структурна схема САР електроприводу підйомного механізму вимірювальної форми**



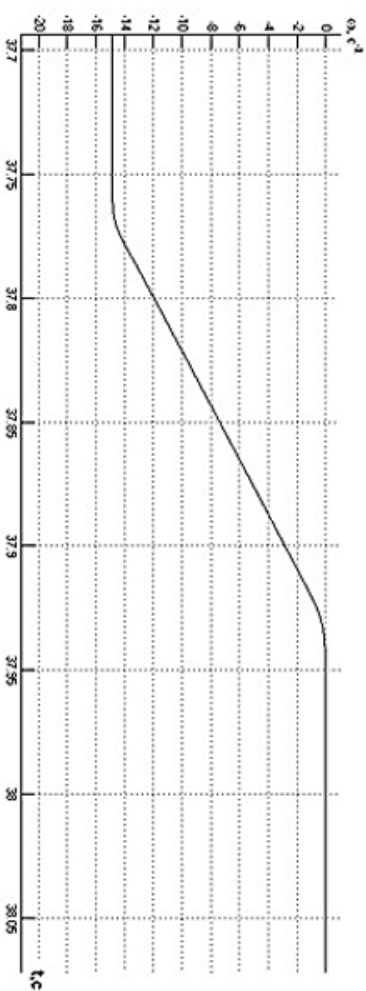
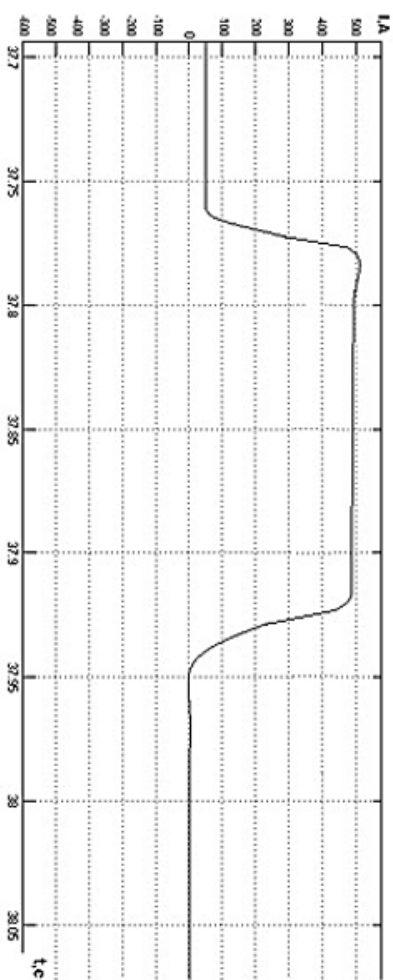
**Математична модель САР електроприводу підйому вимірювальної форми**



### Графіки $I = f(t)$ і $\omega = f(t)$ при розгоні до робочої швидкості при опущеній фурмі



### Графіки $I = f(t)$ і $\omega = f(t)$ при гальмуванні фурми



## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі був розроблений електропривод вимірювальної фурми.

В ході аналізу технологічних умов були сформульовані основні вимоги до електроприводу підйомника.

Виходячи з вимог технології, був обраний та обраний на номінальну напругу 440В двигун постійного струму типу Д814У2.

З урахуванням номінальних даних двигуна і вимог технологічного процесу був обраний комплектний тиристорний електропривод КТЕ-320 / 440-131-23УХЛ4. Тиристорний перетворювач, який використовується для живлення ланцюга якоря двигуна, підключається до мережі змінного струму напругою 380 В через трансформатор серії вузлів ЦЗП-250 / 0,7.

Для живлення обмотки збудження двигуна та інших внутрішніх вимог був обраний перетворювач типу КТЕ-10/220-9-УХЛ4 з живленням від реактора обмеження струму 220 В змінного струму. Проаналізовано керуючі характеристики перетворювача потужності. Управління здійснюється на базі модуля управління SINAMICS DSM.

Розроблено структурну схему системи керування автоматичним електроприводом, розраховані основні параметри системи ТП-Д і всі необхідні параметри контуру управління, коефіцієнтів зворотного зв'язку і датчиків.

Враховано функціональні можливості функціональних блоків модуля керування SINAMICS DSM, запропоновано автоматизовану вимірювальну систему. Розрахункове управління електроприводом забезпечує відображені настройки електроприводу фурми.